

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ДЕКУША ОЛЕГ ЛЕОНІДОВИЧ

УДК 53.08:536.2:536.6:536.629.7

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

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин
Галузь знань 17 – електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

 О.Л. Декуша

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

Київ – 2024

АНОТАЦІЯ

ДЕКУША О.Л. Науково-практичні засади неруйнівного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів і виробів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.11.13 «Прилади і методи контролю та визначення складу речовин» (17 – електроніка, автоматизація та електронні комунікації). – Інститут загальної енергетики НАН України, Київ, 2024.

Дисертаційна робота присвячена розвитку теоретичних засад неруйнівного контролю, розробленню та практичному застосуванню засобів та методів комплексного контролю терморадіаційних й теплофізичних характеристик матеріалів і виробів при проведенні обстеження теплоізоляційної оболонки будівель та споруд як складової частини енергоаудиту.

У вступі розкрито актуальність наряду 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* наведено аналіз наукових публікацій та сучасного стану нормативно-технічних документів щодо теплотехнічного обстеження будівель. Розглянуто 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.

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.

Розглянуто математичну модель кліматичної компоненти метеорологічного поля при контролі теплового опору, з метою оцінювання основних факторів та метеорологічних параметрів, що впливають на теплообмін в будівлях.

Запропонована комп'ютерна модель процесу складного радіаційного та конвективно-кондуктивного теплообміну при контролі теплофізичних характеристик оболонки будівлі з урахуванням місць встановлення сенсорів і

впливу їх параметрів на результат контролю. Отримано розподіл температури та поля швидкості повітря внутрішнього теплового поля, що дозволило встановити відсутність підвищеної турбулізації у зоні розташування сенсорів теплового потоку.

Показано вплив зміни коефіцієнта емісії сенсорів теплового потоку на результати визначення теплового опору зовнішньої оболонки будівлі.

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

Розвинуто науково-практичні засади створення нових сенсорів теплового потоку для виконання вимірювань густини теплового потоку в діапазоні 1–10 Вт/м² за наявності дрейфу температури.

Третій розділ присвячено диференційному калориметричному методу експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів.

Цей метод може бути застосований для вимірювання інтегрального напівсферичного коефіцієнту емісії 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 обох комірок, що забезпечується за допомогою нагрівного елемента.

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.

За результатами моделювання проведено аналіз залежності вимірюваного значення коефіцієнту емісії від диференціального теплового потоку, визначеного як різниця потоків, вимірюваних у комірках з сенсорами, що мають

чорне та світле покриття. Отримана залежність є калібрувальною характеристикою приладу. Встановлено нелінійність та зміщення калібрувальної характеристики, які необхідно враховувати в алгоритмі опрацювання інформації, що надходить від первинних сенсорів приладу.

Для визначення режиму роботи приладу після встановлення на зразок проведені розрахунки температури поверхні зразка в нестационарній постановці моделі, виходячи з отриманих результатів, стабілізація температури зразка відбувається після 2000 секунди, що в подальшому дозволяє розглядати режим як допустимий для проведення контролю коефіцієнту емісії.

У четвертому розділі наведено комбіновану методику контролю теплового опору оболонки будівлі. 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.

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.

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.

У п'ятому розділі розглянуто метрологічне забезпечення вимірювання теплового потоку при контролі теплового стану оболонки будівлі.

Проведено моделювання процесів теплообміну в установці для радіаційного калібрування сенсорів теплового потоку та визначення терморадіаційних характеристик.

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 та розширити нижню межу діапазону вимірювання густини теплового потоку.

Запроваджено комплексний підхід до визначення метрологічних характеристик біметалевих та напівпровідникових сенсорів теплового потоку, які найчастіше використовуються для контролю теплового опору огорожувальних конструкцій.

Визначено такі характеристики: коефіцієнт перетворення (чутливість до теплового потоку), залежність коефіцієнта перетворення від температури, час відгуку сенсора, коефіцієнт емісії поверхні сенсора. Визначення коефіцієнта перетворення сенсора, проведене при кондуктивному та радіаційному підведенні теплової енергії, що дозволило виявити вплив умов теплообміну на характеристики сенсорів.

У 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 та віконному блоці з полівінілхлоридних профілів з заповненням світлопрозорої частини двокамерними склопакетами варіантом скління СПД 4i-14Ar-4M1-12Ar-4i в кліматичній камері. В результаті порівняльних випробувань встановлено, що відхилення результатів

вимірювання температури не перевищувало $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, а густини теплового потоку – $\pm 0,75 \text{ Вт/м}^2$.

Проведено апробацію методики, яка базується на поєднанні тепловізійного зображення температури поверхні для якісного аналізу та кількісних контактних вимірювань температури поверхні та величин теплового потоку. Перевагами даної методики є: зменшення впливу суб'єктивного фактора на процес контролю; здатність виявляти локальні дефекти теплоізоляції; здійснювати контроль огорожувальних конструкцій, які мають складну конструкцію.

Проведено оцінку невизначеності результатів вимірювання теплового опору оболонки будівлі та порівняння отриманої оцінки невизначеності з стандартом ISO 9869, відповідно до якого розширена невизначеність лежить в межах від 14% до 28%, шляхом оцінки достовірності.

Експериментально досліджено терморадіаційні характеристики алюмініду титану, різних видів скла та покриттів.

Наукова новизна отриманих результатів:

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 1–10 Вт/м² та наявності дрейфу температури, що дало змогу зменшити невизначеність результатів вимірювання густини теплового потоку.

Практичне значення отриманих результатів:

1. 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.

2. 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.

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

4. 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.

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

Ключові слова: тепловий опір, коефіцієнт емісії, сенсори теплового потоку, сенсори температури, методи контролю теплових величин, комп'ютерні моделі теплообміну.

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Hotra, 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. (Т.1), 433 с. (ISBN 978-966-02-8639-9).

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. https://doi.org/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. *CEUR Workshop Proceedings*, 3309, 301-313. <https://ceur-ws.org/Vol-3309/paper19.pdf> (**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, <https://doi.org/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. <https://doi.org/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., Красильников, 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 Монографія в трьох книгах. Київ: Інститут технічної теплофізики НАН України, 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. <https://doi.org/10.22178/pos.35-2> (ISSN 2413-9009).

31. Ковтун, С.И., Воробьёв, 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.

ABSTRACT

DEKUSHA O.L. Theoretical and practical principles of non-destructive control of thermal radiation and thermophysical properties of materials and products – Qualifying scientific work on the rights of manuscript

Thesis of the degree obtaining of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.11.13 «Devices and methods for controlling and determining the composition of substances» (17 – electronics, automation and electronic communications). – Institute of General Energy of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2024

The thesis is devoted to the development of theoretical foundations of non-destructive control, the development and practical application of means and methods for complex monitoring of thermoradiation and thermophysical characteristics of materials and products when conducting an inspection of the thermal insulation shell of buildings and structures as an integral part of an energy audit.

The introduction reveals the relevance of the research direction and justifies the choice of the topic of the thesis, formulates the purpose and objectives of the research, presents the scientific novelty and practical significance of the results obtained, indicates the personal contribution of the applicant, indicates the connection with scientific programs, themes, plans, grants, research methods, state of publications and testing of the results of the thesis research, provides information about their implementation and indicates the structure of the thesis.

In the first section an analysis of scientific publications and the current state of regulatory documents and standards on energy audit of buildings has been carried out. The hardware that is used to monitor the thermal state of the building envelope in field and laboratory conditions has been considered, the requirements for control systems has been determined, with the help of which studies of the thermal resistance of the elements of the heat-protective envelope of the building are carried out. In particular, it has been noted that when studying complex objects, there is a need to create a control system built on a modular principle.

An analysis of the methodological support for thermal resistance studies has been carried out, and the feasibility of improving the non-destructive testing technique, combining high-quality thermal imaging analysis of the building envelope (ISO 6781) and measurement of surface heat flux density and temperature (ISO 9869), has been substantiated, which would increase the likelihood of detecting structural defects and reduce the impact subjective factor on test results.

Carried out is an analysis of methods for determining the emission coefficient, which is relevant for all cases of research, calculation and modeling of radiation heat transfer, in particular when determining the properties of energy-efficient glass and windows and when carrying out pyrometric and thermal imaging measurements. Special attention is paid to the methods and devices that can be used in non-destructive testing. The most common methods are those based on determining the emissivity by comparison with the radiation of working standards, and methods for determining the reflection coefficient.

In the second section, a conceptual approach to the integrated control of thermoradiation and thermophysical characteristics of materials and products has been formed, based on models of fields of informative parameters and statistical methods of data processing.

A mathematical model of the climatic component of the meteorological field when monitoring thermal resistance has been considered in order to assess the main factors and meteorological parameters affecting heat exchange in buildings.

A computer model of the process of complex radiation and convective and conductive heat exchange when monitoring the thermophysical characteristics of a building envelope is proposed, taking into account the installation locations of sensors and the influence of their parameters on the control result. Data have been obtained on the distribution of temperature and the air velocity field of the internal thermal field, which made it possible to establish the absence of increased turbulization in the area where the heat flow sensors are located.

The influence of changes in the emission coefficient of heat flow sensors on the results of determining the thermal resistance of the outer envelope of a building has been shown.

A method has been proposed for correcting the results of heat flow measurements by compensating for temperature drift, which makes it possible to reduce the uncertainty in the results of heat flow measurements under natural conditions.

The scientific and practical basis for the creation of new heat flow sensors has been developed to perform measurements of heat flow density in the range of 1–10 W/m² in the presence of temperature drift.

The third section is devoted to the differential calorimetric method for express control of the emission coefficient of surfaces of materials and coatings.

This method is used to measure the integral hemispherical surface emission coefficient of materials and coatings and can be used in the production of building materials and structures, aerospace and other industries.

The essence of the method is to compare heat flows, which are determined in two measuring cells by heat flow sensors, the surfaces of which have different emissivity coefficients, and at a constant temperature of both cells, which is ensured using a heating element.

To analyze the impact factors when implementing the differential calorimetric method for monitoring the emission coefficient, computer CFD modeling of the processes of complex radiation and convective conductive heat transfer was carried out both in each individual measuring cell and in the prototype of the device.

Based on the modeling results, an analysis has been made of the dependence of the measured value of the emission coefficient on the differential heat flux, defined as the difference in fluxes measured in cells with sensors with black and light coatings. The resulting dependence represents the calibration characteristic of the device. The nonlinearity and shift of the calibration characteristic have been established, which must be taken into account in the algorithm for processing information coming from the primary sensors of the device.

To determine the operating mode of the system after installation on the sample, calculations of the sample surface temperature have been performed in a transient model. Based on the obtained results, the sample temperature stabilizes after 2000 seconds, which subsequently allows considering the mode as acceptable for conducting emissivity coefficient control.

The fourth section presents a combined method for monitoring the thermal resistance of the building envelope. The method combines thermal imaging qualitative analysis of the temperature fields of the building envelope with quantitative contact measurements of the values of surface heat flux density and temperature in certain areas of the building envelope.

A thermal resistance monitoring system and a software package for recording and processing information have been developed. Due to the modular design of the system, the use of various modifications of heat flow sensors and the method of correcting the results of heat flow determination, it is possible to simultaneously control 40 zones and objects that have complex shapes.

A device has been created for express control of the emission coefficient of material surfaces, which is based on the developed differential method. The device allows to study energy-efficient materials and coatings with an emission coefficient in the range from 0.05 to 1.0 with an expanded uncertainty of 0.02.

In the fifth section the metrological support of heat flow measurement during monitoring the thermal state of the building envelope has been considered.

Modeling of heat transfer processes in an installation for radiation calibration of heat flow sensors and determination of thermoradiation characteristics have been carried out.

Based on the results of computer modeling of complex radiation and convective and conductive heat transfer processes in the calibration system, the boundaries of the working zone with a uniform distribution of heat flux density have been established, which made it possible to reduce the uncertainty of calibration results and expand the lower limit of the heat flux density measurement range.

An integrated approach to determining the characteristics of bimetallic and semiconductor heat flow sensors, which are most often used to control the thermal resistance of enclosing structures, has been introduced.

The following characteristics have been determined: conversion coefficient (sensitivity to heat flow), dependence of the conversion coefficient on temperature, the response time of the sensor, emissivity of the sensor surface. The determination of the conversion coefficient of the sensor, carried out during conductive and radiative supply of thermal energy, made it possible to reveal the influence of heat transfer conditions on the characteristics of the sensors.

The sixth section presents experimental studies of the developed system for monitoring the thermal resistance of building envelopes and a device for determining the emissivity.

Laboratory tests of the monitoring system of thermal resistance were carried out jointly with the laboratory of building enclosing structures and materials of the State Enterprise “UKRMETRTESTSTANDARD” on a fragment of a structure made of three-layer wall panels with polyurethane foam insulation indicating homogeneous zones and a window block with polyvinyl chloride and glazing system 4i -14Ar-4M1-12Ar-4i in a climate chamber. As a result of comparative tests, it has been established that the deviations in the temperature measurement results have not exceeded $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, and the heat flux density has not exceeded $\pm 0.75 \text{ W/m}^2$.

A methodology has been tested, which is based on a combination of thermal imaging of surface temperature for qualitative analysis and quantitative contact measurements of surface temperature and heat flow values. The advantages of this technique are the reduction of the influence of the subjective factor on the control process, the ability to detect local thermal insulation defects and carry out control of enclosing structures of a complex design.

The uncertainty of the measurement results of the thermal resistance of the building envelope has been assessed and the resulting uncertainty assessment has been compared with the ISO 9869, according to which the expanded uncertainty ranges from 14% to 28% by assessing the reliability.

The thermoradiation characteristics of a promising material, namely titanium aluminide, different types of glass and coatings have been experimentally studied.

Scientific novelty of the results obtained:

1. A new conceptual approach to integrated non-destructive testing of thermoradiation and thermophysical characteristics of materials and products is proposed. It is based on models of fields of informative parameters and statistical methods for processing experimental data, which made it possible to increase the reliability of the assessment of the thermal performance of the building envelope.

2. For the first time, a method for monitoring the emission coefficient has been proposed, which is based on the principles of differential calorimetry, which provides compensation for the convective-conductive component of heat transfer and allows express monitoring in laboratory, industrial and field conditions without special preparation of the surface of the test object.

3. For the first time, a method has been proposed for correcting heat flow measurement results by compensating for temperature drift, which makes it possible to reduce the uncertainty of the results of heat flow measurements under natural conditions.

4. The method for monitoring the thermal resistance of a building envelope has been improved by using Computational Fluid Dynamics computer model of the control object, which has made it possible to reduce the influence of instrumental factors on the control process and predict the state of the building's thermal protection envelope, taking into account conductive and convective-radiative heat transfer.

5. The scientific and practical basis for the creation of new heat flow sensors has been developed and their metrological support has been improved to perform measurements of heat flow density in the range of 1–10 W/m² and the presence of temperature drift, which has reduced the uncertainty of heat flow density measurement results.

Practical significance of the obtained results:

1. A control technique has been developed based on a combination of thermal imaging analysis of enclosing structures with contact measurements of the values of surface heat flux density and temperature, which made it possible to reduce the influence of the subjective factor on the test results.

2. A system for non-destructive testing of the thermal resistance of the outer envelope of the building and a software package for recording and processing experimental data have been developed. Due to the modular design of the system and the use of various modifications of heat flow sensors, it is possible to carry out simultaneous monitoring in a large number of zones and study the characteristics of a heat-protective envelope of a complex structure and its elements.

3. The methodology and control system have been tested in laboratory and field conditions, which made it possible to determine the reliability of the assessment of the thermal performance indicators of the building envelope enclosing structures.

4. Based on computer modeling and verification of the processes of complex radiation and convective-conductive heat exchange when monitoring the emission coefficient, a research methodology has been developed and requirements for sensors and the hardware and software part of the system have been determined.

5. A device for monitoring the emission coefficient and a software package for recording and processing information have been developed. Experimental studies have been carried out on a number of energy-efficient materials and coatings used in construction.

Keywords: thermal resistance, emission coefficient, heat flow sensors, temperature sensors, methods for control of thermal quantities, computer models of heat transfer.

List of publications

Scientific works in which the main scientific results of the thesis were published:

1. Hotra, 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. Vorobiov, L. Y., Dekusha, L. V., **Dekusha O. L.**, Kovtun, S. I., Ivanov, S. O. (2020). The differential device for surface emissivity measuring, *Ukrainian Metrological Journal*, 3A, 153-159. ISSN (Online) 2522-1345. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.3A.2020.218721>
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. (ISSN 2603-4018).
7. Grishchenko, T. G., Dekusha, L. V., Vorobiov, L. Y., Burova, Z. A., Kovtun, S. I., **Dekusha, O. L.** (2017). *Thermometry: theory, metrology, practice. Methods and tools for measuring heat flow*. Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine. (ISBN: 978-966-02-8199-8).
8. Grishchenko, T. G., Dekusha, L. V., Vorobiov, L. Y., Dekusha, O. L., Burova, Z. A., Kovtun, S. I. (2018). *Thermometry: theory, metrology, practice*.

Thermometer equipment for solving applied problems. Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 1(3). (ISBN 978-966-02-8639-9).

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. **Dekusha, O. L.**, Vorobiov, L. Y. (2016). Heat capacity measurement with simultaneous comparison with a reference sample by step scanning method. *Ukrainian Metrological Journal*, 4, 48-51. <https://doi.org/10.24027/2306-7039.4.2016.112784> (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> (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. https://doi.org/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. Patent UA121075, IPC G01K17/20, G01N25/20. Device for measuring the thermal resistance of enclosing structures / **Dekusha, O. L.**, Ivanov, S. O., Vorobiov, L. Y., Babak, V. P., Dekusha, L. V.; applicant and patent owner Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine; appl. 26.12.2018; publ. 25.03.2020. Bul. №6/2020. <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1421066/>

15. Patent UA123484, IPC G01J5/12. Device for measuring the coefficient of emissivity of materials / **Dekusha, O. L.**, Ivanov, S. O., Vorobiov, L. Y., Babak, V. P., Dekusha, L. V., Kobzar, S. H., Kovtun, S. I.; applicant and patent owner

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine; appl. 20.09.2019; publ. 08.04.2021. Bul. № 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. *CEUR Workshop Proceedings*, 3309, 301-313. <https://ceur-ws.org/Vol-3309/paper19.pdf> (**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).

Scientific works certifying the approval of the thesis materials:

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. *Proceedings of 2020 IEEE 40th*

International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 22-24, 2020. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 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. *Proceedings of 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering*, 8879847, 601-605. <https://doi.org/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. *Proceedings of 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, April 16-18, 2019. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 8783537, 301-304. <https://doi.org/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.

Scientific works that additionally reflect the scientific results of the thesis:

27. Babak, V. P., Berehun, V. S., Burova, Z. A., Vorobiov, L. Y., Dekusha, L. V., **Dekusha, O. L.**, Zaporozhets, A. O., Kovtun, S. I., Krasylnikov, O. I., Nazarenko, O. O., Polobiuk, T. A. (2016). *Hardware software for monitoring the objects of generation, transportation and consumption of thermal energy*. Kyiv:

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 298 p. (ISBN: 978-966-02-7967-4).

28. Grishchenko, T. G., Dekusha, L. V., Vorobiov, L. Y., **Dekusha, O. L.**, Burova, Z. A., Kovtun, S. I. (2018). *Thermometry: theory, metrology, practice. Thermometer equipment for solving applied problems*. Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2(3). (ISBN 978-966-02-8639-9).

29. Kovtun, S. I., Ivanov, S.O., Dekusha, L. V., **Dekusha, O. L.**, Vorobiov, L. Y. (2018). Instruments for measuring radiative heat transfer and insolation. *World Science*, 5, 7(35), 31-38. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/12072018/6038 (ISSN 2413-1032).

30. Babak, V. P., Vorobiov, L., Dekusha, L., Volkov, V., Burova, Z., **Dekusha, O.**, Kovtun, S. (2018). Measurement of Thermo-Radiation Characteristics of Spectral-Selective Materials for Space Structures Designs. *Traektoriâ Nauki*, 4(6), 1009-1019. <https://doi.org/10.22178/pos.35-2> (ISSN 2413-9009).

31. Kovtun, S. I., Vorobiov, L. Y., Dekusha, L. V., **Dekusha, O. L.**, Burova, Z. A. (2018). Thermometer technique for measuring the emissivity coefficient of materials and coatings. *World Science*, 6(34), 2, 21-26. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/12062018/5815 (ISSN 2413-1032).

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	30
ВСТУП.....	32
1 АНАЛІЗ СТАНУ І ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ КОНТРОЛЮ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ТА ТЕРМОРАДІАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ ТЕПЛОЗАХИСНОЇ ОБОЛОНКИ БУДІВЛІ	40
1.1 Аналіз підходів до теплотехнічного контролю якості теплоізоляції оболонки будівлі	40
1.2.1 Калориметричний метод визначення коефіцієнта теплопередавання	45
1.2.2 Метод тепловізійного контролю якості теплоізоляції огорожувальних конструкцій	48
1.2.3 Метод теплотехнічного обстеження огорожувальних конструкцій із застосуванням сенсорів теплового потоку	51
1.2.4 Апаратне забезпечення, що застосовують для контролю теплозахисної оболонки будівлі	55
1.3 Методи та прилади контролю коефіцієнта емісії матеріалів та покриттів.....	65
1.3.1 Методи контролю коефіцієнта емісії матеріалів та покриттів	65
1.3.2 Прилади контролю коефіцієнту емісії	77
1.4 Формулювання науково-прикладної проблеми та постановка завдань дослідження.....	83
1.5 Висновки до розділу.....	85
2. КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО КОНТРОЛЮ ТЕПЛОГОГО ОПОРУ ТЕПЛОЗАХИСНОЇ ОБОЛОНКИ БУДІВЛІ	88
2.1 Теоретико-практичний підхід до контролю теплового опору оболонки будівлі	88
2.2 Математична модель кліматичної компоненти атмосферного метеорологічного поля при контролі теплового опору.....	94
2.3 Комп'ютерна модель теплообміну в характерній зоні оболонки будівлі ..	98
2.4 Математична модель компенсації впливу зміни температури об'єкту контролю та коригування результатів вимірювання теплового потоку	107
2.5 Математична модель сенсорів теплового потоку з теплотехнічною корекцією	113

2.6 Висновки до розділу.....	114
РОЗДІЛ 3. МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЕМІСІЇ ПОВЕРХНІ ОБ'ЄКТУ КОНТРОЛЮ	117
3.1 Диференційно калориметричний метод експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів.....	117
3.2 Комп'ютерна модель процесів теплообміну в вимірювальній комірці приладу для контролю коефіцієнту емісії	119
3.2.1 Комп'ютерна модель процесів теплообміну при різних можливих варіантах розташування вимірювальної комірки приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів.....	129
3.2.2 Результати комп'ютерного моделювання теплообміну при диференціальному включенні комірок	139
3.3 Комп'ютерна CFD Модель процесів теплообміну приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів.....	141
3.3.1 Нестационарна комп'ютерна модель процесів теплообміну приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів	152
3.3.2 Комп'ютерна модель процесів теплообміну приладу експрес-контролю коефіцієнту емісії при дослідженні різних видів скла.....	153
3.4 Висновки до розділу.....	164
4 МЕТОДИЧНЕ ТА АПАРАТНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕПЛОВОГО ОПОРУ ОБОЛОНКИ БУДІВЛІ ТА ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ЕМІСІЇ.	166
4.1. Методика контролю теплового опору оболонки будівлі	166
4.2. Апаратно-програмна реалізація системи контролю теплового опору теплозахисної оболонки будівель	186
4.3 Апаратно-програмна реалізація приладу для визначення коефіцієнту емісії.....	197
4.4 Висновки до розділу.....	204
5. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО ПОТОКУ ПРИ КОНТРОЛІ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ОБОЛОНКИ БУДІВЛІ	205
5.1 Система реалізуюча радіаційний метод калібровки сенсорів теплового потоку та визначення терморадіаційних характеристик.....	205
5.3 Експериментальні дослідження різних типів сенсорів для використання при контролі теплового опору оболонки будівлі	218

5.4 Дослідження метрологічних характеристик системи контролю теплового опору оболонки будівлі	225
5.5 Висновки до розділу.....	231
6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕПЛООВОГО ОПОРУ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ ТА ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ЕМІСІЇ	233
6.1 Лабораторні випробування системи контролю теплового опору.....	233
6.2 Натурні випробування оболонки будівлі з використанням створеної системи контролю та розробленої методики.....	238
6.3. Експериментальні дослідження терморадіаційних характеристик покриттів та матеріалів для віконних конструкцій.	256
6.5 Висновки до розділу.....	259
Висновки.....	261
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	263
ДОДАТОК А	282
ДОДАТОК Б.....	300
ДОДАТОК В.....	303
ДОДАТОК Г	314

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

T – температура, К;

P – тиск, Па;

V – швидкість вітру, м/с;

H – вологість, %;

U_0 – напруга, В;

I_0 – напруга, В;

U – коефіцієнт теплопередавання Вт / (м²·К);

l_i – товщина i -го шару теплозахисної оболонки будівлі, м;

λ_i – теплопровідність i -го шару теплозахисної оболонки будівлі, Вт/(м·К);

ω – елементарна випадкова подія з простору подій Ω ;

q – густина теплового потоку крізь теплозахисну оболонку будівлі, Вт/м²;

R_c – теоретична величина теплового опору, (м²·К)/Вт;

K – коефіцієнт перетворення сенсору;

bT – швидкість зміни температури;

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

$c\rho$ – питома теплоємність сенсору, Дж/(кг·К);

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

ε – коефіцієнти емісії поверхонь;

σ – стала Стефана-Больцмана;

$\xi(\omega)$ – випадкова функція;

φ – ефективний кутовий коефіцієнт радіаційного теплообміну;

\vec{v} – векторна швидкість, м/с;

u, v, w – компоненти швидкості;

a – температуропровідність, м²/с;

ν – кінематична в'язкість, м²/с;

ρ – густина, кг/м³;

f – зовнішня питома сила, Н;

∇ – оператор Гамільтона;

Δ – оператор Лапласа;

α – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м²·К);

ref – відбивна здатність;

in – коефіцієнт пропускання;

cons – поглинання;

ι – довжина хвилі, м;

Rs – коефіцієнт відбиття;

ВСТУП

Актуальність роботи. 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.

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

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.

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 1–10 Вт/м² та наявності дрейфу температури, що дало змогу зменшити невизначеність результатів вимірювання густини теплового потоку.

Практична значимість результатів:

1. 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.

2. 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.

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

4. 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.

6. 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 напряму 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).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із анотації, вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел з 153 найменування, 4 додатки та містить 148 рисунків та 37 таблиць. Загальний обсяг роботи складає 317 сторінок.

1 АНАЛІЗ СТАНУ І ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ КОНТРОЛЮ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ТА ТЕРМОРАДІАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ ТЕПЛОЗАХИСНОЇ ОБОЛОНКИ БУДІВЛІ

1.1 Аналіз підходів до теплотехнічного контролю якості теплоізоляції оболонки будівлі

На сьогодні існує значна кількість методик по моніторингу теплового стану та тепловим випробуванням будівель різного призначення [1–12]. Переважна більшість методик теплотехнічного обстеження розглядає тільки питання обстеження будівельних конструкцій безпосередньо в натурних умовах. Це пов'язано з тим, що основним завданням натурних обстежень було визначення стану опорних та огороджувальних конструкцій досліджуваного об'єкту. Результатами таких робіт користувалися експлуатаційні служби для локалізації та ліквідації аварійного стану будівельних конструкцій.

Теплозахисні властивості огороджувальних конструкцій є ключовим фактором, від якого залежить кількість теплоти, що втрачається будинком у холодну пору року і надходить до нього в теплу. Це, в свою чергу, дає змогу визначити навантаження та вартість систем опалення або вентиляції та кондиціонування повітря, що впливає на сталість температурного режиму в приміщенні з часом при зміні температури, швидкості повітря зовні будинку, інтенсивності тепловіддачі системи опалення, температури на внутрішній поверхні огороджувальних конструкцій тощо [3].

Принципи нормування комплексу енергетичних параметрів будівель оснований на методології розгляду будівлі як єдиної енергетичної системи, що складається з теплоізоляційної оболонки та інженерних систем опалення, вентиляції, охолодження, кондиціонування, гарячого водопостачання, освітлення, які діють у взаємозв'язку між собою та оточуючим кліматичним середовищем [13]. При цьому у вітчизняну нормативну базу покладений

принцип забезпечення теплової надійності огорожувальних конструкцій будівлі та їх елементів [4].

В державних будівельних нормах ДБН В.2.6-31 [14] враховано розвиток конструктивних і технологічних засобів створення теплоізоляційної оболонки будинків, що застосовуються в практиці проектування і будівництва в останні роки.

Відповідно до цього у норми внесені такі принципові зміни:

- підвищено мінімальний рівень опору теплопередаванню крізь теплоізоляцію огорожувальних конструкцій житлових та громадських будинків у середньому на 15–40% для зовнішніх стін, на 20–25% для покриттів та на 20% для вікон;

- введено нормативи на опалення за показником максимально допустимих питомих тепловтрат будинку;

- введено принцип альтернативного проектування теплоізоляційної оболонки будинку за елементними показниками та за інтегральним питомих показником;

- підвищено вимоги до забезпечення показників теплового комфорту приміщень;

- введено вимоги щодо обов'язкової енергетичної паспортизації будинків при новому будівництві та реконструкції;

- введено вимоги до показників теплової надійності теплоізоляційної оболонки будинків.

Проектування відповідно до нормативних вимог, що встановлено в ДБН В.2.6-31[14], дозволяє:

- скоротити сумарні втрати теплоти при опаленні будинків. Це дозволить впритул наблизитися до нормативних вимог відносно до допустимих тепловтрат енергії на опалення будинків, що існують у країнах Європейського Союзу (далі – ЄС);

– значно підвищити якість проектування за результатами оцінювання фактичних значень теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій будинків і споруд;

підвищити рівень забезпечення нормативних санітарно-гігієнічних вимог до теплових показників приміщень будинків при їх експлуатації.

В цілому ДБН В.2.6-31[14] по своїй направленості та змісту відповідає вимогам, що встановлені в Директиві 2002/91/ЄС від 16.12.2002 р. Європейського Парламенту та Європейської Ради з енергетичної ефективності будинків [15] та прогресивним положенням норм інших країн.

Метою теплотехнічного контролю оболонки будівлі є виявлення їх фактичних теплозахисних властивостей та ступеню їх відповідності сучасним нормативним вимогам, які в останні роки суттєво змінилися в зв'язку з проблемами економії та раціонального використання енергоресурсів [4]. При визначенні теплотехнічних параметрів оболонки будівлі повинні бути встановлені:

– температурні поля на внутрішніх поверхнях огорожувальних конструкцій, на ділянках теплопровідних включень, вузлах примикання внутрішніх і зовнішніх стін, стикових з'єднаннях тощо, з метою виявлення зон з пониженою температурою, де можливе утворення конденсату на поверхні конструкції;

– характер зміни температурного поля та коефіцієнт термічної однорідності конструкції;

– тепловий опір конструкції, коефіцієнт теплообміну внутрішніх та зовнішніх поверхонь з прилеглим навколишнім середовищем та тепловий опір теплопередаванню крізь огорожувальних конструкцій;

– динаміка вологісного режиму конструкції в різні пори року, виявлення можливої зони конденсації вологи та ступінь вологонакопичення в холодну пору року, визначення вологісного стану стикових з'єднань;

– повітропроникність огорожувальних конструкцій.

Теплотехнічне обстеження огороджувальних конструкцій може бути здійснене як у лабораторних умовах на спеціальних стаціонарних стендах, так і в натурних умовах за допомогою портативних засобів вимірювальної техніки. За роки незалежності були розроблені національні стандарти України, європейські (EN) та міжнародні (ISO) стандарти, що стосуються методів визначення теплофізичних характеристик теплоізоляційних будівельних матеріалів та виробів. Тому на даний час чинними є національні стандарти, що мають статус міжнародних в галузі будівництва, які стосуються теплофізичних властивостей і методів їх визначання та випробувань.

Зокрема, набули чинності національні стандарти, що гармонізовані з EN та ISO, а саме: ДСТУ ISO 8301 [16], ДСТУ ISO 8302 [17], ДСТУ ISO 9869 [18], ДСТУ ISO 6946 [19], ДСТУ ISO 10051 [20], ДСТУ ISO 14683 [21], ДСТУ ISO 10211-1 [22], ДСТУ ISO 10211-2 [23], ДСТУ ISO 10291 [24], ДСТУ EN673 [25].

1.2 Стандартні методи визначення теплотехнічних параметрів оболонки будівлі

В Державних будівельних нормах ДБН В.2.6 31 встановлені вимоги до теплотехнічних показників огороджувальних конструкцій (теплоізоляційної оболонки) будинків і споруд та порядку їх розрахунку з метою забезпечення раціонального використання енергетичних ресурсів на обігрівання, забезпечення нормативних санітарно-гігієнічних параметрів мікроклімату приміщень та довговічності огороджувальних конструкцій під час експлуатації будинків і споруд [14].

Положення та вимоги цих норм є обов'язковими. Ними користуються при проектуванні будівель і споруд, що опалюються, при новому будівництві, реконструкції й капітальному ремонті (термомодернізації), при складанні енергетичного паспорту, визначені витрат паливно-енергетичних ресурсів на опалення розрахунково-аналітичним методом та при проведенні теплотехнічного обстеження будівель та споруд. Фактичні ж значення теплотехнічних показників теплоізоляційної оболонки будівель можна визначити тільки експериментально при теплотехнічному обстеженні

будівель (споруд), проводячи певний цикл вимірювань таких теплофізичних величин, як температура обстежуваних поверхонь огорожувальних конструкцій й повітря з обох боків огорожувальних конструкцій та поверхнева густина теплового потоку крізь огорожувальні конструкції. За результатами цих вимірювань обчислюють тепловий опір огорожувальних конструкцій, опір теплопередаванню крізь огорожувальні конструкції та, за потреби, фактичні значення трансмісійних теплових втрат будівлі чи споруди.

Теплові випробування огорожувальних конструкцій будівель і споруд з метою визначення теплозахисних властивостей теплоізоляційної оболонки будинку здійснюють у лабораторних або натурних умовах.

Для проведення випробувань у лабораторних умовах при розміщенні досліджуваної огорожувальної конструкції або її дослідного зразка застосовують комплекс випробувального устаткування, яке встановлюють в кліматичній камері, при цьому по обидва боки огорожувальних конструкцій штучно створюють температурно-вологісні режими з параметрами, близькими до розрахункових зимових умов експлуатації огорожувальних конструкцій.

Порядок відбирання дослідних зразків для теплових випробувань та їх кількість вказано у певних стандартах або технічних умовах на конкретну огорожувальну конструкцію. При відсутності в цих документах вказівок про кількість дослідних зразків для випробування слід відбирати не менше двох однотипних зразків.

Під час випробування огорожувальних конструкцій в кліматичній камері стики та інші види з'єднання огорожувальних конструкцій або їх фрагментів між собою виконують відповідно до проектної документації. Огорожувальні конструкції з прорізами випробують як із заповненням прорізів віконними та дверними блоками, так і з імітацією цього заповнення утеплювачем, який, відповідно, має таке ж значення теплового опору.

В разі випробування фрагменту або окремого елемента огорожувальних конструкцій їх довжина і ширина повинні бути не менше ніж

чотири товщини виробу, але габарити зразка повинні бути не менше ніж 1500×1500 мм.

Теплотехнічні випробування огорожувальних конструкцій у натурних умовах проводять у пори року, коли існує такий самий температурний режим, за якого температурний напір між внутрішнім і зовнішнім повітрям не менший ніж 15 К.

Для дослідження у натурних умовах, як правило, вибирають зовнішні стіни кутових приміщень на першому поверсі, що орієнтовані на північ, північний схід, а також на інші сторони світу, де є найбільш складні умови для даної місцевості, наприклад, переважні вітри та косі дощі, та на іншому поверсі. Для випробувань вибирають не менше двох однотипних огорожувальних конструкцій в приміщеннях з однаковими температурно-вологими умовами.

Теплотехнічне обстеження будинку починається з його візуального огляду та дослідження показників повітряного навколишнього середовища з обох боків обстежуваної огорожувальної конструкції. До основних показників навколишнього середовища відносять температуру та вологість повітря, атмосферний тиск й швидкість руху повітря. Ці вимірювання є стандартними для обстежень огорожувальних конструкцій у натурних умовах будь-яким методом.

Визначення теплового опору та опору теплопередаванню обстежуваних огорожувальних конструкцій виконують за результатами вимірювань температури і густини теплового потоку у попередньо намічених представницьких зонах, які мають різні характерні ділянки, термічно однорідні та аномальні. Визначення потрібних зон і ділянок здійснюють за результатами попереднього обстеження температурних полів поверхонь огорожувальних конструкцій будівлі безконтактним методом.

1.2.1 Калориметричний метод визначення коефіцієнта теплопередавання

Калориметричний метод дослідження будівельних елементів застосовують для визначення коефіцієнта теплопередавання огорожувальних

конструкцій переважно в лабораторних і, як виняток, у натурних умовах з метою підтвердження відповідності його фактичного значення чинним нормам.

На відміну від методу гарячого ящика (Hot Box Method)[26], який переважно використовується за кордоном для визначення коефіцієнта теплопередавання світлопрозорих конструкцій [27] метод, покладений в основу стандарту ДСТУ-Н Б В.2.6-101:2010 [1] є універсальним і дозволяє проводити дослідження всіх типів огороджувальних конструкцій в лабораторних та натурних умовах. Метод вимірювань за цим стандартом дозволяє визначати усереднений тепловий потік, що проходить крізь поверхню ділянки огороджувальної конструкції, всередині якої можуть бути розміщені теплопровідні включення, що порушують термічну однорідність огороджувальної конструкції.

Метод вимірювань за цим стандартом дозволяє визначати усереднений тепловий потік, що проходить крізь поверхню ділянки огороджувальної конструкції, всередині якої можуть бути розміщені теплопровідні включення, що порушують термічну однорідність огороджувальної конструкції.

Метод передбачає, що досліджувана огороджувальна конструкція перебуває в усталеному стані. Така вимога може бути дотримана тільки в лабораторних умовах. В натурних умовах для проведення випробувань необхідно обрати таку пору року, коли мають місце умови квазістаціонарного теплопередавання. У цьому разі при великій кількості вимірювань та відносно довгій тривалості експерименту, що залежить від теплової інерції огороджувальних конструкцій, отримують результати, які є близькими до умов усталеного теплового стану.

За отриманими результатами вимірювання температури повітря навколишнього середовища по обидва боки огороджувальних конструкцій ($T_{НС.ВН}$ і $T_{НС.ЗОВ}$) на відстані не менше ніж 100 мм від поверхонь огороджувальних конструкцій, і усередненої по площі поверхні досліджуваної огороджувальної конструкції, густини теплового потоку (q) обчислюють

коефіцієнт теплопередавання (U) і опір теплопередаванню огорожувальних конструкцій (R_{Σ}) за формулами [1]:

$$U = q / (T_{\text{НС.ВН.}} - T_{\text{НС.ЗОВ.}}), \quad (1.1)$$

$$R_{\Sigma} = 1/U, \quad (1.2)$$

при цьому густину теплового потоку визначають за витратою теплової енергії, яка виділяється електронагрівником, розміщеним в спеціальному приладі [1].

Усереднена по поверхні обстежуваного зразка густина теплового потоку визначається при настанні усталеного режиму за умови однаковості значень температури поверхонь стінок камери приладу. Її значення обчислюють за формулою [1]:

$$q = (\bar{U}_o \cdot \bar{I}_o) / A - (\bar{T}_{\text{СТ.ВН.}} - \bar{T}_{\text{СТ.ЗОВ.}}) / R_{\text{СТ}}, \quad (1.3)$$

де \bar{U}_o і \bar{I}_o – середні значення напруги та сили струму, що подаються на електронагрівник;

A – площа відкритого отвору камери;

$\bar{T}_{\text{СТ.ВН.}}$ і $\bar{T}_{\text{СТ.ЗОВ.}}$ – середні значення температури внутрішньої та зовнішньої поверхонь приладу;

$R_{\text{СТ}}$ – тепловий опір стінок приладу, визначений за формулою:

$$R_{\text{СТ}} = l_{\text{УТ}} / \lambda_{\text{УТ}} + l_{\text{СТ}} / \lambda_{\text{СТ}}, \quad (1.4)$$

де l і λ – товщина й коефіцієнт теплопровідності відповідно до індексу: «ут» – утеплювача стінок та «ст» – матеріалу стінок камери [1].

З урахуванням даних, отриманих за формулами (1.3) і (1.4), обчислюють за формулами (1.1) і (1.2) теплозахисні характеристики досліджуваного будівельного елемента.

Для визначення коефіцієнта теплопередавання U або опору теплопередавання R_{Σ} в лабораторних умовах досліджуваний зразок огорожувальної конструкції з приладом, встановлюють між теплим і холодним відсіками кліматичної камери. Після ретельної перевірки працездатності обладнання та вимірювальних приладів, теплі та холодні камери кліматичної установки герметично ізолюють від зовнішнього

середовища за допомогою спеціальних дверей. Включають охолоджувальне та нагрівальне устаткування кліматичної камери, за допомогою регулювальної апаратури встановлюють потрібну температуру у відсіках та виконують випробування згідно з вимогами стандарту [1] створюючи тепловий режим і з застосуванням приладів вимірювання.

До основного недоліку цієї методики в разі її використання в натурних умовах слід віднести обмеженість випробувань ділянками, на які є можливість встановити камеру приладу, що звужує коло можливостей досліджень складних за геометричною формою елементів оболонки будівлі.

У разі застосування цієї методики усереднені значення густини теплового потоку визначають з невизначеністю $\pm 5\%$ при випробуваннях у кліматичній камері, та $\pm 15\%$ – для натурних умов.

1.2.2 Метод тепловізійного контролю якості теплоізоляції огорожувальних конструкцій

Тепловізійний контроль зарекомендував себе як один із основних способів обстеження стану одно- та багатошарових огорожувальних конструкцій будівель та споруд в натурних умовах після закінчення будівництва та в період експлуатації завдяки швидкості отримання результатів [28]. Цей метод дозволяє виявити недоліки теплозахисту огорожувальних конструкцій, які виникають внаслідок порушення технології виготовлення будівельних матеріалів, будівництва споруд, режиму експлуатації тощо.

Цим методом легко визначати місця та розміри ділянок, які потребують ремонту з метою відновлення необхідних теплозахисних властивостей.

Переваги тепловізійного методу сприяють використанню у якості якісного аналізу теплозахисної оболонки будівлі [29-36].

Тепловізійний метод засновано на дистанційному визначенні тепловізором температури поверхонь огорожувальних конструкцій, між внутрішньою та зовнішньою поверхнями якої існує температурний перепад, з подальшим обчисленням відносного опору теплопередаванню крізь обстежувані ділянки огорожувальних конструкцій. Відносний опір

теплопередаванню, визначається як відношення прогнозованого значення опору теплопередаванню до його проектного значення. Відносний опір теплопередаванню, а також температура внутрішньої поверхні згідно з цим стандартом прийняті за показники якості теплозахисних властивостей огороджувальних конструкцій [29-32].

Тепловізійні вимірювання проводять при за відсутності атмосферних опадів, туману, задимленості тощо. Обстежувані поверхні не повинні знаходитись в зоні прямого або відбитого сонячного випромінювання впродовж 12 год до проведення вимірювань. Вимірювання не потрібно робити, якщо значення інтегрального коефіцієнта випромінення поверхні об'єкта становить менше 0,7 [34-36].

Місця встановлення тепловізора обирають таким чином, щоб поверхня об'єкту дослідження знаходилась в прямій видимості під кутом спостереження не менше ніж 60° [29-32].

Тепловізори мають висвітлення на екрані ізотермічних поверхонь та вимірювання вихідного сигналу, значення якого функціонально пов'язано з вимірюваною температурою поверхні. За оглядовою термограмою зовнішньої поверхні будинку виявляють ділянки з відхиленнями значень температури, тобто з іншими теплозахисними властивостями. Використовуючи геометричні характеристики за термограмами визначають лінійні розміри характерних ділянок, зокрема, дефектних [29-32].

Основними дефектами, що виявляють за допомогою тепловізійного контролю є [31-33]:

- місця протікання води та повітря;
- «містки» перетікання теплоти внаслідок погіршення опору теплопередаванню;
- дефекти панелей;
- відшаровані ділянки штукатурки, облицювання та інших покриттів.

Сучасні тепловізійні системи дозволяють швидко і точно виявляти дефектні ділянки та визначати їх межі. Кількісну оцінку виявлених дефектів

проводять в лабораторних умовах з використанням математичного апарату або відповідного програмного забезпечення.

Виявлення прихованих дефектів базується на використанні принципу порівняння досліджуваної зони контролю з характерною бездефектною ділянкою. Класифікацію виявлених теплових аномалій проводить оператор на основі свого досвіду та існуючих критеріїв [31-33]. Таким чином, при якісному оцінюванні теплових аномалій важливим фактором є відомості про тепловий режим будівлі, досвід оператора, точність та чутливість тепловізора [29-32].

Інфрачервону зйомку потрібно доповнювати візуальним оглядом та фотографуванням. Видиме та інфрачервоне зображення, як правило, не співпадають за текстурою. Оцінювання теплових аномалій потрібно проводити як за температурним перепадом в зоні аномалії, так і порівнянням з еталонною зоною. Еталонна зона повинна обиратись аналогічно обстежуваній та знаходитись в однакових умовах теплообміну [31,32].

При інших однакових умовах огляд всередині приміщення є ефективнішим за зовнішній огляд, оскільки при цьому температурний перепад в зоні однієї і тієї ж теплової аномалії є більшим на внутрішній поверхні. Крім того, ряд дефектів, що виявлені зсередини, не завжди можуть бути виявлені ззовні [31,32]. Теплові аномалії відображаються на термограмах у вигляді зон з підвищеною або пониженою температурою та можуть відповідати архітектурним деталям, неоднорідностям коефіцієнту випромінення, неоднорідностям теплообміну з навколишнім середовищем та різного роду дефектам [29-32]. Крім того при аналізуванні та при вимірюванні опору теплопередаванню треба враховувати відмінність температури в різних кімнатах будинку [31-33].

Кількісне оцінювання теплових аномалій виконують з метою оцінки впливу на тепловтрати теплозахисної оболонки будівлі.

Недоліком такого методу є те, що тепловізійне обстеження не дозволяє отримувати достовірні кількісні оцінки опору теплопередаванню огорожувальних конструкцій.

1.2.3 Метод теплотехнічного обстеження огорожувальних конструкцій із застосуванням сенсорів теплового потоку

Найбільш адаптованим до неруйнівного контролю зі стандартизованих методів обстеження будівельних об'єктів є метод, заснований на безпосередніх прямих вимірюваннях поверхневої густини теплового потоку, що проходить крізь обстежувану поверхню огорожувальних конструкцій, контактними сенсорами теплового потоку [30, 37]. При цьому, одночасно вимірюють значення температури на обох поверхнях огорожувальних конструкцій і температуру повітря з обох боків огорожувальних конструкцій, а потім на підставі отриманих даних розраховують тепловий опір та опір теплопередаванню огорожувальних конструкцій [30, 37]. При наявності в огорожувальних конструкціях зон з різними теплотехнічними характеристиками визначають значення приведенного опору теплопередаванню з урахуванням площі різнорідних зон.

Створений державний стандарт України ДСТУ 4035-2001 [7,18], стосується методів вимірювання поверхневої густини сумарного теплового потоку крізь огорожувальні конструкції за допомогою сенсорів теплового потоку і сенсорів температури.

Крім того, в стандарті, ґрунтуючись на аналізі експериментальних результатів досліджень та аналізу процесу складного теплообміну [38-45] між поверхнею огорожувальних конструкцій та навколишнього середовища, наведено методику отримання дійсного значення поверхневої густини сумарного теплового потоку за результатами вимірювання за допомогою сенсорів теплового потоку. При цьому наведені два варіанти методики вимірювання: при відсутності додаткових джерел теплового випромінювання (радіатори, випромінювачі, потужні світильники, працююче енергетичне обладнання тощо) та при їх наявності. Кожен з цих двох випадків описано своїм рівнянням теплового балансу, що відповідно призвело до різних розрахункових формул та алгоритмів обчислення шуканих величин [38-42].

Невизначеності вимірювання поверхневої густини теплового потоку із застосуванням сенсорів теплового потоку виду допоміжної стінки розглянуто у [46]. В Україні даний тип сенсорів теплового потоку є найбільш розповсюдженим засобом вимірювання завдяки високій стабільності технічних характеристик, простій процедурі вимірювання та опрацювання сигналу, зручності експлуатації та можливості широкого варіювання значеннями основних характеристик при виготовленні [46].

На основі попередніх розробок створено спеціалізовані прилади для вимірювання густини теплового потоку [47 – 58].

Для визначення опору теплопередаванню в лабораторних умовах з використанням кліматичних камер сформульовано вимоги до умов підготування та проведення відповідних вимірювань сенсорами температури і теплового потоку, правил відбирання та підготування дослідних зразків, а також надано перелік потрібного обладнання та засобів вимірювальної техніки.

Метод теплотехнічного обстеження огорожувальних конструкцій із застосуванням контактних сенсорів теплового потоку та температури застосовують як при лабораторних, так і при натурних випробуваннях. При загальній схожості цих видів досліджень існує суттєва методична різниця між ними – лабораторні випробування проходять у кліматичній камері, в якій підтримуються досить стабільні температурні умови та умови теплообміну з обох боків огорожувальних конструкцій, а в натурних умовах температура зовнішнього повітря та умови теплообміну змінюється внаслідок змін погоди і добового циклу [58]. Тому при лабораторних випробуваннях зазвичай достатньо кількох годин вимірювань після настання теплового стаціонарного режиму в конструкції, а в натурних умовах на результати вимірювань значно впливають змінні умови теплообміну, ефекти акумуляції теплоти в конструкції тощо, тому для отримання достовірних результатів необхідно проводити довготривалі вимірювання з подальшим усередненням результатів. Крім того, в натурних умовах зазвичай необхідно оцінювати теплозахисні

властивості всієї будівлі, яка має багато різноманітних елементів конструкції теплової оболонки. При цьому вимірювання необхідно проводити у багатьох зонах, віддалених одна від одної. У міжнародному стандарті ISO 9869, з котрим був гармонізований національний стандарт ДСТУ ISO 9869 [18], рекомендовано наступне:

а) для легких елементів, що мають питому теплоємність на одиницю площі менше $20 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, слід проводити аналіз лише даних, отриманих уночі (за одну годину після заходу і до сходу сонця), щоб уникнути впливу сонячного випромінення. Випробування можна завершити якщо результати, отримані послідовно протягом трьох ночей, не відрізняються більше ніж на $\pm 5\%$. У іншому разі його треба продовжувати [18];

б) для більш масивних елементів, що мають питому теплоємність на одиницю площі понад $20 \text{ кДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, аналізування має бути проведено за період, кратний 24 год. Випробування повинно закінчуватися лише в разі виконання таких умов [18]:

- тривалість випробування перевищує 72 год.;
- значення теплового опору не відрізняється більше ніж на $\pm 5\%$ від значення, отриманого за 24 год. до цього;
- значення теплового опору, отримане за аналізом даних за перший період часу протягом $\text{INT}(2 \times D_T / 3)$ діб не відхиляється більше ніж на $\pm 5\%$ від значень, отриманих з даних за останній період часу такої самої тривалості (D_T – тривалість випробування, діб; INT – ціла частина числа);
- якщо зміна теплоти, акумульованої в стіні, перевищує більше ніж на $\pm 5\%$ кількість теплоти, що проходить крізь стіну під час випробувань, то треба застосовувати один з методів корекції результатів обчислень, наданих у стандарті [18].

Невизначеність вимірювання теплового опору оболонки будівлі, згідно з стандартом ISO 9869 [18] залежить від:

- невизначеності калібрування сенсора теплового потоку та температурних сенсорів. Невизначеність становить близько 5%, якщо ці прилади відкалібровані відповідно до вимог стандарту [18];

- точності системи реєстрації даних [18];

- випадкових відхилень, спричинених відмінностями теплового контакту між сенсорами та поверхнею. Це відхилення становить близько 5% від середнього значення, якщо сенсори встановлені ретельно [18];

- експлуатаційної невизначеності сенсора теплового потоку через зміну ізотерм яка виникає в місці встановлення сенсору. Ця невизначеність становить близько 2–3% [18];

- невизначеності, спричиненої змінами температури та теплового потоку з часом. Такі невизначеності можуть бути дуже великими і становити до $\pm 10\%$ від виміряного значення. Цей внесок можна зменшити шляхом запису даних впродовж тривалого періоду часу, зменшенням коливань внутрішньої температури до мінімуму та використанням динамічного методу інтерпретації [18];

Відповідно до стандарту ISO 9869 [18], при врахуванні зазначених факторів, невизначеність буде знаходитись в діапазоні між квадратурною (1.5) та арифметичною (1.6) сумами:

$$(\sqrt{5^2 + 5^2 + 3^2 + 10^2 + 5^2}) = 14\% \quad (1.5)$$

та

$$(5 + 5 + 3 + 10 + 5)\% = 28\% \quad (1.6)$$

Відповідно до вимог стандарту запропоновано метод визначення опору теплопередаванню огорожувальних конструкцій в натурних умовах [59, 60], який полягає в тому, що впродовж 6–7 діб реєструють температуру повітря ззовні та всередині приміщення, а потім проводять одне вимірювання теплового потоку та температури на внутрішній поверхні огорожувальних конструкцій. Вважають, що за проміжок часу у сім діб, коли реєстрували

значення температури навколишнього середовища, розподіл температури по товщині всередині огорожувальних конструкцій та тепловий потік на поверхні практично не будуть залежними від початкового поля температури. Виходячи з цього, на підставі отриманих результатів, прийнятої теплофізичної моделі огорожувальних конструкцій та вирішення зворотної задачі теплопровідності розраховують значення опору теплопередаванню огорожувальних конструкцій [38-42].

Перевагою запропонованого методу є те, що в ній запропоновано поєднати тепловізійні дослідження, що дають порівняльний якісний результат, з контактними вимірюваннями, які дозволяють отримати кількісні результати обстеження огорожувальних конструкцій [38-42].

Однак, необхідно зазначити, що прийнята теплофізична модель огорожувальних конструкцій може суттєво відрізнятись від параметрів реальної конструкції, а неконтрольована зміна коефіцієнтів теплообміну та сонячне випромінення також впливають на розподіл поверхневих теплових полів. Тому такий метод вимірювань у деяких випадках може призводити до великих похибок при визначенні опору теплопередаванню, про що свідчать результати наведені в публікаціях [38-42].

1.2.4 Апаратне забезпечення, що застосовують для контролю теплозахисної оболонки будівлі

Експериментальне визначення теплотехнічних параметрів огорожувальних конструкцій здійснюють шляхом її теплового випробовування, яке виконують у лабораторних або натурних умовах. Для визначення опору теплопередаванню огорожувальних конструкцій у лабораторних умовах використовують засоби вимірювання, що утворюють два відсіки: теплий та холодний, між якими розміщують об'єкт дослідження.

Як випробувальне устаткування згідно з ДСТУ БВ.2.6-101 [1] можна застосовувати кліматичні камери різних конструкцій: стаціонарну камеру для випробовування різноманітних огорожувальних конструкцій та їх фрагментів, схема якої наведена на рис. 1.1, чи менш габаритну кліматичну камеру з приставним

теплим відсіком (рис. 1.2) або інші випробувальні установки, що можуть забезпечити з двох боків дослідного зразка необхідні температурно-вологісні умови. Наприклад, пересувна випробувальна камера ТОВ «Альтавір» (Україна) (рис. 1.3) [61], малогабаритна пересувна кліматична установка «ІТС-3» (рис. 1.4), яку розроблено в ІТТФ НАН України [62]. Кліматичні камери призначені для теплових випробувань склопакетів, що вироблені за різними конструкціями та технологіями, з метою контролю якості їх виготовлення та дослідження їх теплового опору та опору теплопередаванню.

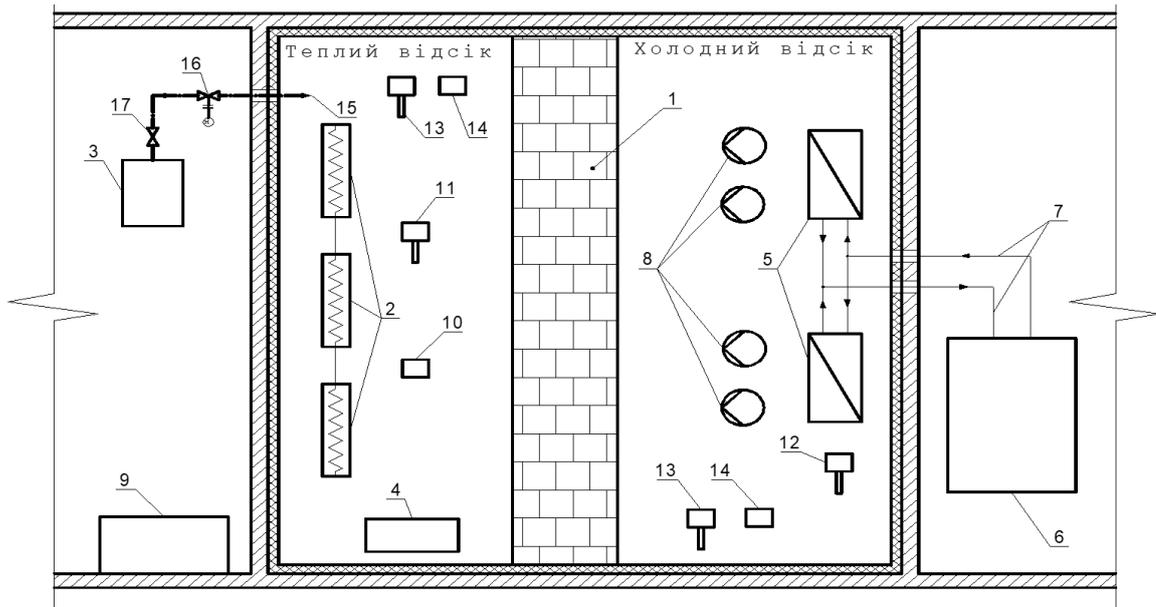


Рисунок 1.1 – Схема кліматичної камери для теплових випробувань огорджувальних конструкцій [1]: 1 – зразок; 2 – нагрівники; 3 – парозволожувач; 4 – кондиціонер; 5 – охолоджувальні батареї; 6 – холодильне обладнання; 7 – трубопроводи холодоагенту; 8 – вентилятор; 9 – система автоматичного збирання даних; 10 – сенсор регулювання вологості повітря теплового відсіку; 11 – сенсор регулювання температури повітря теплового відсіку; 12 – сенсор регулювання температури повітря холодного відсіку; 13 – сенсор температури; 14 – сенсор вологості; 15 – паропровід; 16 – регулювальний клапан; 17 – запірний клапан.

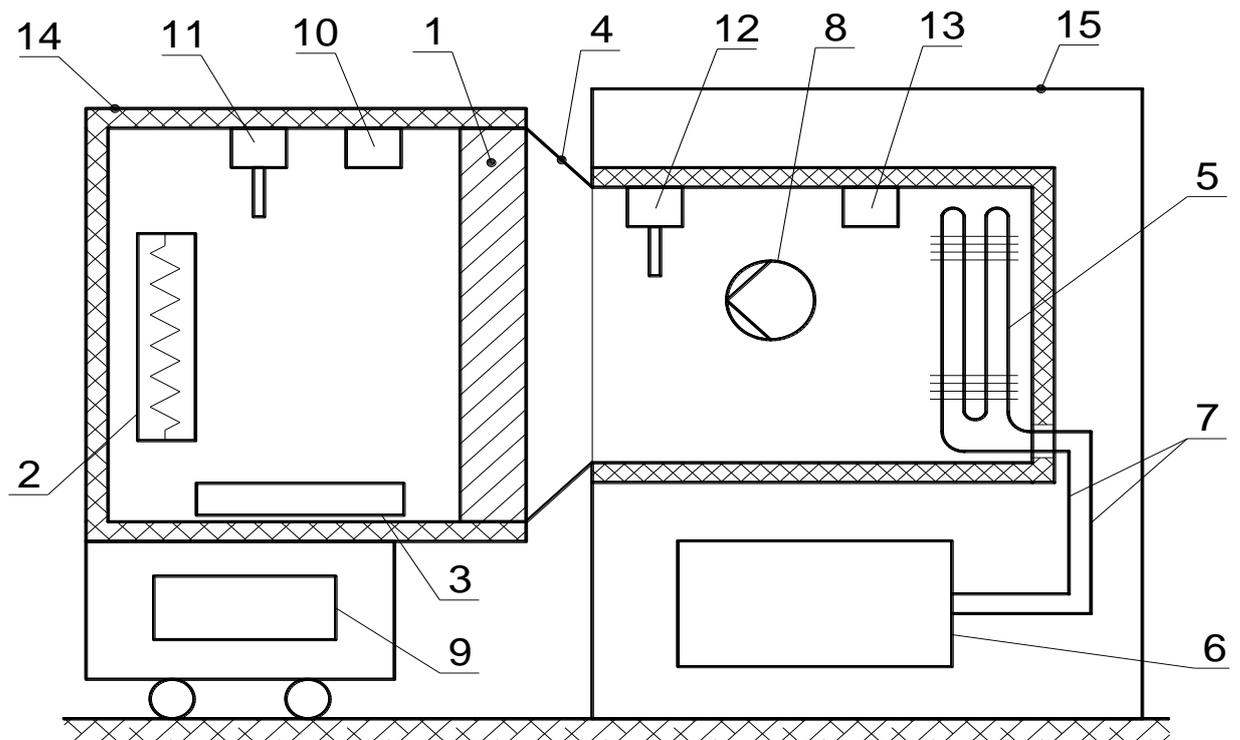


Рисунок. 1.2 – Схема кліматичної камери з приставним теплим відсіком [1]: 1 – зразок; 2 – нагрівники; 3 – посудина з розчином для підтримання вологості; 4 – перехідна діафрагма; 5 – випарник; 6 – холодильне обладнання; 7 – трубопроводи холодоагенту; 8 – вентилятор; 9 – система автоматичного збирання даних та регулювання; 10 – сенсор контролю вологості повітря в приставному теплому відсіку; 11 – сенсор контролю та регулювання температури повітря в приставному теплому відсіку; 12 – сенсор контролю та регулювання температури повітря в робочому об’ємі кліматичної камери; 13 – сенсор контролю та регулювання вологості в робочому об’ємі кліматичної камери; 14 – приставний теплий відсік; 15 – кліматична камера.



Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд кліматичної камери ТОВ «Альтавір» (Україна) [61]

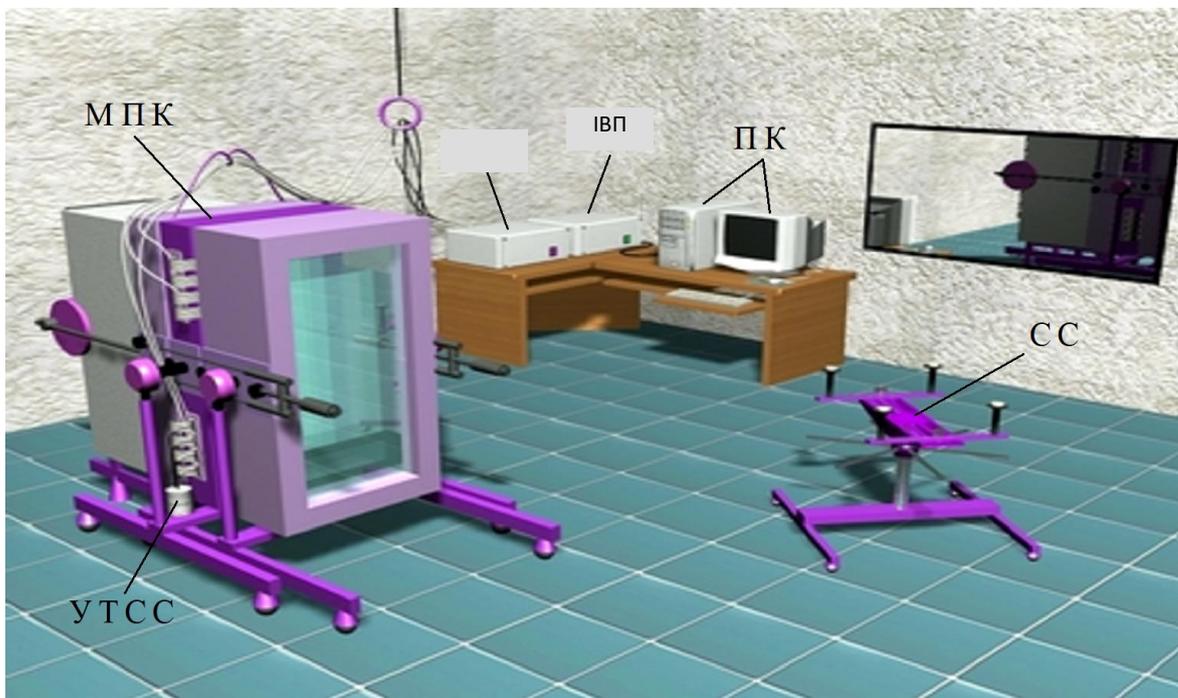


Рисунок 1.4 – Зовнішній вигляд малогабаритної пересувної кліматичної камери для теплових випробувань склопакетів [62]: МПК – малогабаритна пересувна камера; БЕР – блок електронних регуляторів; ІВП – інформаційно-вимірний пристрій; ПК – персональний комп'ютер; СС – сервісний стіл

Необхідне устаткування кліматичної камери:

- компресори або компресорно-конденсаторні агрегати холодильних машин, які встановлюють поза камерою, та охолоджувальні батареї холодильних установок, які встановлюють у холодному відсіку для забезпечення температури, що є типовою для зимових умов експлуатації огороджувальних конструкцій [1,62];

- система регулювання температури повітря у холодному відсіку, що складається з первинного перетворювача температури, регулятора та механізму, що виконує автоматичне підтримування потрібного значення температури з похибкою не більше ніж $\pm 1\text{K}$, і вентиляторів, які здійснюють рівномірне подавання холодного повітря від охолоджувальних батарей для забезпечення у холодному відсіку розрахункового значення коефіцієнта теплообміну на рівні $23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, яке повинно бути однаковим по всій поверхні дослідного зразка, а також [1,62]:

- система регулювання температури та вологості повітря в теплому відсіку, що складається з первинних перетворювачів температури та вологості повітря,

- регулятори температури та вологості, а також електронагрівники, терморадіатори, електровентилятори для нагрівання повітря та електропарозволожувачів для зволоження повітря, або кондиціонери.

Невизначеність автоматичного підтримування заданого значення температури у теплому відсіку повинна бути не більше ніж $\pm 1 \text{ К}$, вологості – не більше $\pm 5 \%$ [1,62].

Для реалізації вимірювань кліматичні камери мають бути оснащені комплексом певних засобів вимірювальної техніки [1]. Для визначення параметрів оточуючого середовища по обидва боки досліджуваного зразка застосовують: метрологічні скляні термометри для разових вимірювань температури повітря і тижневі термографи для її реєстрації протягом кількох діб, гігрографи для вимірювання відносної вологості повітря, психрометри для одночасного вимірювання температури та відносної вологості повітря та

анемометри для контролю середньої швидкості повітряного потоку, що омиває дослідний зразок та не перевищує 5 м/с.

Для якісного визначення термічно однорідних зон на поверхні дослідного зразка, а також для попереднього вимірювання поверхневої температури досліджуваного зразка огорожувальної конструкції або цілої огорожувальної конструкції, які виконують безконтактним способом, потрібен тепловізор або пірометр. Для контактних вимірювань застосовують комплект вимірювальних сенсорів температури поверхонь дослідного зразка в теплому та холодному відсіках камери, та густини теплового потоку крізь нього, а також вторинну систему [1].

Контроль значень теплового опору огорожувальних конструкцій теплозахисної оболонки будівлі, що експлуатуються або повністю підготовлені до прийняття в експлуатацію після завершення будівництва, капітального ремонту або термомодернізації, можливий тільки у натурних умовах.

Теплові випробування в умовах експлуатації мають цілу низку особливостей. Основна з них – їх виконують у період, коли забезпечується мінімально-необхідний температурний режим. Тобто випробування здійснюють в осінньо-зимово-весняні пори року. Випробування в літній сезон можливі при штучному підігріванні повітря в середині приміщення або охолодженні підсиленою вентиляцією, що на практиці майже не застосовується.

Визначення теплового опору та опору теплопередаванню виконують за результатами вимірювань температури поверхні та повітря, а також поверхневої густини теплового потоку через попередньо встановлені представницькі зони, які мають набори неоднакових характерних ділянок. Серед цих ділянок намічають базові (бездефектні термічно однорідні) та аномальні (з виявленими температурними відхиленнями). Встановлення зон і ділянок, необхідних для виконання вимірювань, здійснюють за результатами

попереднього обстеження температурних полів поверхонь безконтактним (неруйнівним) методом [38-42].

До складу засобів вимірювальної техніки, що застосовують для вимірювань теплотехнічних показників у натурних умовах, входять засоби безконтактного обстеження температурного поля поверхонь огорожувальних конструкцій, вимірювання показників навколишнього середовища (температури, вологості і тиску повітря та його швидкості) у безпосередній близькості до огорожувальних конструкцій, лінійних і кутових розмірів огорожувальних конструкцій та окремих її ділянок, комплект засобів для вимірювання фактичних значень температури та поверхневої густини теплового потоку, емісії обстежуваних поверхонь, коефіцієнтів теплообміну огорожувальних конструкцій з навколишнього середовища по обидва боки огорожувальних конструкцій, відносної вологості матеріалів огорожувальних конструкцій, а також система комп'ютеризації натурних вимірювань і допоміжне обладнання [1, 38-42].

Теплотехнічне обстеження будинку починається з його візуального огляду та визначення показників навколишнього середовища з обох сторін обстежуваних огорожувальних конструкцій. Для вимірювання показників навколишнього середовища існують стандартні прилади, перелік яких наведено у відповідних нормативних документах.

Попереднє обстеження температурних полів поверхонь огорожувальних конструкцій в умовах експлуатації будинку проводять безконтактним методом із застосуванням тепловізора або пірометра [63- 66]. Тепловізор являє собою спеціалізований вимірювальний пристрій для діагностування розподілу температури на обстежуваній поверхні в інфрачервоній ділянці спектру [33,34, 36,66, 67].

Інфрачервоне випромінювання, що реєструє тепловізор, та яке схематично показано на рисунку 1.5, має три складові: власне випромінювання об'єкта вимірювання, відбивне зовнішнє випромінювання та випромінювання, яке досліджуваний об'єкт пропускає крізь себе.



Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд тепловізора [68]

Для цілей термографування чим менше коефіцієнт випромінення, тим більше рівень відбивного випромінення і складніше точне вимірювання температури об'єкта. У цьому разі найважливішим стає правильне налаштування компенсації відбивного випромінення. [33, 34, 36] Проте застосування тепловізора відкриває шлях до визначення температурних полів неруйнівним методом та дає можливість оперативно, за кілька годин, провести натурне обстеження будівельного об'єкту та виявити представницькі зони, де у подальшому необхідно виконувати контактні вимірювання значень поверхневої температури та густини теплового потоку [33, 34, 36].

Крім тепловізора (або пірометра) для виконання вимірювань при повному обстеженні теплозахисної оболонки будівлі треба мати ще комплект контактних вимірювальних сенсорів температури та вологості повітря поблизу огорожувальних конструкцій з обох боків та поверхневої густини теплового потоку крізь дослідний зразок і вимірювальну апаратуру [18,38,39].

В ролі вторинної вимірювальної апаратури, що працює з сенсорами температури та теплового потоку, аналого-цифрові перетворювачі(АЦП), мілівольтметри, а з термометрами опору – потенціометри постійного струму та інші прилади для реєстрації та відображення інформації від сенсорів температури і сенсори теплового потоку, які забезпечують потрібну точність вимірювання [18, 39-41]. Крім того, застосовують комутатори вимірювальних сигналів або комутаційні шафи між первинними перетворювачами та вторинними вимірювальними приладами. При цьому з'єднання комутаційної апаратури з приладами треба виконувати мідним дротом, а також забезпечувати стабільність температури повітря середовища, де встановлені комутатори сигналів, що вимірюються, з похибкою не більше ніж ± 1 К.

Для вимірювання і реєстрування густини теплового потоку і (або) температури застосовують сучасні портативні цифрові прилади для вимірювання густини теплового потоку і (або) температури згідно з ДСТУ 4035 [7] або інші прилади аналогічного призначення. Деякі моделі портативних приладів для контактних разових вимірювань температури і густини теплового потоку, що найбільш розповсюджені у вимірювальній практиці, наведено в таблиці 1.1.

Для обстежень огорожувальних конструкцій, що мають декілька різномірних представницьких зон, зручніше використовувати комп'ютеризовані багатоканальні вимірювальні системи, які можуть впродовж кількох діб проводити вимірювання, опрацювання та накопичення даних про температуру та густину теплового потоку по кільком десяткам каналів.

Таблиця. 1.1 Засоби вимірювання теплового опору огорожувальних конструкцій.

Найменування	TRSYS20 Hukseflux [69] (Нідерланди)	FluxDAQ (США) [70]	UVAL Wired System (Швейцарія) [71]
Кількість каналів	6	8	5
Зони контролю	2	2	2
Сенсори теплового потоку	HFP01	PHFS-01e	gSKIN®-XO 67 7C (30mm x 30mm)
Діапазон значень густини теплового потоку, Вт/м ²	1 ... 2000	1 ... 150	±300 .
Невизначеність контролю теплового потоку, %	± 3 %	± 3 %	± 3 %
Сенсори температури	Термоелектричний сенсор	Термоелектричний сенсор	н.д.
Діапазон значень температури, °С	-30 ... +70	-50 ... +120	-30 ... +70
Невизначеність контролю температури, К	0,5	0,5	0,5

1.3 Методи та прилади контролю коефіцієнта емісії матеріалів та покриттів

Проблематика вимірювань коефіцієнту емісії актуальна для багатьох сфер національної економіки. Відомо, що на теплопостачання житлових, громадських і виробничих будівель витрачається близько 40% всього видобутого органічного палива. При цьому, крізь огорожувальні конструкції відбувається більше 60% втрат теплової енергії, які визначаються умовами теплообміну з оточуючим середовищем. Коефіцієнт емісії покриття чи матеріалу значною мірою визначає інтенсивність радіаційного теплообміну на поверхні досліджуваного об'єкта, тому його експериментальне визначення важливе для забезпечення необхідних теплозахисних характеристик конструкцій.

При створенні сучасних енергоефективних вікон та склопакетів застосовують низькоемісійне скло, яке забезпечує зменшення радіаційної складової теплообміну і, відповідно, збільшення опору теплопередаванню у порівнянні зі звичайними світлопрозорими конструкціями. Для космічних апаратів, навпаки, оболонка повинна сприяти розсіюванню у просторі теплоти, що виділилася у бортовій апаратурі, але мати низький коефіцієнт поглинання сонячного випромінення. При впровадженні технології виготовлення енергоефективного скла та оболонок для космічних апаратів, а також для визначення характеристик поверхонь при застосуванні готових виробів актуальним є проведення експрес-контролю коефіцієнту емісії [72–77].

1.3.1 Методи контролю коефіцієнта емісії матеріалів та покриттів

Відомі сучасні методи визначення коефіцієнту емісії використовують або складне та дороге фотоспектрометричне обладнання, або калориметричні методи, які для зменшення конвективної складової теплообміну передбачають вакуумування камери з досліджуваними зразками. Здебільшого прилади для експрес-контролю мають відносно вузький спектральний діапазон та обмежену діаграму направленості.

Інтегральний коефіцієнт емісії ϵ є відношенням випромінювальної здатності реального тіла до випромінювальної здатності чорного тіла при тій же температурі.

Як відомо, випромінювання сірих тіл відповідає закону Стефана-Больцмана [78], який встановлює залежність густини інтегрального напівсферичного випромінення від температури:

$$q = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ (Вт/м}^2\text{)} \quad (1.7)$$

де: q – густина інтегрального напівсферичного випромінення;

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ (Вт/м²·К⁴) стала Стефана-Больцмана;

ϵ – коефіцієнт емісії.

Визначення коефіцієнту емісії актуальне для всіх випадків дослідження, розрахунку та моделювання радіаційного теплообміну, зокрема при визначенні властивостей енергоефективного скла та вікон, покриття елементів космічної техніки, при проведенні пірометричних та тепловізійних вимірювань в будівельній, теплоенергетичній та аерокосмічній галузях.

Для реальних тіл коефіцієнт емісії є складною функцією, яка залежить від природи тіла що випромінює, його температури, стану поверхні, а для металів – від ступеню окислення цієї поверхні. Для чистих металів з полірованою поверхнею коефіцієнт емісії має низькі значення. При температурі до 100°C значення коефіцієнту емісії полірованої поверхні металу не перевищує 0,1. З появою оксидних плівок на поверхні металу коефіцієнт емісії різко збільшується і може приймати значення більші за 0,5.

Відомі декілька методів експериментального визначення коефіцієнту емісії. Їх можна розділити на дві великі групи: оптичні та теплові [79].

Серед оптичних методів найбільш відомим та розповсюдженим є спектрометричний. Методика спектрометричного дослідження полягає у визначенні спектральної кривої дзеркального відбиття, обмірюваної у широкому діапазоні довжини хвиль при куті падіння пучка випромінення, близькому до нормального. За отриманими результатами обчислюють середне

значення нормальної та напівсферичної випромінювальної здатності поверхні. Для реалізації спектрометричної методики вимірювань необхідне досить складне і коштовне обладнання, а результат отримують шляхом розрахунків з використанням емпіричних поправочних коефіцієнтів. Таким чином, цей метод вимірювань є непрямим [79].

Серед теплових методів експериментального визначення коефіцієнту емісії розповсюдження набули наступні: радіаційний, калориметричний, метод регулярного режиму, метод неперервного нагріву зі сталою швидкістю. У всіх методах переніс теплоти за рахунок конвекції та теплопровідності повітря повинен бути дуже малим у порівнянні з випромінюванням.

Радіаційний метод є відносним методом [79]. Він базується на порівнянні випромінення досліджуваного тіла з випроміненням абсолютно чорного або іншого еталонного тіла з відомим коефіцієнтом випромінення. Наприклад, застосовується приймальний пристрій, в якому розміщено диференційний термоелектричний сенсор температури. Один зі спаїв термоелектричного сенсору температури приймає випромінення від досліджуваного тіла, а інший – з поверхні еталонного тіла. За результатом вимірювання сигналу термоелектричного сенсору температури визначають коефіцієнт емісії.

Калориметричний метод заснований на безпосередньому вимірюванні потоку випромінювання від досліджуваного тіла [79]. Такий метод є абсолютним. Коефіцієнт емісії визначають виходячи із закону Стефана-Больцмана.

Метод регулярного теплового режиму заснований на законах регулярного теплового режиму для тіла, теплообмін якого є тільки радіаційним [79]. Для такого випадку коефіцієнт емісії пропорційний до темпу охолодження, який визначають звичайним для регулярного режиму методом.

У методі нагріву зі сталою швидкістю зразок досліджуваного матеріалу простої геометричної форми (наприклад, циліндр) розміщують

всередині масивного циліндричного блоку, який слугує для створення рівномірного температурного поля навколо зразка. Теплообмін між зразком та блоком здійснюється лише за рахунок теплового випромінення. Масивний блок нагрівають так, щоб швидкість нагріву зразка була сталою в умовах $Bi \leq 0,1$. Коефіцієнт емісії знаходять з рівняння теплового балансу для зразка, спираючись на значення швидкості нагріву зразка, його теплоємність та коефіцієнт випромінення масивного блоку [79].

Стандарт ASTM E408-13 [78] визначає стандартні методи вимірювання загального нормального коефіцієнту випромінювання поверхонь за допомогою контрольно-вимірювальних приладів.

У стандарті наведено визначення: загальне нормальне випромінювання (ϵ_N) визначається як відношення нормального випромінення зразка до випромінення чорного тіла за тієї ж температури. Рівняння, що пов'язує ϵ_N з довжиною хвилі та спектрально залежного нормального випромінювання $[\epsilon_N(\lambda)]$ становить:

$$\epsilon_N = \int_0^{\infty} L_b(\lambda, T) \epsilon_N(\lambda) d\lambda / \int_0^{\infty} L_b(\lambda, T) d\lambda \quad (1.8)$$

де: $L_b(\lambda, T) = c_1 \cdot \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1}$ – функція випромінювання чорного тіла Планка;

$$c_1 = 3,7415 \times 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2;$$

$$c_2 = 1,4388 \times 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К};$$

T – абсолютна температура, К;

λ – довжина хвилі, м;

$$\int_0^{\infty} L_b(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4.$$

Стандарт E408-13 розглядає у загальному вигляді три різні методи проведення цих вимірювань. В першому методі вимірюють променисту енергію, відбиту від зразка (метод випробування А), у другому методі вимірюють променисту енергію, що випромінюється з поверхні зразка (метод випробування В), і третій метод вимірює майже нормальну спектральну відбивальну здатність (тобто визначається енергія випромінювання, відбита

від зразка, як функція довжини хвилі) і перетворює це на загальний майже нормальний коефіцієнт емісії (метод випробування С) [78].

Метод тестування А найкраще описати як метод відбиття. При опроміненні поверхні потік або відображається, передається, або поглинається. Дійсним є вираз:

$$\text{ref} + \text{in} + \text{cons} = 1,$$

де ref – відбивна здатність,

in – коефіцієнт пропускання,

cons – поглинання.

Для непрозорих поверхонь, коефіцієнт пропускання дорівнює нулю ($\text{in}=0$), а вираз зменшується до $\text{ref}+\text{cons}=1$. Закон Кірхгофа стверджує, що для однакових кутів і спектральних діапазонів, $\text{cons}=\varepsilon$. Це дозволяє визначити зі значення нормальної відбивної здатності значення нормального коефіцієнту емісії для даної температури, або $\varepsilon_N = 1 - \text{ref}_N$. При цьому спектральний діапазон повинен бути діапазоном чорного тіла а при цій температурі.

Використання методу випробування А ставить дві важливі вимоги для інструментів. Перший – оптична система повинна вимірювати коефіцієнт відбиття в повній півкулі. Другий – спектральна характеристика приладу повинна добре співпадати із випромінюванням чорного тіла при цій температурі, яка зазвичай становить 300 К, але в принципі можливі інші температури. В стандарті наведено загальні вимоги до інструментального забезпечення вимірювань, а один з прикладів таких вимірювань детально розглянуто у [80].

Метод В передбачає, що поверхню, яка досліджується, розміщують навпроти отвору на портативному чутливому елементі. Променева енергія, яка випромінюється і відбивається від зразка проходить через відповідне передавальне вакуумне вікно і підсвічує термобатарей. Вихідний сигнал термобатарей підсилюється і подається на відповідний вимірювальний пристрій. Показники приладу є відносними і він повинен бути відкалібрований за допомогою стандартних зразків з відомим коефіцієнтом емісії [78,81].

Метод С базується на Фур'є-спектроскопії (FTIR) [78].

Фур'є-спектроскопія (англ. Fourier-transform spectroscopy) – сукупність методів вимірювань спектрів різної природи, в яких спектр обчислюється не за інтенсивністю сигналу, як наприклад, в призмових спектроскопах, а за відгуком у часовій або просторовій області (для оптичної спектроскопії).

Вимірювання за методом С можливо здійснити за допомогою рефлектометрів / емісметрів на основі FTIR, які визначають спектр відбиття з високою роздільною здатністю ($\text{ref}_N(\iota)$), або ($\varepsilon_N(\iota)$), або обидва, за короткий проміжок часу. Для непрозорих зразків, загальний майже нормальний коефіцієнт емісії може бути виражений як:

$$\varepsilon_N = 1 - \frac{\int_0^\infty L_b(\iota, T) \rho_N(\iota) d\iota}{\int_0^\infty L_b(\iota, T) d\iota} = 1 - \rho_N \quad (1.9)$$

Існує багато FTIR засобів для визначення $\rho_N(\iota)$ та $\varepsilon_N(\iota)$ для великої кількості значень довжин хвиль ι . Відповідно існують різні методи для апроксимації вищевказаних інтегралів. Найважливішою особливістю будь-якого засобу є здатність збирати відбивальну здатність або випромінювання у всій півкулі над зразком. Деякі засоби та методи їх застосування розглянуто в [82–84].

В стандарті розглянуто порядок дій при реалізації кожного з методів, обмеження, які існують при вимірюваннях та основні відомості, які повинні бути зазначені у звіті.

Стандарт ISO 9050:2003 [85] застосовують при випробуваннях звичайного віконного та низькоемісійного скла. Метод вимірювань відповідає методу А розглянутого вище стандарту [78].

Суть методу полягає у визначенні спектральної кривої дзеркального відбиття, обмірюваної у діапазоні довжини хвиль 5–50 мкм при куті падіння пучка випромінювання, близького до нормального, і обчисленні нормальної випромінювальної здатності поверхні ε_n .

Випробування проводять на зразках скла прийнятої партії, що не мають вад зовнішнього вигляду. Зразки скла для випробування виготовляють відповідно до вимог інструкції з експлуатації вимірювальної апаратури [78].

Для вимірювань застосовують спектрофотометр з діапазоном довжини хвиль 5–50 мкм і з приставкою для вимірювання дзеркального відбиття при куті падіння світла $\leq 20^\circ$, з похибкою не більше 1% [78].

Випробування проводять відповідно до інструкції з експлуатації спектрофотометра, вимірюванням за кімнатної температури $20 \pm 5^\circ\text{C}$ коефіцієнта відбиття світла R_i стороною зразка скла з низькоемісійним м'яким покриттям.

Нормальне відбиття RS_n визначають обчисленням математичного середнього з 30 значень коефіцієнта відбиття R_i за формулою (1.10):

$$RS_n = \frac{\sum_{i=1}^{30} Ri(\lambda_i)}{30} \quad (1.10)$$

де R_i – коефіцієнт відбиття світла;

λ_i – i -та довжина хвилі.

У випадку, якщо застосований спектрофотометр має діапазон довжини хвиль до 25 мкм, то до значень коефіцієнта спектрального відбиття на довжині хвиль понад 25 мкм прирівнюється значення, отримане на довжині хвилі 25 мкм. При цьому апроксимацію обов'язково вказують у протоколі випробувань [78].

Нормальну випромінювальну здатність ϵ_n визначають за формулою (1.11):

$$\epsilon_n = 1 - Rn_n \quad (1.11)$$

де Rn_n – нормальне відбиття.

Коефіцієнт емісії ϵ визначають множенням нормальної випромінювальної здатності ϵ_n на коефіцієнт A , зазначений у таблиці 1.2

Проміжні значення коефіцієнта A одержують лінійною інтерполяцією.

Допускається застосовувати інші засоби вимірювання, що забезпечують визначення коефіцієнта емісії, з невизначенністю вимірювань не більше 2%, атестовані й повірені в установленому порядку.

Таблиця 1.2 – Показники для визначення коефіцієнта емісії

Нормальна випромінювальна здатність ϵ_n	Коефіцієнт А
0,01	1,30
0,02	1,26
0,03	1,22
0,05	1,18
0,1	1,14
0,2	1,10
0,3	1,06
0,4	1,03
0,5	1,00
0,6	0,98
0,7	0,96
0,8	0,95
0,89	0,94

Як слідує з наведеної спектрометричної методики вимірювань, для її реалізації необхідне досить складне і коштовне обладнання, а результат отримують шляхом розрахунків з використанням емпіричних поправочних коефіцієнтів. Таким чином, цей метод вимірювань є непрямим.

Стандарт С835-06 [86] визначає стандартний метод випробувань для визначення повного напівсферичного коефіцієнту емісії поверхонь до 1400°C. Зазначений метод калориметричного випробування охоплює визначення загальної напівсферичної емісії металевих та графітових поверхонь та металевих поверхонь з покриттям приблизно до 1400°C. Верхня температура використання обмежена лише характеристиками зразка та проектними

межами випробувального обладнання. Вимірювання, описані в цьому методі випробування, проводяться у вакуумному середовищі.

Загалом пристрій повинен складатися з наступного обладнання: банка-дзвін, джерело живлення та мультиметр для напруги і вимірювання струму, термоелектричні сенсори температури та вольтметр або інші індикатори, вакуумна система та тримачі зразків. Схема випробувань наведена на рис. 1.6. Повинні бути передбачені засоби для електричного нагрівання зразка і прилади необхідні для вимірювання вхідної електричної потужності, що подається на зразок, та температур зразка і навколишньої поверхні. Банка-дзвін повинна мати чорне покриття для поглинання випромінювання зразка, а площа її внутрішньої поверхні значно перевищувати площу поверхні зразка [86].

При випробуваннях вакуумують вимірювальну комірку, пропускають електричний струм крізь зразок, нагріваючи його до заданої температури. Після встановлення стаціонарного теплового режиму визначають потужність, що розсіюється з поверхні зразка і температури зразка та банки-дзвона.

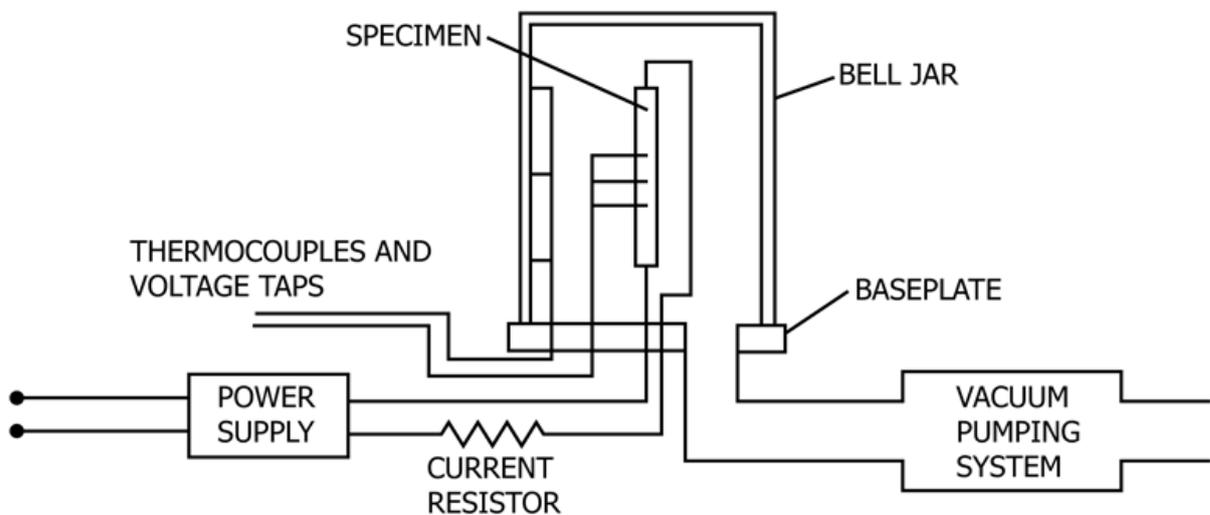


Рисунок 1.6 – Схема випробувань за С835 [86].

Виходячи з припущення, що досліджуваний зразок є маленьким випромінюючим тілом, яке оточене великою поглинаючою поверхнею,

загальний напівсферичний коефіцієнт емісії зразка може бути обчислений наступним чином (1.12):

$$\varepsilon = \frac{Q}{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)} \quad (1.12)$$

де: Q – теплота, яка генерується в зразку;

A_1 – площа поверхні зразка;

T_1 та T_2 – температури поверхонь зразка та комірки відповідно.

У стандарті наведено також вимоги до апаратури, зразка, умов проведення випробувань та змісту звіту, зазначені фактори, які можуть впливати на точність вимірювань і наведена методика оцінювання невизначеності. Стандарт містить посилання на оригінальні дослідження, на яких ґрунтується цей документ, та довідкову літературу з теплообміну [87–95].

Стандарт С1371-15 [96] містить стандартний метод випробування для визначення коефіцієнту емісії матеріалів за допомогою портативних емісметрів при температурі близької до кімнатної. Метод випробування охоплює методику визначення випромінювання непрозорого та високотеплопровідного матеріалів із використанням переносного диференціального термоелектричного емісметра.

Метод випробування, наведений у С1371-15 [96] використовує диференціальну термобатарей емісметру для вимірювання загальної напівсферичної емісії, при цьому термобатарей детектора нагріваються для забезпечення необхідної різниці температур між детектором і досліджуваною поверхнею. Диференціальна термобатарей складається з однієї термобатарей, що покрита чорним покриттям, і другої батареї, що покрита світловідбивним покриттям. Прилад калібрують за допомогою двох стандартних зразків: одного з високим коефіцієнтом випромінювання, а іншого – з низьким, які розміщуються на рівній поверхні радіатора (тепловідводу), як показано на рис. 1.7.

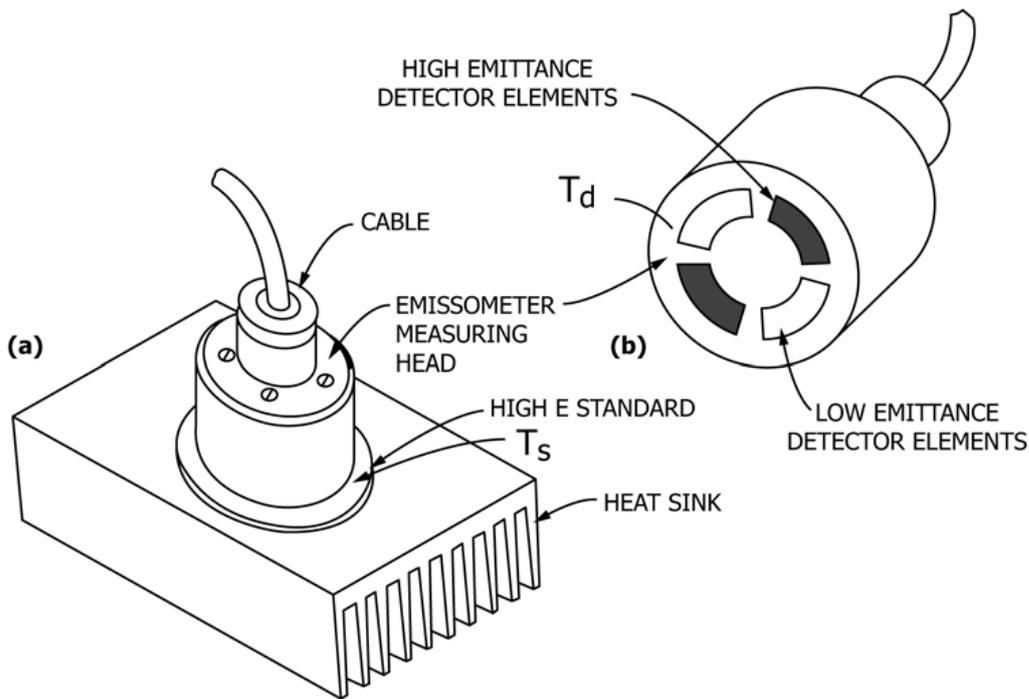


Рисунок 1.7 – Схематичне зображення теплової частини емісметра [96]: **(a)** – вимірювальна головка емісметра на еталоні з високим коефіцієнтом випромінювання під час калібрування, показані також радіатор і кабель зчитувального пристрою; **(b)** – вид знизу вимірювальної головки емісметра, що показує елементи термобатарей з покриттям, які мають високий та низький коефіцієнти емісії.

Діаметр вимірювальної головки емісметра становить близько 50 мм, а елементи детектора заглиблені приблизно на 3 мм у вимірювальну головку.

Зразок матеріалу, що обстежується, розміщується на радіаторі, а його коефіцієнт випромінювання визначається кількісно порівнянням зі стандартними зразками. Калібрування повинні проводитися неодноразово під час випробування.

Виробник емісметра повинен постачати два набори стандартних зразків, кожен набір складається з полірованої нержавіючої сталі (коефіцієнт випромінювання близько 0,06) і з чорного стандартного зразка (випромінювання близько 0,9). Характеристики стандартних зразків повинні простежуватися до вимірювань, проведених із використанням абсолютного

методу випробувань (наприклад, метод випробування С835). Рекомендується використовувати один комплект як робочі стандартні зразки, а інший набір використовувати для періодичних перевірок коефіцієнту емісії робочих стандартних зразків [96].

Зразок поверхні, що підлягає випробуванню, ретельно відбирається таким чином, щоб зберегти стан поверхні на місці. Зразок трохи більше зовнішніх розмірів вимірювальної головки емісметра акуратно вирізається із зразка. Тепловий опір зразка не повинен перевищувати $0,00091 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

При вимірюваннях включають прилад та розігрівають головку до температури на $40\text{--}60 \text{ К}$ вищу за температуру навколишнього середовища. Головка розміщується над «чорним» зразком, встановленим на радіатор, і через 90 секунд проводиться вимірювання напруги вихідного сигналу V_{hi} . Потім головка розміщується над «світлим» зразком, встановленим на радіатор, і через 90 секунд проводиться вимірювання напруги вихідного сигналу V_{low} . Між вимірними значеннями дійсним є співвідношення (1.13):

$$V_{low} = \varepsilon_{low} \times \varepsilon_{hi} / V_{hi} \quad (1.13)$$

Головку розміщують над випробуваним зразком і після стабілізації сигналу вимірюють значення V_{spec} . Коефіцієнт емісії досліджуваного зразка визначають за формулою (1.14):

$$\varepsilon_{spec} = V_{spec} \times \varepsilon_{hi} / V_{hi} \quad (1.14)$$

У стандарті наведено вимоги до апаратури, зразка, умов проведення випробувань та змісту звіту, зазначені фактори, які можуть впливати на точність вимірювань. Вказано, що невизначеність вимірювань, зазвичай, складає $\pm 0,02$.

У додатку до стандарту розглянуто питання дії факторів, що впливають на точність визначення напівсферичного коефіцієнта вимірювання. Відмічено, що кут експозиції термобатарей складає близько $168\text{--}169^\circ$ (приблизно $\pm 84^\circ$ від нормалі), тобто меншій за повну на півсферу. З іншого боку, різні матеріали мають суттєво різну діаграму направленості випромінювання.

1.3.2 Прилади контролю коефіцієнту емісії

Переносні портативні прилади застосовують, як правило, для контролю характеристик при температурі оточуючого середовища, тобто близької до кімнатної температури.

Емісометр моделі AE1 фірми Devices & Services Co. (рис. 1.8) є спеціалізованим приладом для визначення коефіцієнту емісії [97]. Прилад відповідає розглянутому вище стандарту C1371-15.



Рисунок 1.8 – Емісометр моделі AE1 фірми Devices & Services Co. (D&S, США) [97]

Основні характеристики та переваги емісометру моделі AE1:

- відтворюваність становить +/- 0,01 одиниці коефіцієнту емісії;
- легко проводити вимірювання: детекторну частину приладу нагрівають електрично так, що зразок не потрібно нагрівати. Не потрібно вимірювати температуру;
- швидкі вимірювання: після першого періоду розігріву приблизно за 30 хвилин, зчитування коефіцієнту емісії можна проводити кожні півхвилини;
- низька вартість: пристрої для порівняльних вимірювань коштують набагато більше;

- додаткові адаптери: адаптери, які роблять доступними вимірювання на малих площах та спеціальні адаптери для зразків із неправильною геометрією поверхні.



Рисунок 1.9 Портативний електронний емісометр / рефлектометр TESA 2000 [98]

Портативний електронний емісометр / рефлектометр TESA 2000 фірми AZ Technology (США) [98] компактний, легкий, міцний та ергономічний, спроектований для полегшення використання в польових умовах або в лабораторії для визначення інтегрального коефіцієнту емісії за температури навколишнього середовища. Прилад може використовуватися у автономному режимі за допомогою живлення від акумулятора. Основні технічні характеристики приладу наведені в таблиці 1.3.

Принцип дії приладу заснований на вимірюванні випромінювання, що падає на досліджуваний зразок, і відбитого поверхнею досліджуваного зразка. Випромінювання, відбите від досліджуваного зразка, збирається дзеркальним

еліпсоїдом і прямує на приймач випромінювання. При цьому опромінення досліджуваної поверхні здійснюється джерелом теплового випромінювання з випромінювальною здатністю, близькою до випромінювальної здатності чорного тіла при температурі 340 К.

Таблиця 1.3 Основні технічні характеристики приладу TESA 2000.

Довжина хвилі	від $<3\mu\text{m}$ до $>35\mu\text{m}$ (немає обмежень внаслідок фільтрів, вікон і т.п.)
Точність вимірювань (для дзеркальних і дифузних зразків)	- $\pm 1\%$ від повної шкали для сірих зразків - $\pm 3\%$ від повної шкали для не сірих зразків
Відтворюваність	- $\pm 0.5\%$ від повної шкали або краще
Температура зразка	кімнатна температура, оточуюче середовище
Вимірювана величина	- Інфрачервоне відбиття - Нормальний коефіцієнт емісії (300К) - Напівсферичний коефіцієнт емісії (300К)
Діапазон вимірювання (відбиття)	0.00 to 1.00

Рефлектометри складаються з трьох головних компонентів: вимірювальної комірки, блоку керування/відображення та мережевого адаптера. Портативний емісометр/рефлектометр TESA 2000 завдяки вдосконаленій оптичній системі виконує вимірювання інтегральної напівсферичної відбивної здатності при довжині хвилі від 3 до 35 мкм і не обмежує діапазон довжин хвиль через фільтри, вікна або покриття, розміщені в оптичному шляху. Оптична система TESA 2000 була розроблена таким чином, щоб мінімізувати втрати, полегшити і підтримувати оптичне вирівнювання, а також використовувати особливості запатентованого еліпсоїдного колектора AZ Technology, що забезпечує компактність для портативності, ефективності та точності вимірювань [98].

Рефлектометр – емісометр ET-100 фірми Surface Optics Corporation (США) [99] вимірює направлену відбивну здатність в шести смугах в області теплового інфрачервоного спектра при двох секторах кутів падіння – 20° та 60° . На підставі цих значень розраховується направлений та інтегральний напівсферичний коефіцієнт емісії.



Рисунок. 1.10 Ручний рефлектометр - емісометр ET-100 [99]

Особливостями приладу є реалізація вимірювання відбиття в інфрачервоному спектральному діапазоні та обчислення направлено теплового коефіцієнту емісії. Вимірювання здійснюється у двох секторах кутів падіння: сектор 20° біля нормалі до поверхні та сектор близький до 60° , час вимірювання складає приблизно 10 секунд.

Стаціонарні лабораторні системи, як правило, забезпечують вимірювання у широкому температурному діапазоні при вакуумуванні робочої камери для зменшення кондуктивно-конвективної складової теплообміну. Приклад такої установки, призначеної для вимірювання терморадіаційних характеристик, наведено у роботі [100]. Фото робочої камери установки показано на рис. 1.11. Представлено кріогенний метод для вимірювання інтегральних напівсферичних коефіцієнтів емісії та поглинання

різних матеріалів при температурах від 320 К до 20 К. При вимірюванні поглинання температура досліджуваного зразка становить приблизно 5–35 К.

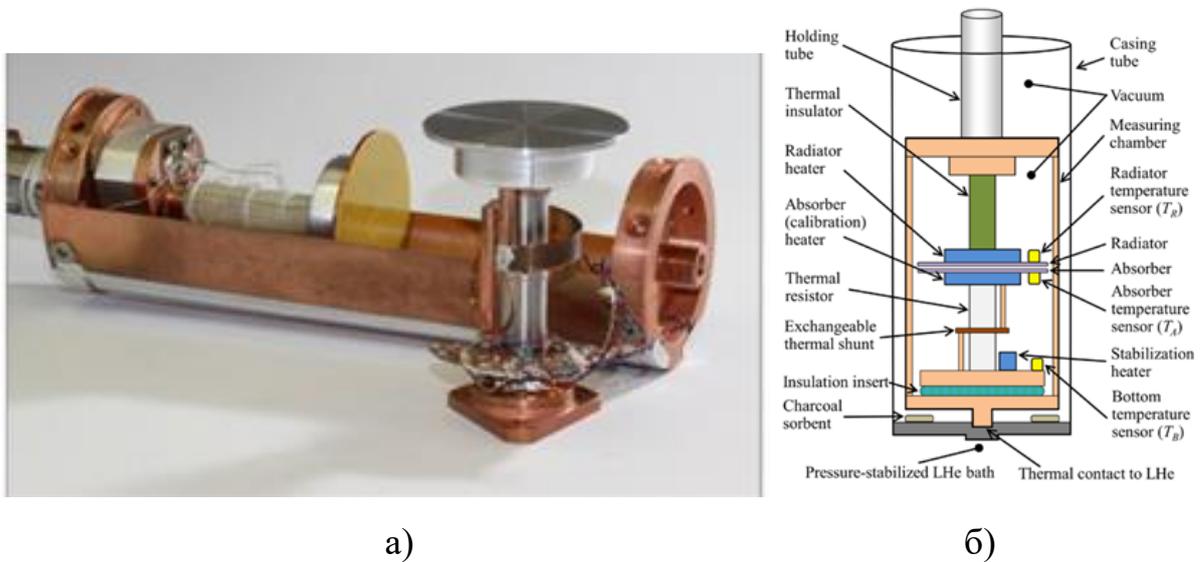


Рисунок. 1.11 – Вимірювальна камера емісметра [101]: а) відкрита камера з вилученою частиною абсорбера; б) схема установки, що використовується для вимірювання коефіцієнта емісії.

За допомогою теплового опору (тепломіру) визначається радіаційний тепловий потік між двома плоскими паралельними поверхнями у вигляді дисків діаметром 40 мм, які розміщені у вакуумі. Досліджуваний зразок і диск-референт з поверхнею, що має відомі характеристики, занурюються у ванну, яка охолоджується рідким гелієм (LHe). Тепловий потік вимірюється за методом заміщення з використанням теплової потужності від електричного нагрівача для калібрування тепломіру. Велика увага приділяється оцінці невизначеності вимірювань, що виникає при застосуванні цього способу. Можливості приладу продемонстровано вимірюванням коефіцієнтів поглинання та випромінювання зразка чистого алюмінію. На рис. 1.12 показано зразки-референти та їх характеристики.

Розширена невизначеність ($k = 2$) вимірювання коефіцієнту емісії $\varepsilon = 0,0041$, вимірюного при ≈ 30 К для чистого алюмінію, становить менше 11%, а для значень коефіцієнту емісії $\varepsilon > 0,0053$, що вимірюється за температури вище 60 К, невизначеність становить нижче 7%. Метод було розроблено, перш

за все, для досліджень матеріалів з малим значенням коефіцієнту емісії, таких як чисті метали, проте висока випромінювальна здатність еталонного зразка також дозволяє досліджувати неметалічні матеріали з розумною точністю.

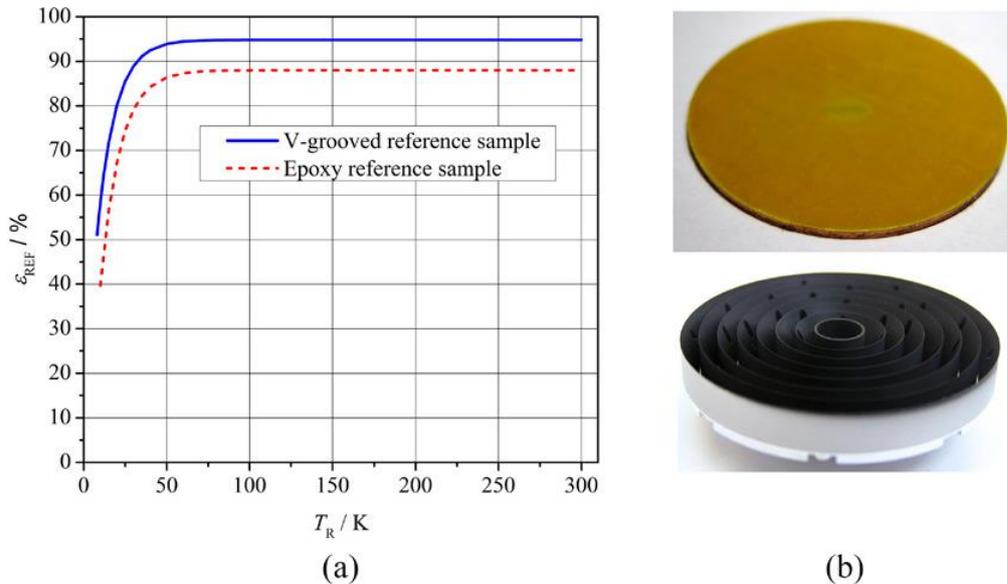


Рисунок. 1.12 – Зразки-референти. Температурна залежність їх коефіцієнту емісії (а) та фотографії (b) від епоксидної зразка (верхня картинка) і рифленого зразка з V-подібними канавками [100].

Компанією «Sun LabTek» (Індія) запропоновано комп'ютеризований прилад для вимірювання коефіцієнту емісії [101]. Зовнішній вигляд приладу наведено на рис. 1.13. В основі експериментального блоку лежить металевий зразок, що нагрівається концентрованим світловим пучком. Світловий промінь генерується безперервно регульованою галогенною лампою і параболічним відбивачем. Відбивач концентрує випромінювання до фокусної точки. Зразок поміщають на термоелектричний сенсор температури, розташований в фокальній точці. Теплове випромінювання, що випромінюється зразком, вимірюється термобатареею. Для вимірювання випромінювання на різних відстанях термобатарей встановлена на рухомій каретці.



Рисунок – 1.13 Комп'ютеризований прилад для вимірювання коефіцієнту емісії «LabTek», Індія [101].

Мікропроцесорні прилади розташовані у захищеному в корпусі. Прилад оснащено програмним забезпеченням для роботи системи та для збору даних та навчального програмного забезпечення. Завдяки пояснювальним текстам та ілюстраціям навчальне програмне забезпечення значно допомагає зрозуміти теоретичні принципи.

У стаціонарних системах для вимірювання коефіцієнту емісії, які застосовують теплові методи, зазвичай визначають теплові потоки між досліджуванним об'єктом та деяким випромінювачем, а також температури елементів структури. Але ці методи не можуть бути використані при контролі готових виробів.

1.4 Формулювання науково-прикладної проблеми та постановка завдань дослідження

Суттєве підвищення вимог до рівня теплозахисту зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель різного призначення обумовило широке застосування новітніх утеплювачів, що розміщують ззовні або усередині огорожувальних конструкцій і які призначені підвищувати опір теплопередаванню. Нові вимоги щодо енергоефективності мають виконуватися як при проектуванні будинків і споруд, їх будівництві, так і при

реконструкції та капітальному ремонті будівель, оптимізації витрат ресурсів на їхнє опалення.

Для оперативного неруйнівного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів і виробів, що використовують при зазначених роботах, і встановлення їх дійсних значень актуальним є розроблення концептуального підходу до комплексного контролю основних показників при оцінюванні енергоефективності будівель, створення сучасних засобів контролю та відповідних методик.

Вищевикладене дало змогу сформуванню науково-технічну проблему (рис. 1.14), 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 1.14 – Формулювання науково-технічної проблеми

Відповідно поставленої науково-технічної проблеми 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.

1.5 Висновки до розділу

1. Проаналізовано сучасний стан нормативно-технічних документів щодо теплотехнічного обстеження будівель, встановлено що визначення рівня теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій і, відповідно,

проведення їх оцінювання при проектуванні та прийманні можливе за двома нормативними принципами – регламентному та функціональному. Функціональний принцип проектування будинків приймає за основу кінцевий продукт будівництва – будинок, і досліджує його енергетичні характеристики протягом експлуатації. Це забезпечує гнучкий підхід до створення системи теплоізоляції, але за відсутності досвіду його здійснення переваги гнучкого підходу можуть перетворитися на загальні недоліки.

2. Проаналізовано апаратне забезпечення, що застосовують для контролю теплотехнічного оболонки будівлі, як в натурних так і лабораторних умовах визначено вимоги до інформаційно- вимірювальних систем за допомогою яких проводяться дослідження теплового опору елементів оболонки будівлі. Зокрема відзначено що при дослідженнях складних об'єктів, потрібно будувати систему за модульним принципом.

3. Проведено аналіз методичного забезпечення досліджень теплового опору, встановлено що доцільно вдосконалити методику неруйнівного контролю використовуючи тепловізійний аналіз огорожувальних конструкцій (ISO 6781) та контроль значень поверхневої густини теплового потоку і температури (ISO 9869), щоб дозволило знизити вплив суб'єктивного фактору на проведення випробувань.

4. 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. При цьому акцент робився на переносних портативні прилади які можна використати при проведенні енергоаудиту. Методи які базуються на визначенні коефіцієнту емісії шляхом порівняння з випромінюванням стандартів, не дуже зручні в умовах натурних випробувань, а для рефлектометрів недоліком є необхідність перерахунку емісії з коефіцієнта відбиття. Тому, перспективним є розвиток методу вимірювання

коефіцієнта емісії, в основу якого може бути покладений калориметричний диференціальний метод неруйнівного контролю.

5. На основі проведеного аналізу сформульовано науково-технічну проблему, пов'язану з необхідністю забезпечення комплексного контролю терморадіаційних контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів та виробів, що забезпечить достовірність оцінки енергоефективності.

2. КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО КОНТРОЛЮ ТЕПЛОГОГО ОПОРУ ТЕПЛОЗАХИСНОЇ ОБОЛОНКИ БУДІВЛІ

2.1 Теоретико-практичний підхід до контролю теплового опору оболонки будівлі

Найбільш прийнятним зі стандартизованих методів обстеження будівельних об'єктів є метод, заснований на безпосередніх прямих вимірюваннях поверхневої густини теплового потоку [18], що проходить крізь обстежувану поверхню огорожувальних конструкцій [18, 102].

Теплофізичні властивості є ключовим фактором контролю тепловтрат і, як наслідок, проведення оцінки енергетичної ефективності будівлі [62, 63]. Для контролю тепловтрат однією з основних теплофізичних характеристик є приведений тепловий опір оболонки будівлі, який визначається як опір окремих характерних зон оболонки з урахуванням їх площі [64, 65]. Для його визначення використовуються різні розрахункові методи [64, 65], фізичні і математичні моделі [102, 103], моделювання обчислювальної моделі (CFD) [104, 105] та експериментальні дослідження [18, 106, 107]. Експериментальні натурні дослідження теплофізичних характеристик оболонки будівлі визначені стандартом ISO 9869 [18], мають ряд суттєвих недоліків, серед яких слід виділити такі: велика тривалість вимірювань (не менше 72 годин) [108], при необхідності експеримент може бути продовжений; необхідність використання великої кількості сенсорів для отримання репрезентативного результату [109, 110]; обмеження параметрів клімату для проведення вимірювань [111, 112]. А також велика кількість факторів впливу, таких як геометричні розміри та орієнтація будівлі [113], розташування сенсорів [18, 108]. Зовнішні кліматичні умови [108, 112, 114] можуть призвести до значних відхилень результатів вимірювань [75].

CFD моделювання розширює коло розв'язуваних завдань, які є основою для створення раціональних конструкцій оболонки будівлі і розробки оптимальних режимів роботи системи вентиляції та опалення [112, 113]. CFD-

моделі для варіації режимів роботи систем вентиляції стали одним із основних інструментів [114, 115]. Але створені CFD моделі обов'язково вимагають валідації за експериментальними даними [113].

На основі аналізу методів контролю, зважаючи на наведені фактори, сформовано концептуальний підхід до комплексного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів та виробів, ґрунтується на моделях полів інформативних параметрів та статистичних методах опрацювання даних (рисунок 2.1) [116].



Рисунок 2.1 Концептуальний підхід до комплексного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів та виробів.

Концептуальний підхід передбачає аналіз факторів, які впливають на результати контролю, для цього побудовано причинно-наслідкову діаграму [116].

Причино-наслідкова діаграма взаємозв'язків між факторами та наслідками при контролі теплового опору оболонки будівлі представлена на рисунку 2.1. Основними складовими діаграми визначені такі фактори впливу:

вимірювальна система, методи вимірювань та контролю, зовнішнє середовище, матеріали, суб'єктивний фактор [116].



Рисунок 2.2 Причино-наслідкова діаграма контролю теплового опору [166]

Теплотехнічні випробування огорожувальних конструкцій у натурних умовах проводять у пори року, коли існує такий самий температурний режим, за якого температурний напір між внутрішнім і зовнішнім повітрям не менший ніж 15 K[18]. Для дослідження у натурних умовах, як правило, вибирають зовнішні стіни кутових приміщень на першому поверсі, що орієнтовані на північ, північний схід, а також на інші сторони світу, де є найбільш складні умови для даної місцевості, наприклад, переважні вітри та косі дощі. Для випробувань вибирають не менше двох однотипних огорожувальних конструкцій в приміщеннях з однаковими температурно-вологими умовами[18].

Теплотехнічне обстеження будинку починається з його візуального огляду та дослідження показників повітряного навколишнього середовища з обох боків обстежуваної огорожувальних конструкцій. До основних показників

навколишнього середовища відносять температуру та вологість повітря, атмосферний тиск й швидкість руху повітря (Рисунок 2.3).

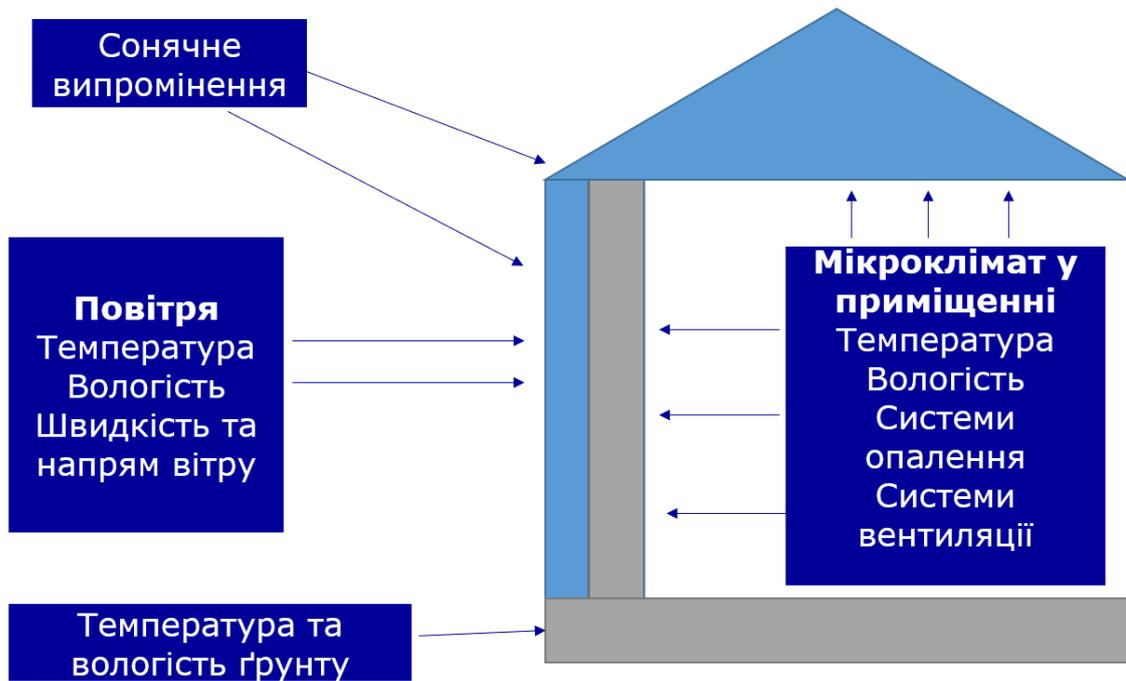


Рисунок 2.3 Фактори впливу при натурних випробуваннях

Тривалість вимірювань температури становить мінімум 72 години. На практиці спостерігаються циклічні коливання температури, проте ці цикли можуть бути нестабільними за періодом, а середнє значення температури за кожен день може відрізнятися від попереднього. Зручно з метою аналізу даних відокремити ефект зміни температури на дві складові:

- циклічну внутрішню та зовнішню температуру
- випадкову зміну середньодобового значення будь-якої температури.

Вплив сонячного випромінення може призвести до неравномірного нагріву оболонки будівлі, і як результат до спотворення результатів вимірювання. На рисунок 2.4 наведена фотографія та результат тепловізійної зйомки під впливом сонячного випромінення на оболонку будівлі.

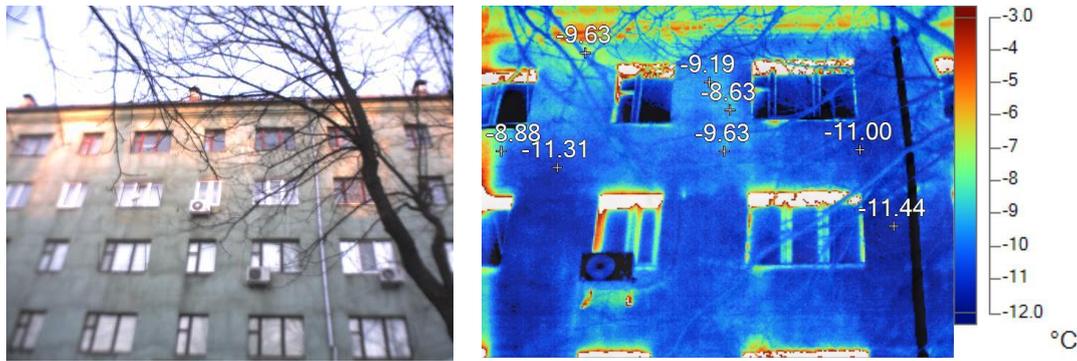


Рисунок 2.4 Результат тепловізійної зйомки під впливом сонячного випромінення на оболонку будівлі

На рисунку 2.4 маркерами нанесені характерні точки з вказаними значеннями температури. При цьому різниця між значеннями температури перевищує 2.5°C . Проведення контролю за таких умов є неможливим.

При впливі вітру підвищується конвективна складова теплообміну і при проведенні тепловізійної зйомки ми отримаємо невелику різницю температур поверхні (Рисунок. 2.5), але при цьому значні коливання температури повітря, що не рекомендоване стандартами та робить неможливим коректне визначення теплового опору оболонки будівлі.

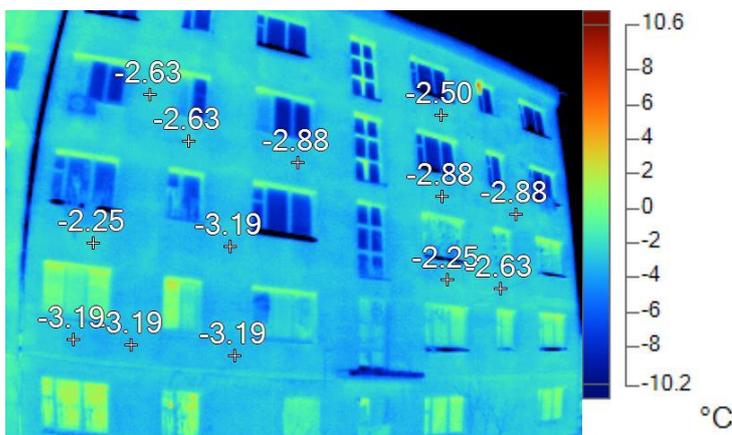


Рисунок. 2.5 Результат тепловізійної зйомки під впливом вітру на оболонку будівлі.

При проведенні контролю теплового опору оболонки будівлі слід відзначити суб'єктивний фактор який може виникнути через недостатню кваліфікацію дослідника, невірне розташування сенсорів, невірний монтаж сенсорів, зменшення тривалості експерименту.

Невірне розташування сенсорів може бути спричинене не тільки не дотриманням вимог стандартів, щодо одновимірності вимірюваного теплового потоку, але й прихованими дефектами конструкції та особливостями конструкції. Виявити особливості внутрішньої будови та складу досліджуваних фрагментів огорожувальної конструкції можна завдяки тепловізійному обстеженню всієї будівлі, яке виконується відповідно до ISO 6781 [2]. На рисунках 2.6 та 2.7 наведені типові приховані неоднорідності.

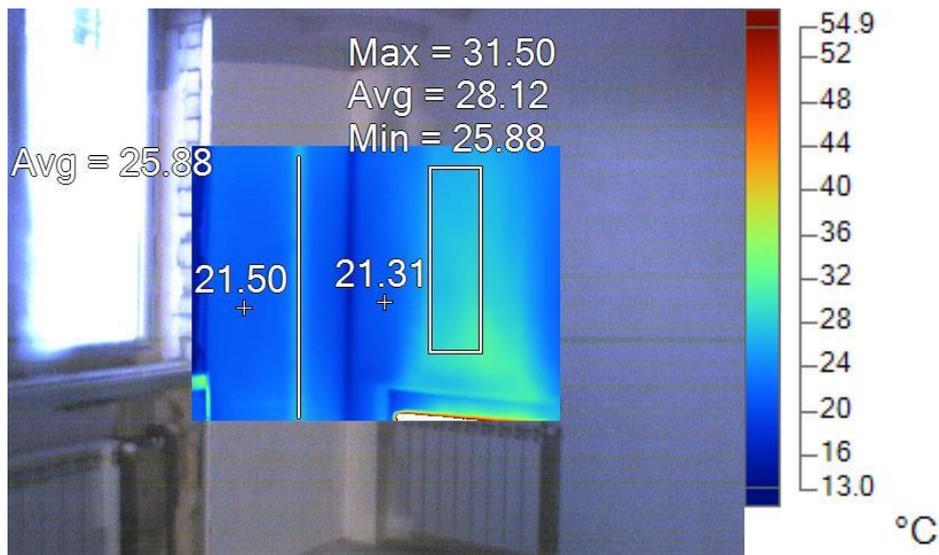


Рисунок. 2.6 Термограма внутрішньої поверхні оболонки будівлі

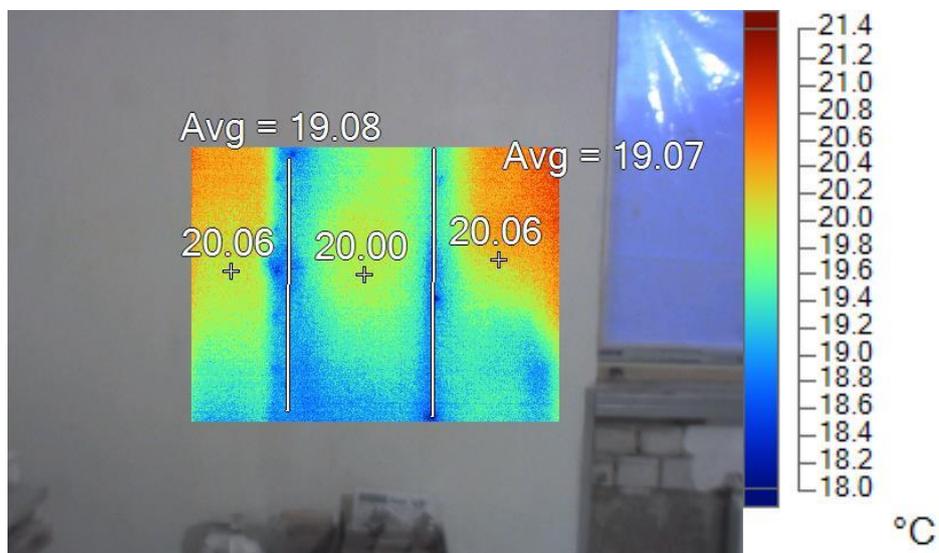


Рисунок. 2.7 Термограма внутрішньої поверхні оболонки будівлі

На Рис. 2.6 наведена термограма де лінійним маркером показана прихована труба системи опалення, температура якої на 5 К вища ніж

температура стіни. А також квадратним маркером відмічена зона над системою опалення яка перегріта по відношенню до стіни на 10 К.

На Рис. 2.7 наведена термограма де лінійним маркером зображенні приховані елементи конструкції (металевий профіль) температура якого в порівнянні з стіною вище на 1 К. Встановлення сенсорів в цих зонах може призвести до не вірних результатів контролю теплового опору.

Невірний монтаж сенсорів без використання теплопровідних змазок, або з повітряним шаром внаслідок неякісного монтажу може вплинути на результати контролю через неврахування контактного теплового опору. Цього можна уникнути завдяки встановленню декількох сенсорів теплового потоку в одній зоні та порівняння результатів їх вимірювань. На рис. 2.8 наведена термограма встановлених сенсорів теплового потоку.

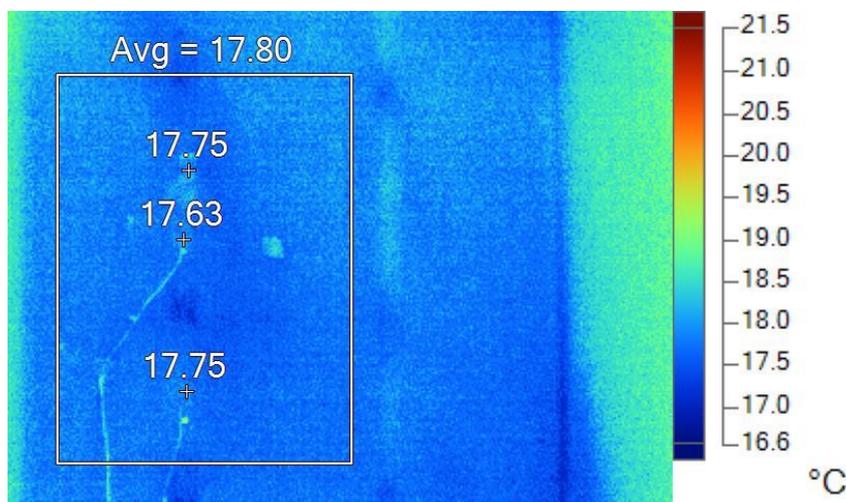


Рисунок. 2.8 Термограма встановлених сенсорів теплового потоку

На рисунку 2.8 квадратним маркером відображена зона контролю теплового опору та точковими маркерами позначені місця встановлення сенсорів. Виходячи з отриманих результатів різниця в зареєстрованих температурах не перевищує 0.2 К.

2.2 Математична модель кліматичної компоненти атмосферного метеорологічного поля при контролі теплового опору

Розглянуто математичну модель кліматичної компоненти метеорологічного поля при контролі теплового опору, з метою оцінювання

впливу динаміки зміни температури та інших метеорологічних параметрів, що впливають на теплообмін в будівлях, визначення задач математичного, комп'ютерного моделювання, та експериментальних досліджень [116].

На рисунку 2.9 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 [116].

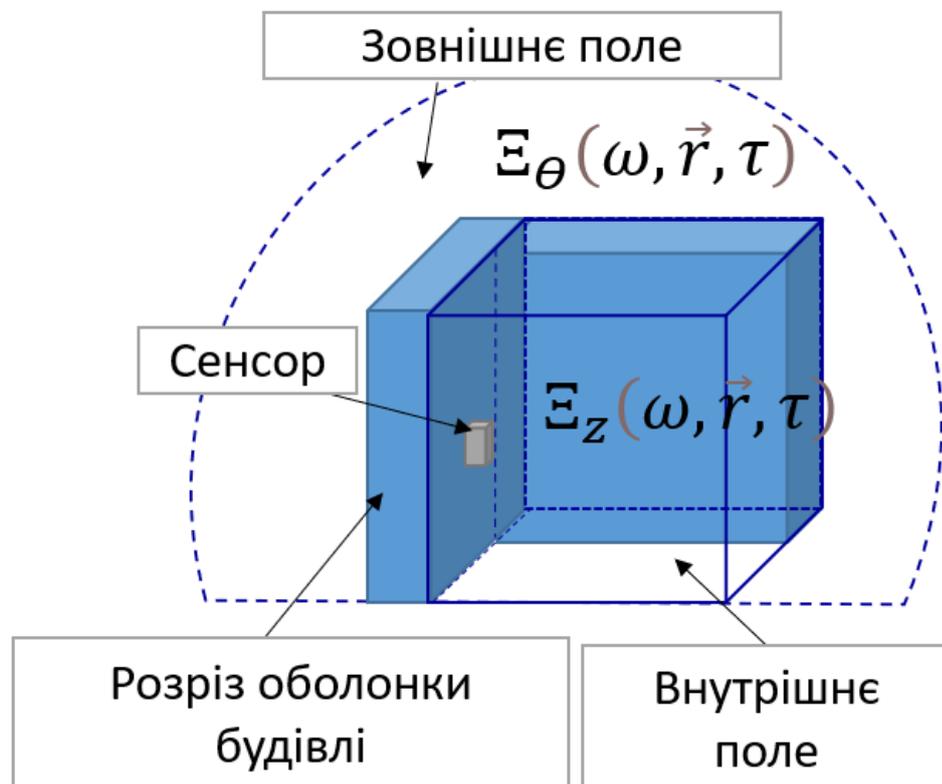


Рисунок 2.9 Схематична ілюстрація взаємозв'язку досліджуваного об'єкта, зовнішнього і внутрішнього полів інформативних параметрів та сенсора теплового потоку при проведенні комп'ютерного моделюючого експерименту [116]

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 [116]:

$$\begin{aligned} \Xi_{\theta}(\omega, \vec{r}, \tau) &= [\xi_T(\omega, \vec{r}, \tau), \xi_p(\omega, \vec{r}, \tau), \xi_v(\omega, \vec{r}, \tau), \xi_{RH}(\omega, \vec{r}, \tau)] & (2.1) \\ \omega &\in \Omega, \quad \vec{r} = (x, y, z) \in G \subset R^3, \tau \in T. \end{aligned}$$

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 (2.1) є відповідним кортежем

$$\theta = \langle T, P, V, RH \rangle, \quad (2.2)$$

де кожний елемент має характерний конкретний фізичний зміст, тобто являється фізичною величиною [116].

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 [116].

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

$$\Xi_z(\omega, \vec{r}, \tau) = L_z[\Xi_{\theta}(\omega, \vec{r}, \tau)] \quad (2.3)$$

Результати проведених досліджень підтвердили статистичну гіпотезу про характер моделі (1) на річному часовому інтервалі спостереження. Модель (2.1) допускає розкладання на такі три адитивні компоненти

$$\Xi_{\theta}(\omega, \vec{r}, \tau) = A_{\theta}(\vec{r}, \tau) + B_{\theta}(\vec{r}, \tau) + \zeta_{\theta}(\omega, \vec{r}, \tau) \quad (2.4)$$

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 [116].

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 [116]:

$$Z = \langle \lambda; RH; \varepsilon \rangle \quad (2.5)$$

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 [116].

2.3 Комп'ютерна модель теплообміну в характерній зоні оболонки будівлі

Модель випробування характерної ділянки оболонки будівлі побудовано за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX. Модель включає рідинну (fluid) та тверду розрахункові області. Шар повітря розглядався як рідинна область [116].

Геометрію досліджуваного об'єкту побудовано за допомогою підпрограми ANSYS Design Manager. Загальний вигляд 3D-моделі показано на рис.2.10

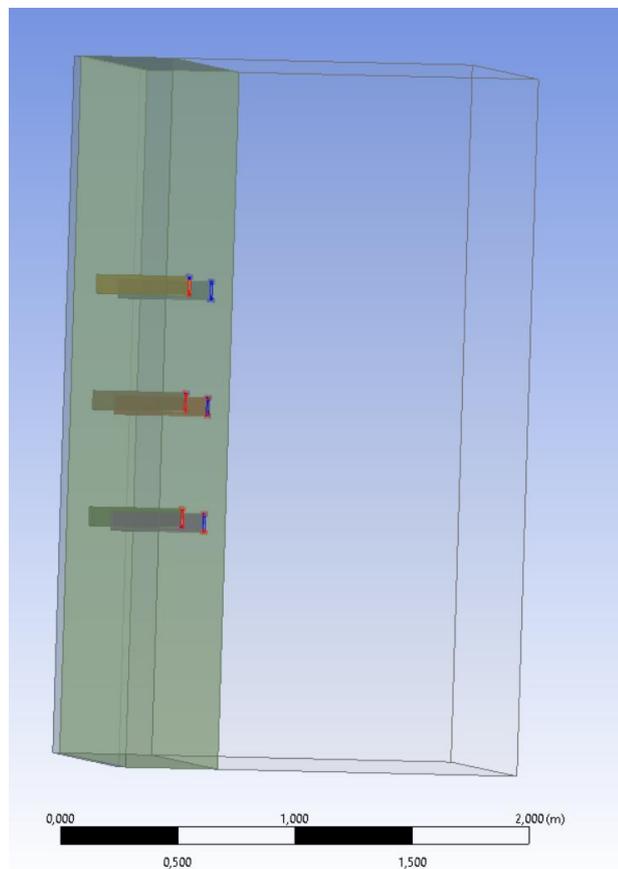


Рисунок 2.10 Загальний вид 3D-моделі характерної зони оболонки будівлі [116].

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 додано як окремі елементи сенсори теплового потоку. Для узгодження розрахункової сітки сформовано окремі зони, що співпадають за розмірами з сенсорами теплового потоку.

Для виконання CFD-моделювання використано неструктуровану комбіновану розрахункову сітку, побудовану за допомогою сіткового генератора ANSYS CFX Mesh (рисунок 2.11). Розрахункова сітка складалась з 2053866 елементів і 1446712 вузлів. Слід зазначити, що при цьому кожен сенсор теплового потоку складався з 43200 елементів та 51667 вузлів.

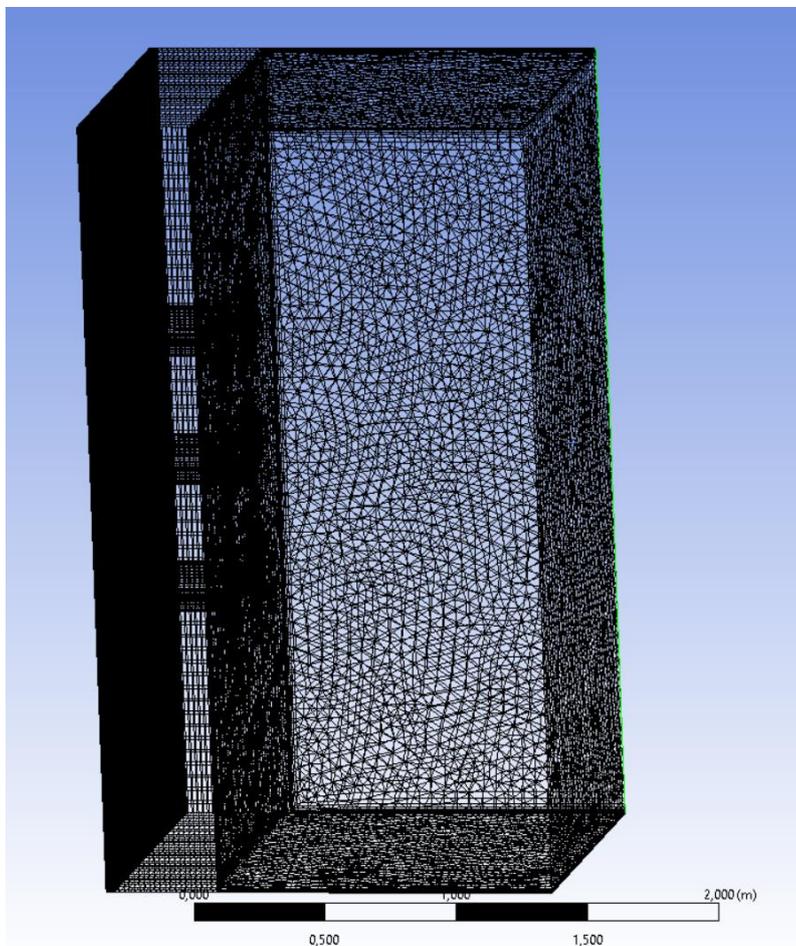


Рисунок 2.11 Розрахункова сітка комп'ютерної CFD моделі характерної зони оболонки будівлі [116].

Для проведення валідації даної моделі використані геометричні параметри та експериментальні дослідження, наведені в розділі 6 для випадку випробування 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-вимірювальної системи теплопровідності, яка відповідає вимогам ISO 8301 [16, 118 - 119]. Характеристики сенсорів теплового потоку визначені в публікації [121]. Питома теплоємність визначена за допомогою методу розглянутому в публікаціях [120, 122].

У використаній моделі тверді розрахункові області є шарами ППУ, бетонних блоків та сенсорами теплового потоку, характеристики яких наведені в таблиці 2.1. [116]

Таблиця 2.1 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 2.12) [116].



Рисунок 2.12 Комп'ютерна CFD модель характерної зони оболонки будівлі

Кондуктивний теплообмін між твердими розрахунковими областями описано за допомогою рівняння теплопровідності [104,105].

Радіаційний теплообмін описано за допомогою моделі дискретного переносу (Discrete Transfer), реалізований в ANSYS CFX. При цьому, для кожної області задано коефіцієнти емісії [123]. 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 [116,124].

Граничні умови задано таким чином:

- бічні стінки розглянуто в режимі адіабатизації $\lambda \frac{dT}{dx} = 0$ [124];

- 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 [113, 114, 124];

- 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 2.13 наведено поле швидкості у перерізах конструкції оболонки будівлі, отримані за результатами моделювання. Для вертикального положення показано поля у площині «XZ», які проходять через сенсори теплового потоку q_9 - q_{12} . [116]

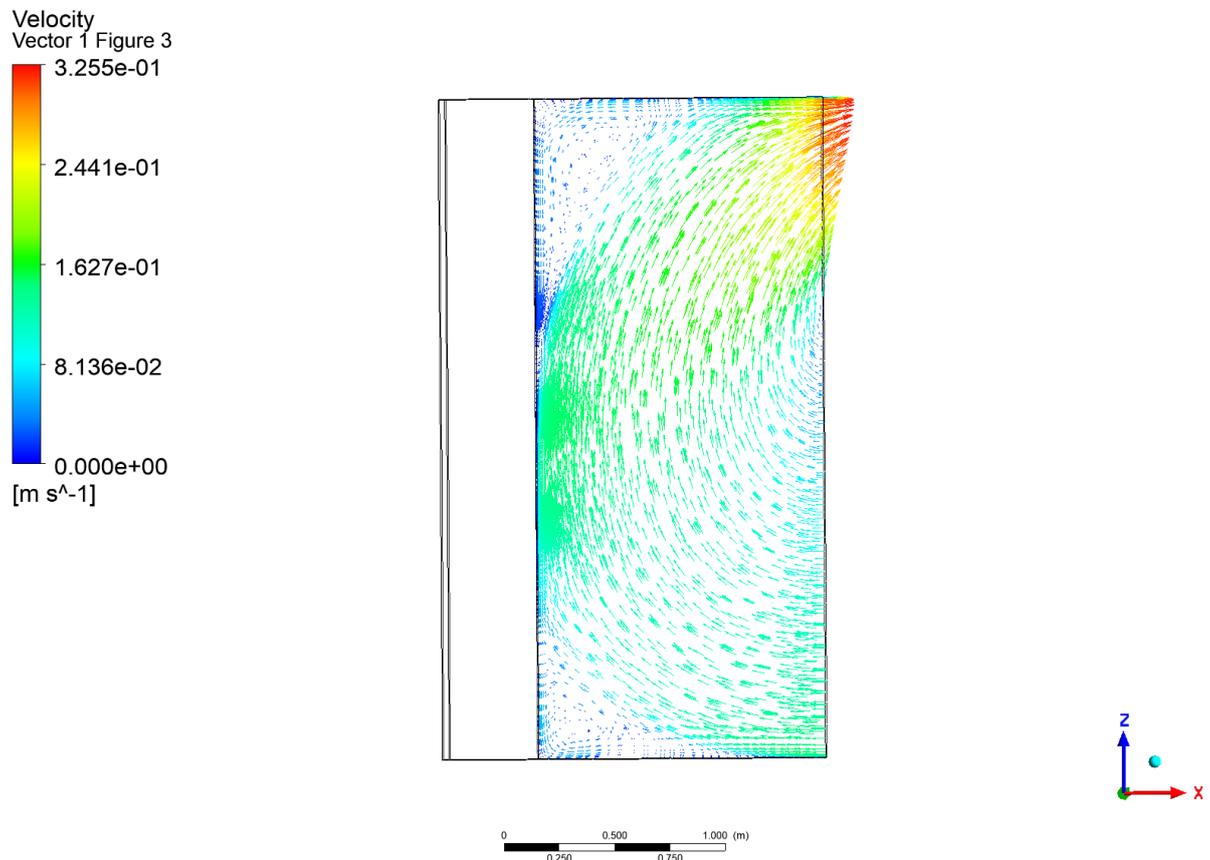


Рисунок 2.13 Векторне поле швидкості повітря у площині «XZ» (б), яке проходять через сенсори теплового потоку q_9 - q_{12} . [116]

У наведених на рисунку 2.13 полі швидкості повітря в перерізах конструкції теплозахисної оболонки будівлі в пристінковому шарі присутне

збільшення швидкості руху в зоні верхнього (q_{12}) та середнього сенсору (q_{11}), але при цьому швидкість повітря не перевищує 0,2 м/с. [116]

Розподіл температури у площині «XZ»), яке проходять через сенсори теплового потоку q_9 - q_{12} , наведений на Рис 2.14



Рисунок 2.14 Поле температури у площині «XZ», яке проходять через сенсори теплового потоку q_9 - q_{12} . [116]

Як зазначалося раніше важливим при аналізі, є вплив наявності сенсорів на результати вимірювання теплового потоку. Для цього побудовано перерізи по площі «ZX» та «XY» які проходять через центр сенсора q_9 . Зміна температурного поля поверхні стіни через встановлення сенсора q_9 показана на Рис 2.15 [116]

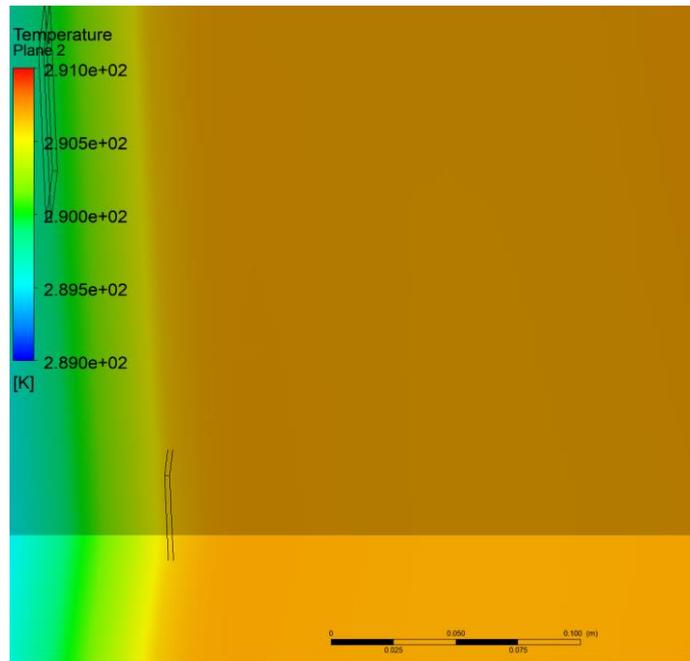


Рисунок 2.15 Поле температури у площині «XZ» та «XY», які проходять через центр сенсора q_9 . [116]

Розподіл температури на осях сенсора теплового потоку q_9 та поряд з ним наведені на рисунку 2.16

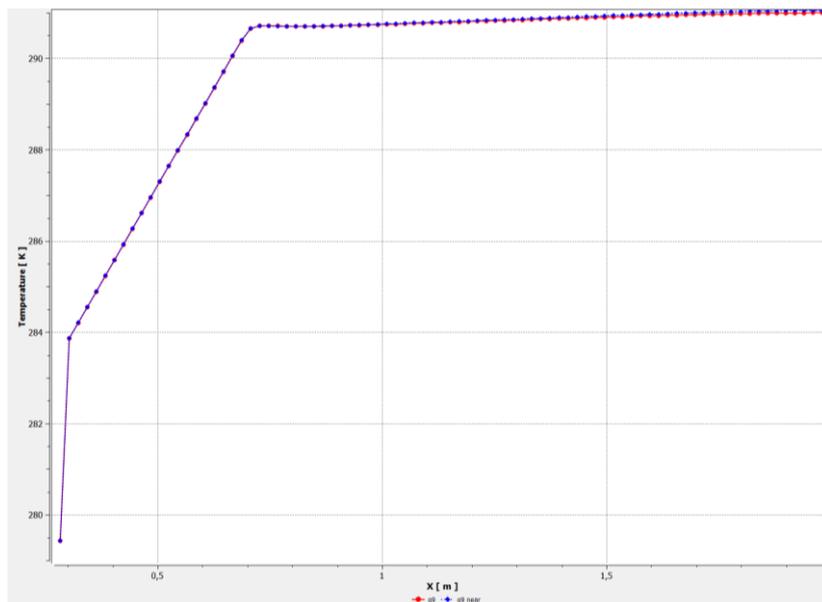


Рисунок 2.16 Розподіл температури по осях сенсора теплового потоку q_9

Виходячи з результатів розрахунків, проведених в Ansys CFX Post, максимальна різниця між значеннями температури сенсору, досліджуваної

поверхні в зоні поряд з сенсором і поверхнею оболонки не перевищує 0,02 К .[116]

Для валідації моделі були проведені розрахунки теплового опору з використанням формул (2.6) та (2.7):

$$R_C = \sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\lambda_i}, \quad (2.6)$$

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

$$R = \frac{T_{si} - T_{se}}{q}, \quad (2.7)$$

де T_{si} -температура внутрішньої поверхні теплозахисної оболонки будівлі, °С; T_{se} -температура зовнішньої поверхні теплозахисної оболонки будівлі, °С; q – густина теплового потоку крізь теплозахисну оболонку будівлі, Вт/м².

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

$$DEV = \left| \frac{R - R_C}{R_C} \right| \cdot 100 \%, \quad (2.8)$$

де R_C – теоретична величина теплового опору, розрахована згідно формули (2.6).

Розраховане за формулою (6) значення теплового опору становило $R_C=1,64$ (м²К) /Вт, що лише на 0,6% відрізняється від $R_{CFD} = 1,65$ (м²К) /Вт , отриманого за формулою (2.7) в CFD моделі. .[116]

На прикладі сенсора q9 наведено використання моделі для аналізу параметрів сенсорів теплового потоку.

Вплив зміни коефіцієнта емісії сенсора на результат вимірювання теплового потоку показано шляхом зміни коефіцієнта емісії сенсора q9 на 0,71, при цьому всі інші параметри CFD-моделі залишилися незмінними.

На Рисунку 2.17 представлений розподіл температури на осях сенсора теплового потоку та поряд з ним.

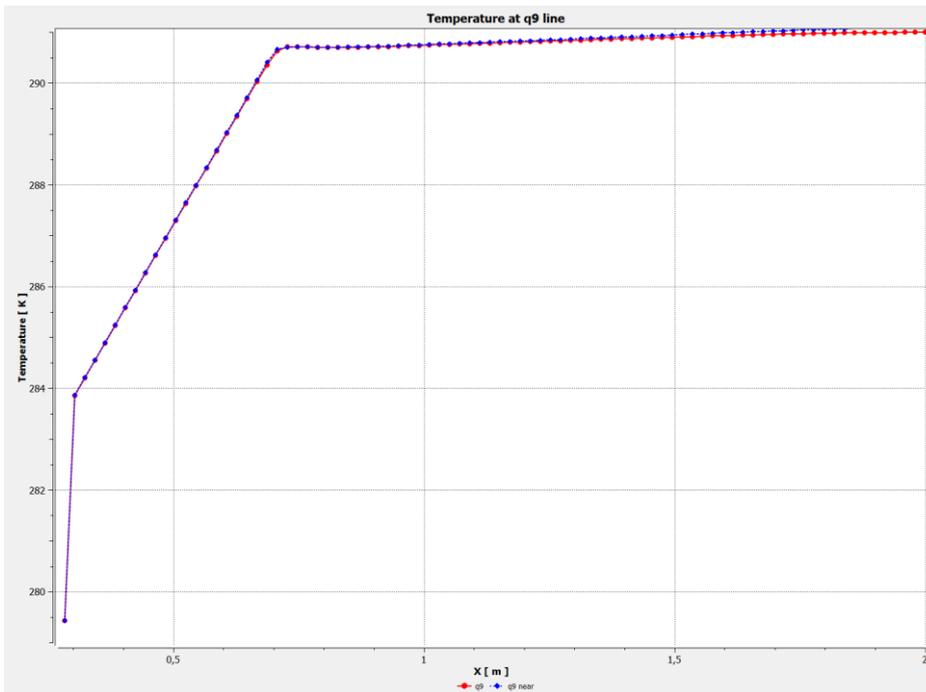


Рисунок 2.17 Розподіл температури по осях сенсора теплового потоку q9 при коефіцієнті емісії 0.71.[116]

Розрахунок теплових потоків показав, що при коефіцієнті емісії сенсора 0,88 густина теплового потоку становила 8,77 Вт/м², а при коефіцієнті емісії 0,71 - 7,6 Вт/м². Це призвело до різниці в результатах моделювання для цих випадків на 1,17 Вт/м .[116]

Виконано оцінювання впливу значення коефіцієнті емісії сенсору на результат визначення теплового опору огорожувальної конструкції шляхом проведення розрахунків за формулами (2.6-2.8). Результати порівняння даних експериментальних та модельних досліджень наведені в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 Порівняння результатів моделювання при різних значеннях коефіцієнта емісії.

Показник	R _C	R _{CFD}	R _{9CFD} , ε=0,88	R _{9CFD} , ε=0,71
Значення, (м ² 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 ~17.5%.

2.4 Математична модель компенсації впливу зміни температури об'єкту контролю та коригування результатів вимірювання теплового потоку

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 (Рисунок 2.18) [126].

Останній дає можливість вирівняти чутливість включених диференційно сенсорів теплового потоку. Відповідно для визначення поверхневої густини теплового потоку до значення вимірюваної сенсором величини додається сигнал пропорційний теплоті, яка йде на нагрів самого сенсора теплового потоку в процесі вимірювань, що визначається корегувальним блоком [126]:

$$q = q_{\text{сенсора}} + q_{\text{КОР}} \quad (2.9)$$

$$q_{\text{КОР}} = E_{\text{КОР}} \cdot K_{\text{КОР}} \cdot A \quad (2.10)$$

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

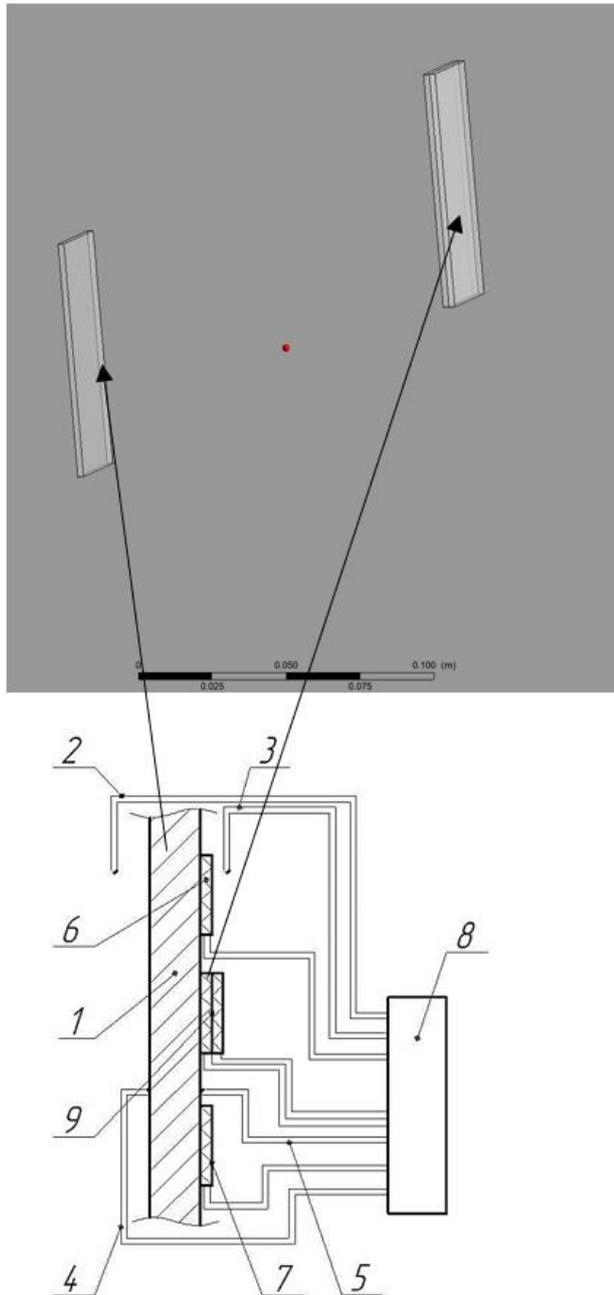


Рисунок 2.18 Схематичне зображення методу коригування результатів вимірювання теплового потоку [126] 1 - досліджуваний об'єкт; 2,3 - термоелектричні сенсори для реєстрування температури середовища із зовнішнього та з внутрішнього боку об'єкта; 4,5 - термоелектричні сенсори для реєстрування температури зовнішньої та внутрішньої поверхні; 6,7 -

сенсори теплового потоку; 8 - блок контролю, накопичування та опрацювання даних; 9 - коригувальний блок

Для аналізу впливу нестационарності процесу розглянуто задачу вимірювання густини теплового потоку на об'єкті, температура поверхні якого змінюється за лінійним законом (Рисунок 2.19) [51, 58, 126, 127, 128].

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.

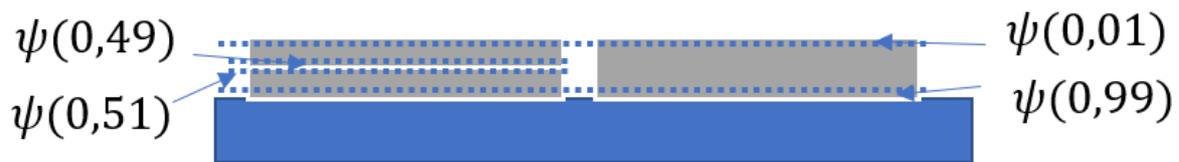


Рисунок 2.19 Теплова схема задачі вимірювання густини теплового потоку на об'єкті зі змінною температурою

Рішення задачі знаходиться як [51, 58, 126, 127, 128].:

$$T(\eta, \tau) = T_0 + q_0 \cdot (h/\lambda) \cdot \psi_1(\eta, \tau) + \psi_2(\eta; \tau) \cdot bT \cdot \frac{h^2}{a} \quad (2.11)$$

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

$$\psi(\eta; Fo) = \psi_1(\eta; Fo) + \psi_2(\eta; Fo) \cdot \phi \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \text{де } \psi_1(\eta; Fo) &= \eta - \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cdot \sin(\mu_k \eta) \cdot \exp(-\mu_k^2 \cdot Fo), \\ \psi_2(\eta; Fo) &= Fo - \eta - 0,5\eta^2 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{B_k}{\mu_k^2} \cdot \cos(\mu_k(1 - \eta)) \cdot \exp(-\mu_k^2 \cdot Fo), \end{aligned} \quad (2.13)$$

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

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

$$\mu_k = (2k - 1)\pi/2,$$

$$\phi = bT \cdot \frac{c\rho \cdot h}{q_0}, \quad (2.14) - \text{комплекс враховуючий нестационарність процесу,}$$

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

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

$c\rho$ – питома теплоємність сенсору;

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

Для сенсору теплового потоку відповідно рівнянню (2.11) можна записати [51, 58, 126, 127, 128]:

$$\frac{q_{\text{сенсора}}(1; Fo)}{q_0} = \psi(0,01; Fo) - \psi(0,99; Fo). \quad (2.15)$$

При цьому для коригувального блоку маємо [51, 58, 126, 127, 128]:

$$\frac{q_{\text{блок}}(1; Fo)}{q_0} = (\psi(0,01; Fo) - \psi(0,49; Fo)) - (\psi(0,51; Fo) - \psi(0,99; Fo)) \quad (2.16)$$

Результати розрахунку за формулою (2.14), представлені на рисунку 2.20, 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 (2.15), не досягає рівня 0,9 (рисунок 2.21), що призводить до заниження значень теплового потоку і вимагає додаткової корекції. З іншого боку, у випадку теплових потоків густиною від 10 Вт/м² при варіації швидкості зміни температури значення комплексу $\phi < 0,1$, що дає змогу використовувати сенсори без застосування корекції [51, 58, 126, 127, 128].

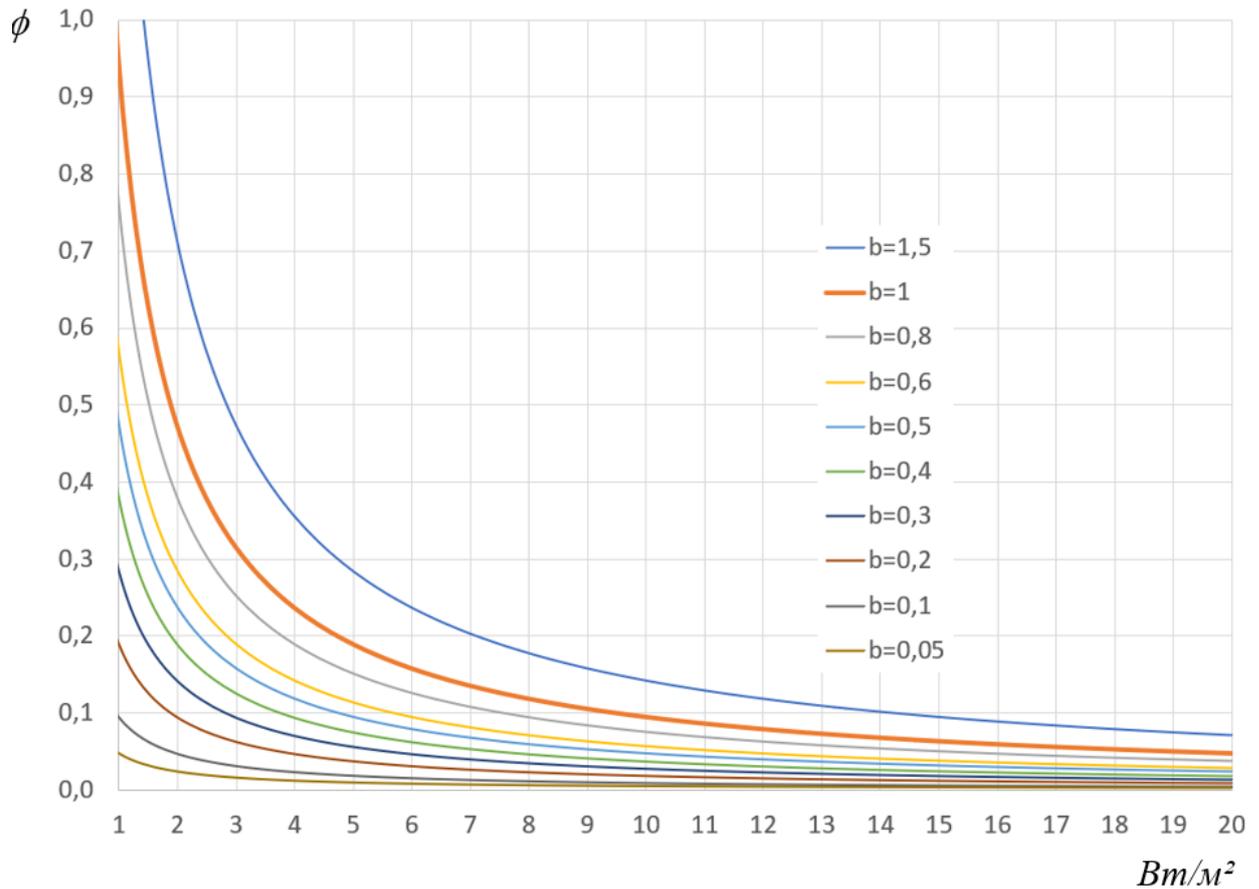


Рисунок 2.20. Залежність комплексу ϕ від густини теплового потоку, при варіації швидкості зміни температури bT

Сигнали коригуючого блоку, розраховані за формулою (2.16), наведені на рисунку 2.22, 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.

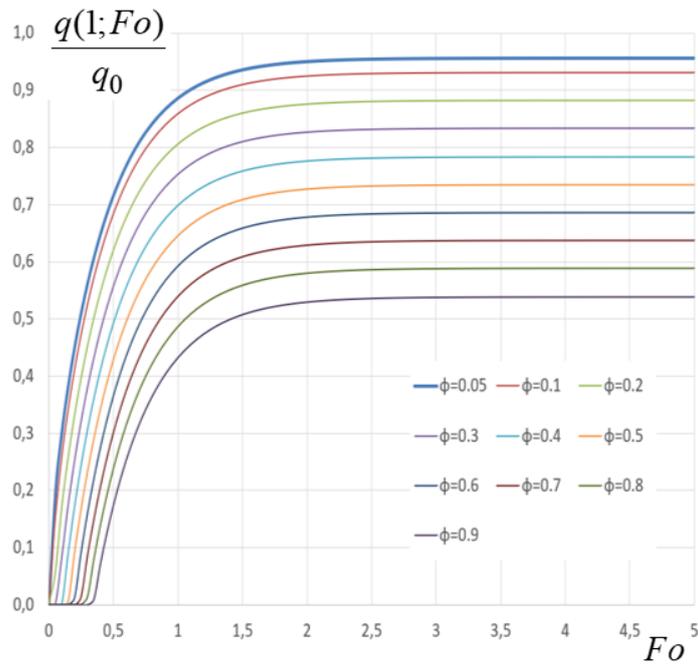


Рисунок 2.21 Залежність відносного теплового потоку від безрозмірного часу при варіації комплексу ϕ для сенсору теплового потоку

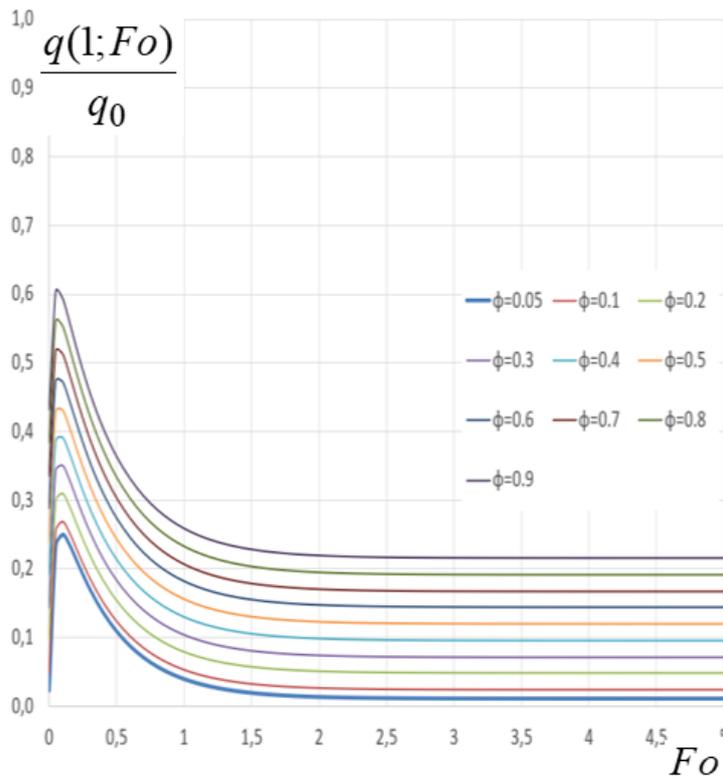


Рисунок 2.22 Залежність відносного теплового потоку від безрозмірного часу при варіації комплексу ϕ для коригувальної термобатарей

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

2.5 Математична модель сенсорів теплового потоку з теплометричною корекцією

Іншим можливим шляхом є створення спеціалізованих сенсорів, які вже будуть включати в себе коригуючу термобатарей, конструкції яких наведені на рисунку 2.22.

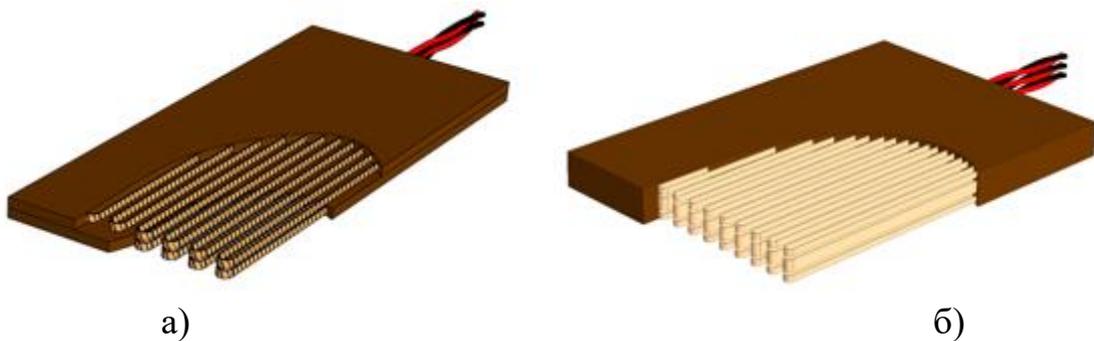


Рисунок 2.22. Варіанти конструкції сенсорів теплового потоку при використанні однієї (а) та двох (б) коригуючих термобатарей

Для цього розглянуто рішення задачі (2.11) з лінійною зміною температури, при зміні кількості термобатарей в сенсорі. Для випадку використання однієї коригуючої термобатарей (кількість перерізів $n=3$) [51, 58, 126, 127, 128].

$$\frac{q_{\text{сенсора}}(1;Fo)}{q_0} = \frac{3}{2} (\psi(0,99; Fo) - \psi(0,61; Fo)) - (\psi(0,59; Fo) - \psi(0,01; Fo)) \quad (2.17)$$

У випадку асиметричного сенсору з двома коригуючими термобатарейми (кількість перерізів $n=4$) маємо [51, 58, 126, 127, 128].

$$\frac{q_{\text{сенсора}}(1;Fo)}{q_0} = \frac{1}{12} (87(\psi(0,99; Fo) - \psi(0,81; Fo)) - 13(\psi(0,79; Fo) - \psi(0,21; Fo)) + 12(\psi(0,19; Fo) - \psi(0,01; Fo))) \quad (2.18)$$

Результати розрахунку за формулами (2.15, 2.17, 2.18) наведені на графіках, представлених на рисунку 2.23. З аналізу наведеного на рисунку графіку видно, що для випадку використання однієї коригуючої термобатарееї ($n=3$) 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 [51, 58, 126, 127, 128]..

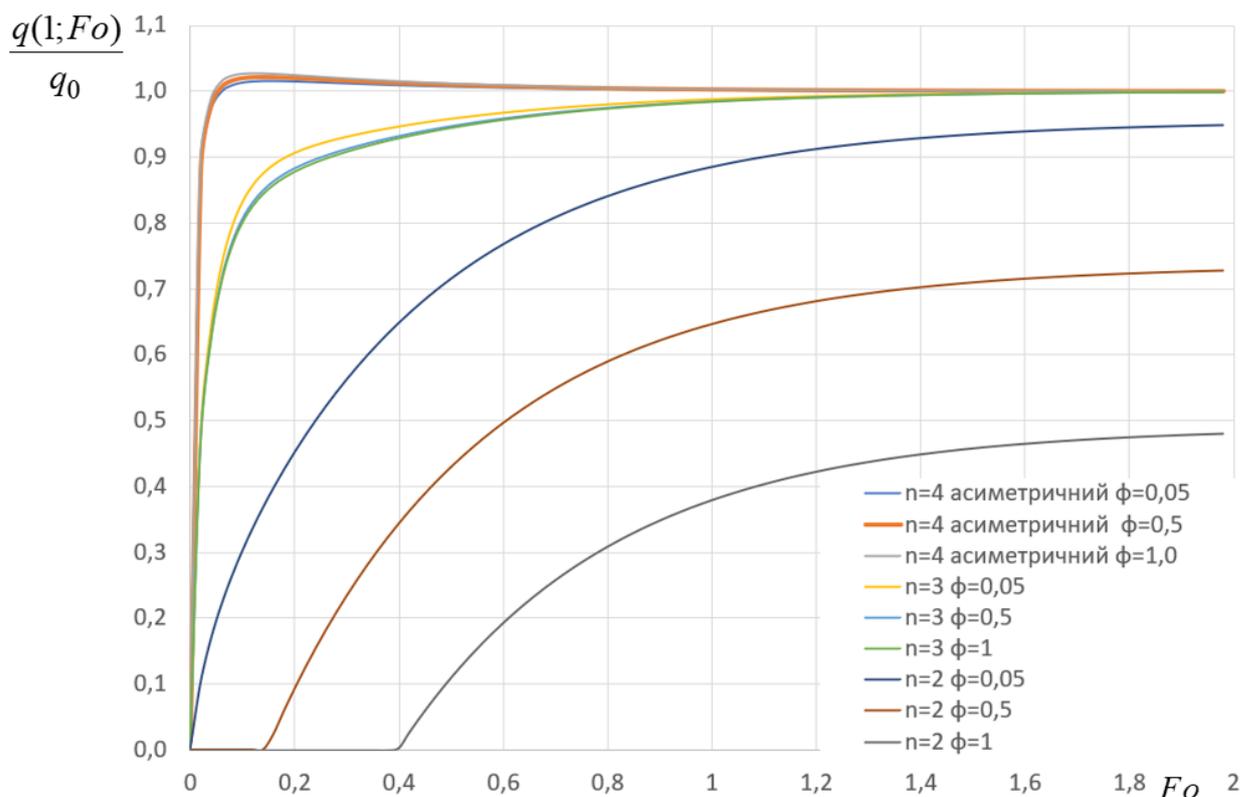


Рисунок 2.23 Залежність відносного теплового потоку від безрозмірного часу при варіації комплексу ϕ для трьох конструкцій сенсорів

Для асиметричного сенсору теплового потоку з двома коригуючими термобатарееями 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.

2.6 Висновки до розділу

Запропоновано новий концептуальний підхід до комплексного неруйнівного контролю теплофізичних характеристик матеріалів та виробів, який ґрунтується на моделях полів інформативних параметрів.

В роботі проведено комп'ютерне моделювання процесу складного радіаційного та конвективно-кондуктивного теплообміну при контролі теплофізичних характеристик оболонки будівлі з урахуванням місць встановлення сенсорів і впливу їх параметрів на результат контролю. Наведено у загальному виді опис процесу теплообміну оболонки будівлі з використанням математичної моделі діючого зовнішнього випадкового поля, оператора його перетворення, який характеризується теплофізичними властивостями оболонки будівлі та отриманого внутрішнього випадкового поля.

В результаті комп'ютерного моделювання процесу складного радіаційного та конвективно-кондуктивного теплообміну при контролі теплофізичних характеристик оболонки будівлі з урахуванням місць встановлення сенсорів і впливу їх параметрів на результат контролю отримано розподіл температури та поля швидкості повітря внутрішнього теплового поля, що дозволило встановити відсутність підвищеної турбулізації у зоні розташування сенсорів теплового потоку.

В роботі також показано, що при зменшенні коефіцієнта емісії сенсора на 0.16 одиниць різниця в значеннях теплового потоку крізь зону його встановлення складає більш ніж 2 Вт/м^2 . При цьому відхилення безпосередньо результату визначення теплового опору зовнішньої оболонки будівлі складає 17,51%.

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

Розвинуто науково-практичні засади створення нових сенсорів теплового потоку та удосконалено їхнє метрологічне забезпечення для виконання

вимірювань густини теплового потоку в діапазоні 1–10 Вт/м² та наявності дрейфу температури.

РОЗДІЛ 3. МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЕМІСІЇ ПОВЕРХНІ ОБ'ЄКТУ КОНТРОЛЮ

3.1 Диференційно калориметричний метод експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів

Цей метод може бути застосований для вимірювання інтегрального напівсферичного коефіцієнту емісії (коефіцієнту теплового випромінювання, коефіцієнту емісії, випромінювальної здатності) поверхні матеріалів та покриттів і може знайти застосування при контролі виробництва 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 [129]. Схема методу наведена на рисунку 3.1.

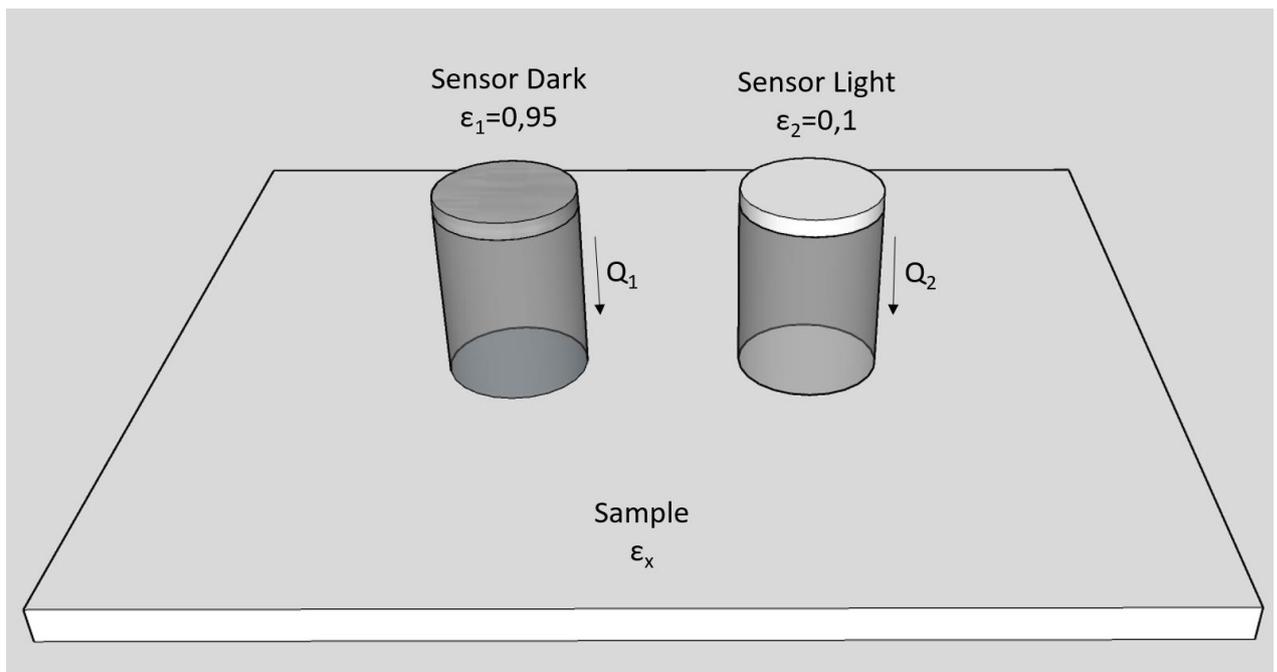


Рисунок 3.1 – Схема методу для вимірювання коефіцієнту емісії матеріалів

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 (3.1) та (3.2):

$$Q_1 = \varphi \cdot \sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_x \cdot (T_K^4 - T_{3P}^4) + K \cdot (T_K - T_{3P}), \quad (3.1)$$

$$Q_2 = \varphi \cdot \sigma \cdot \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_x \cdot (T_K^4 - T_{3P}^4) + K \cdot (T_K - T_{3P}), \quad (3.2)$$

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 (3.1) та (3.2) визначаються співвідношення (3.3) та (3.4) для коефіцієнту емісії зразка [129]:

$$\varepsilon_x = \frac{Q_1 - Q_2}{\varphi \cdot \sigma \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) (T_K^4 - T_{3P}^4)} = \frac{\gamma \cdot (Q_1 - Q_2)}{T_K^4 - T_{3P}^4}, \quad (3.3)$$

$$\text{або } \varepsilon_x = \gamma \cdot K_T \cdot \frac{(Q_1 - Q_2)}{\Delta T}, \quad (3.4)$$

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 проведено комп'ютерне CFD моделювання процесів складного радіаційного та конвективно-кондуктивного теплообміну як в кожній окремій вимірювальній комірці, так і в прототипі приладу.

3.2 Комп'ютерна модель процесів теплообміну в вимірювальній комірці приладу для контролю коефіцієнту емісії

На першому етапі проведено комп'ютерне моделювання радіаційного та конвективно-кондуктивного теплообміну в окремій комірці запропонованого диференційно калориметричного методу експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів [130,131].

Об'єкт дослідження представляє собою замкнену циліндричну порожнину, яка моделює комірку приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів. Порожнина заповнена атмосферним повітрям. Радіус циліндру становить $r = 10$ мм, висота $H = 30$ мм. Одна з торцевих поверхонь (сенсор) нагрівалася, а інша (зразок) сприймала теплоту (радіаційну, кондуктивну та конвективну).

Для проведення дослідження побудовано комп'ютерну модель об'єкту дослідження (рис. 3.2), яка складалася з однієї рідинної та двох твердих розрахункових областей. Рідинна розрахункова область мала циліндричну форму діаметром 20 мм та висотою 30 мм. З одного боку знаходиться тверда підобласть діаметром 20 мм та висотою 2 мм, яка є моделлю сенсора, а з іншого боку розташована тверда підобласть діаметром 120 мм та висотою 30 мм, що виконує роль дослідного зразка, який виконаний з дюралю. Ці три підобласті з'єднані інтерфейсними зв'язками для забезпечення умови сталості теплових потоків на межі кожної підобласті рідина-тверде тіло.

Розрахунки проводились за допомогою програмного комплексу *ANSYS CFX*. Геометрію досліджуваного об'єкту побудовано за допомогою підпрограми *ANSYS Design Manager*.

Граничні умови. На зовнішній поверхні сенсора задавалася стала температура у 30°C , а на зовнішній поверхні зразка задавалася стала температура у 20°C . Інші поверхні в розрахунках приймалися адіабатними [130,131].

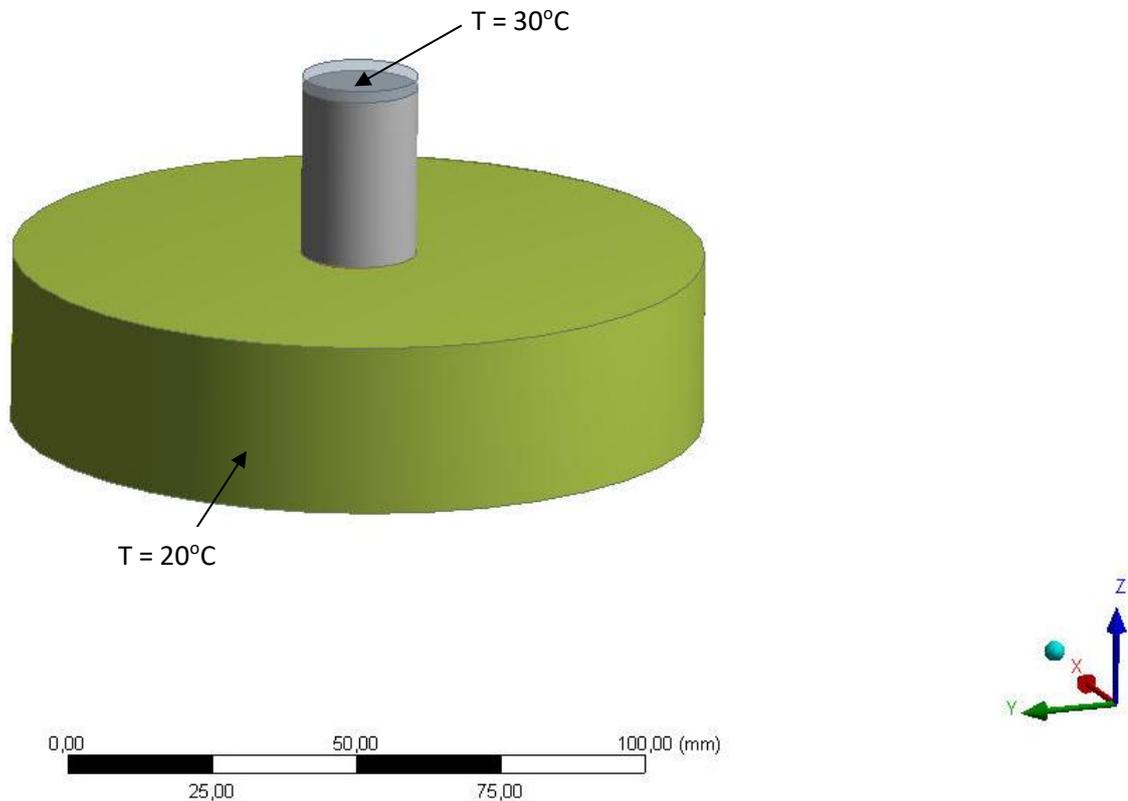


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд 3D-моделі комірки приладу [130,131]

Для виконання CFD-моделювання використано структуровану розрахункову сітку, побудовану за допомогою сіткового генератора *ANSYS CFX Mesh* (рис. 3.3). Розрахункова сітка складається з гексадральних елементів в середині розрахункової області, що відображено на осьовому перерізі (рис. 3.4), з призматичними елементами в областях згущення розрахункової сітки біля стінок рідинної підобласті [130,131] (рис. 3.5). Проведено попередні дослідження щодо впливу на якість сітки способу задання згущення біля твердих стінок [132, 133]. В результаті проведеного аналізу виявлено, що найбільш оптимальним способом задання згущення є метод *Гладкого переходу шару* зі значенням співвідношення переходу 0,2.

Загальний розмір розрахункової сітки складав 107 тис. вузлів та 102 тис. елементів.

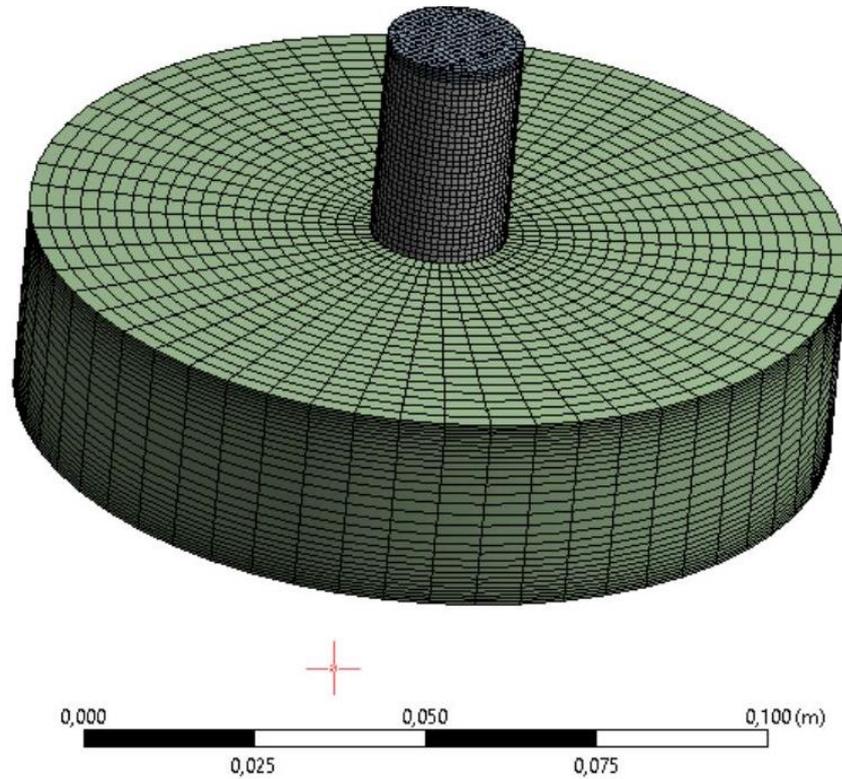


Рисунок 3.3 – Зовнішній вигляд розрахункової сітки комірки приладу [130,131]

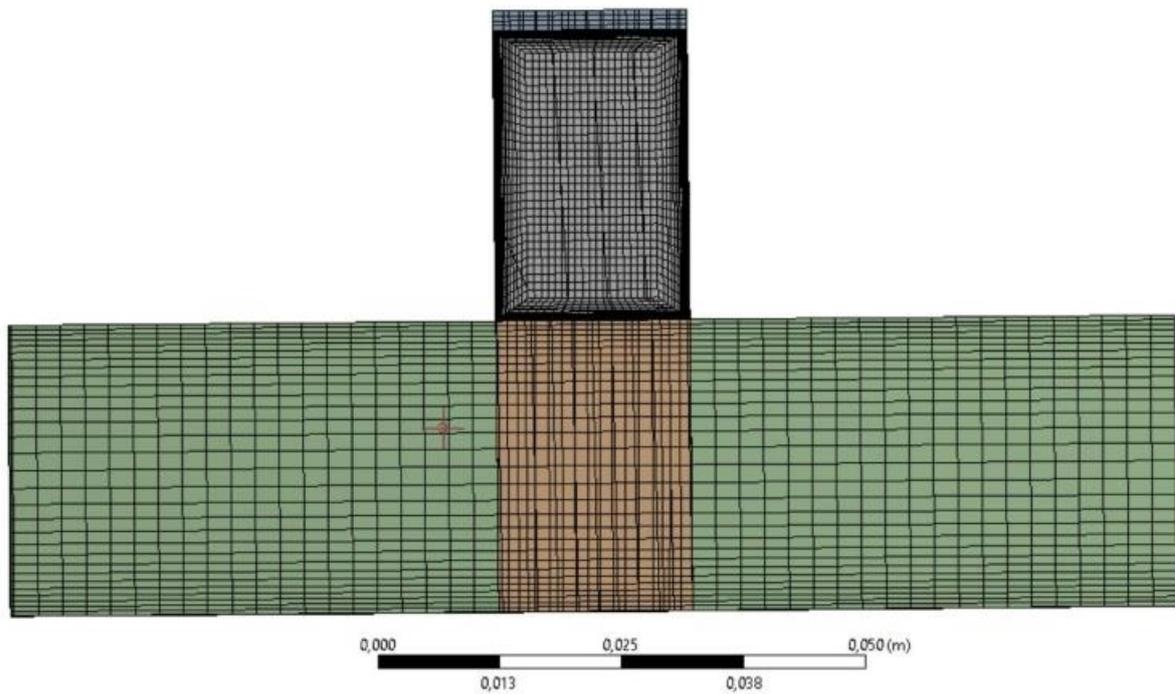


Рисунок 3.4 – Осьовий переріз розрахункової сітки комірки приладу [130,131]

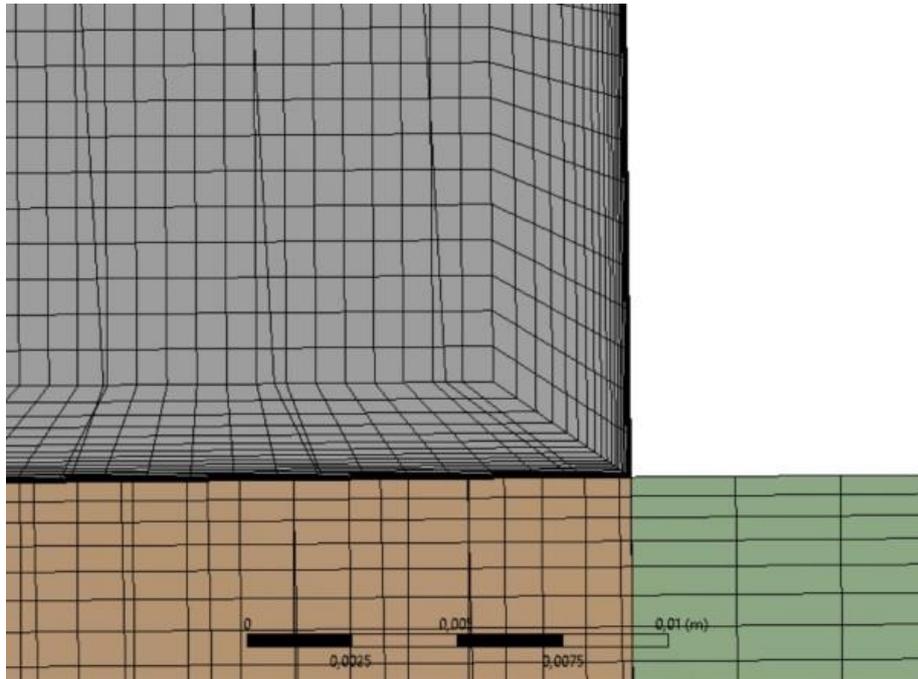


Рисунок 3.5 – Пристінкова область розрахункової сітки комірки приладу[130,131]

Властивості повітря в рідинній підобласті вважаються сталими і взяті для температури 25 С.

Рівняння Нав'є-Стокса (3.5) з рівнянням нерозривності (3.6) вирішувались для в'язкого теплопровідного газу в стаціонарній постановці з використанням в якості моделі теплообміну повного рівняння збереження енергії (3.7) для випадку ламінарного режиму течії [130,131].

$$(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\Delta\vec{v} + \vec{f} \quad (3.5)$$

$$\nabla\vec{v} = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{dT}{dx}u + \frac{dT}{dy}v + \frac{dT}{dz}w = a\nabla^2T, \quad (3.7)$$

де \vec{v} – векторна швидкість;

p – тиск;

T – температура;

u, v, w – компоненти швидкості;

a – температуропровідність;

ν – кінематична в'язкість;

ρ – густина;

f – зовнішня питома сила;

∇ – оператор Гамільтона;

Δ – оператор Лапласа.

Вплив гравітації враховувався шляхом завдання відповідного значення в залежності від орієнтації зразка. Радіаційний теплообмін розглядався за допомогою моделі Дискретного Переносу (Discrete Transfer) [123].

Досліджені варіанти комірки приладу наведено на рисунку 3.6. Варіант 1 характеризувався коефіцієнтом емісії поверхні сенсора $\epsilon_1 = 0,95$ (позначений «dark»). Варіант 2 характеризувався коефіцієнтом емісії поверхні сенсора $\epsilon_1 = 0,1$ (позначений «light»). Координата площини сенсора дорівнювала $Z = 0,03$ м. В розрахунках змінювався коефіцієнт емісії зразка ϵ_2 – в діапазоні від 0,05 до 1,0.

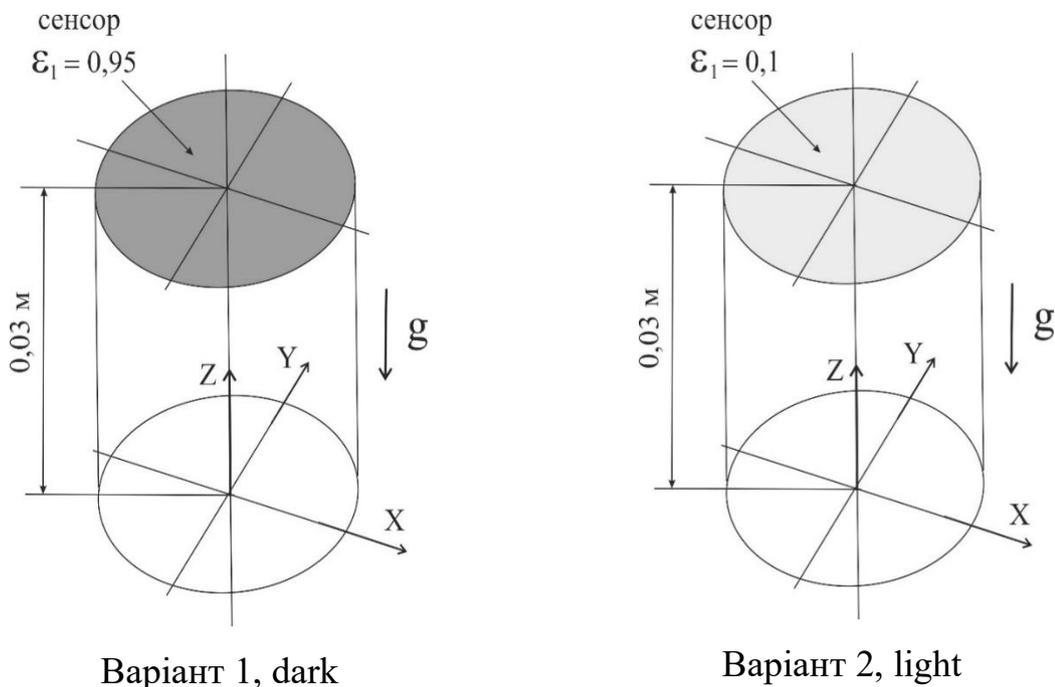
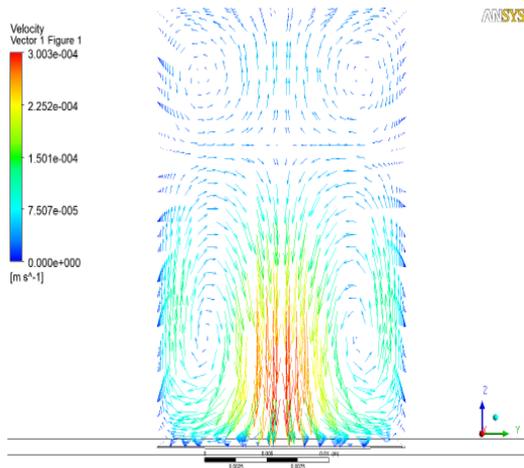
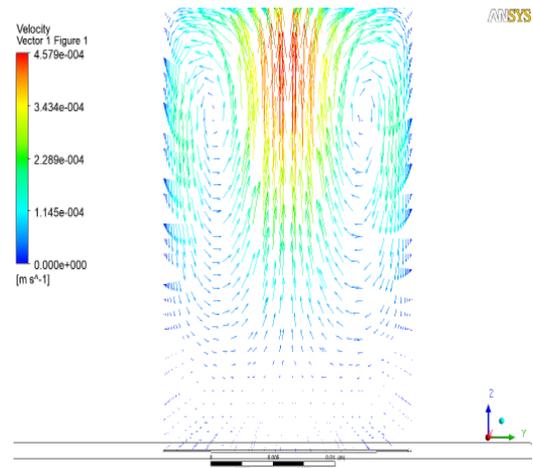


Рисунок 3.6 – Схеми варіантів комірок приладу «dark» і «light»

На рис. 3.7 та 3.8 наведено векторні поля швидкості у центральних поздовжніх перерізах циліндру. Для вертикального положення показано поля у площині «YZ». [130,131]



Варіант 1, dark

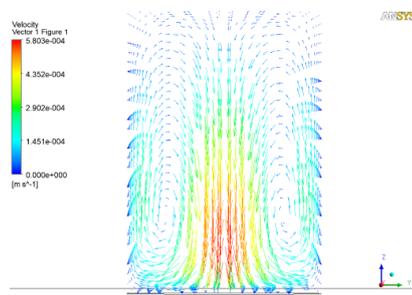
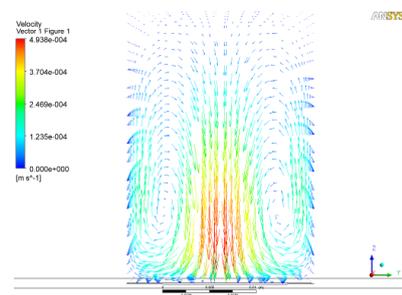
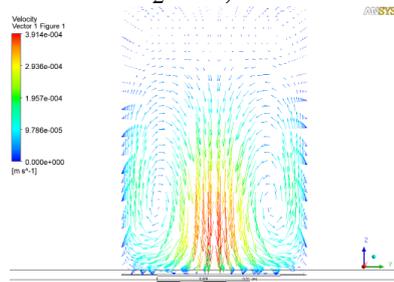
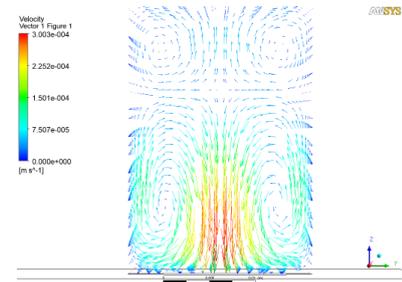


Варіант 1, light

Рисунок 3.7 – Векторні поля швидкості у площині «YZ» для вертикального положення циліндру при коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon_2=0,6$ [130,131]

Для випадку верхнього підведення теплоти утворюються дві тороподібні вихрові пари, причому їх розміри змінюються при зміні коефіцієнту емісії зразка (рис. 3.7). Вплив коефіцієнта емісії на гідродинаміку повітря пов'язаний з тим, що у властивості повітря включено коефіцієнт поглинання випромінювання, який дорівнює 0,01.

Поглинання випромінювання змінює температурне поле повітряного середовища, що впливає на конвекцію всередині об'єму (рис. 3.8).

 $\varepsilon_2 = 0,05$  $\varepsilon_2 = 0,2$  $\varepsilon_2 = 0,4$  $\varepsilon_2 = 0,6$

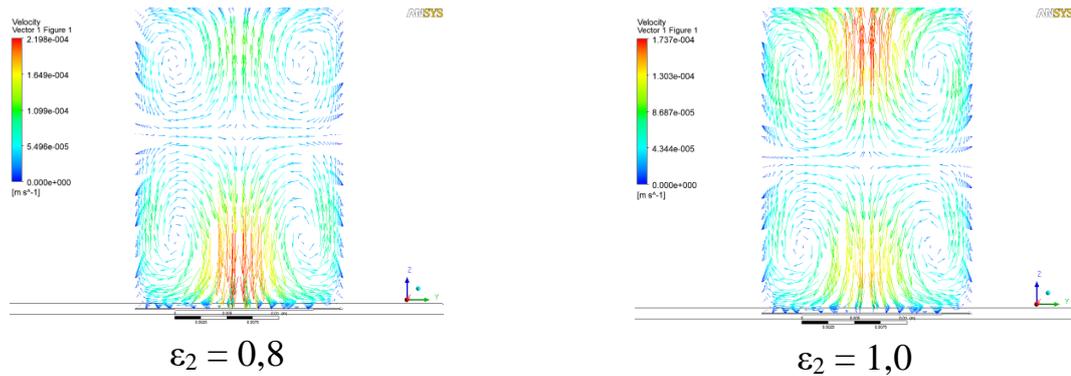


Рисунок 3.8 – Вплив коефіцієнта емісії на гідродинаміку потоку повітря в комірці для варіанту 1 (dark) [130,131]

На рис. 3.9 наведено поздовжній розподіл температури повітря в комірці по осі «Z» для досліджених варіантів. З графіків наведених на рисунку 3.9 визначається, що характер розподілу є близьким до лінійного. Також слід відзначити, що попарні варіанти «dark» та «light» відрізняються кількісно: в першому випадку рівень температури на половині координати «Z» дещо вищий, це незначним чином, але впливає на конвективний тепловий потік, оскільки змінюється поздовжній градієнт температури повітря. [130,131]

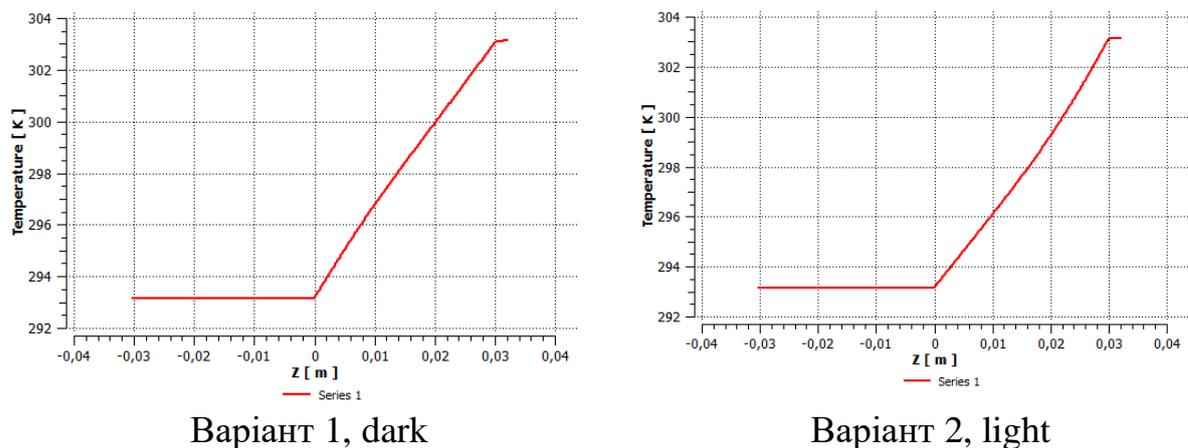
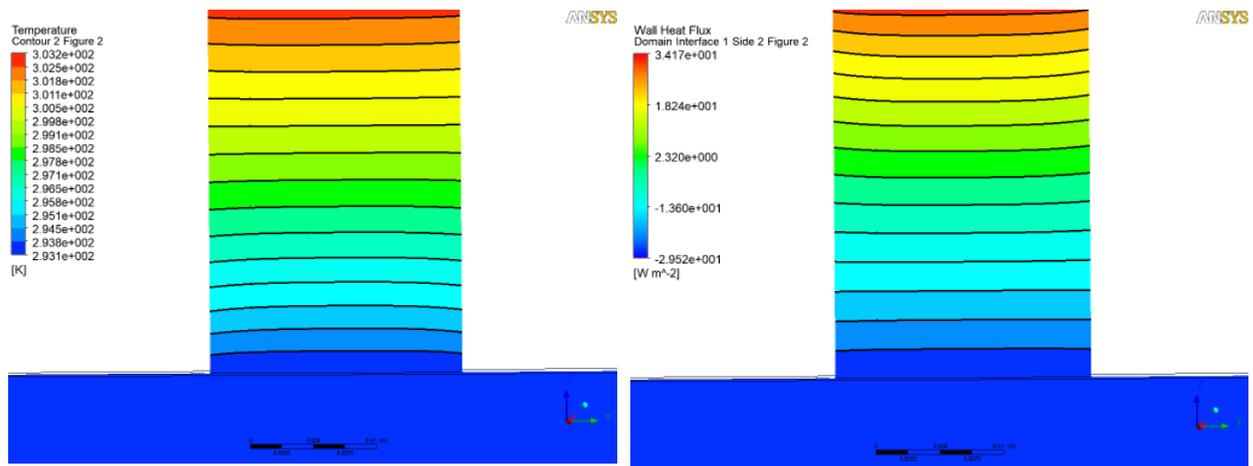


Рисунок 3.9 – Розподіл температури повітря по осі циліндричної комірки при значенні коефіцієнта емісії зразка $\varepsilon_2 = 0,6$

На рисунку 3.10 наведено температурні поля у центральних поздовжніх перерізах циліндру. Для випадку верхнього підводу теплоти воно практично рівномірне.



Варіант 1, dark

Варіант 2, light

Рисунок 3.10 – Температурне поле в порожнині у площині «YZ» для вертикального положення комірки при коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon_2 = 0,6$

В розрахунках визначались три інтегральні теплові потоки з поверхні сенсора: загальний, конвективно-кондуктивний та радіаційний: $Q_{\Sigma} = Q_c + Q_R$. Отримані значення інтегральних теплових потоків зведено в таблиці 3.1. [130,131]

Таблиця 3.1 – Значення інтегральних теплових потоків в комірках «dark» та «light» при варіації коефіцієнта емісії

Варіант	ε_2	Загальний тепловий потік Q_{Σ} , Вт	Конвективний тепловий потік Q_c , Вт	Радіаційний тепловий потік Q_R , Вт
№1 Dark sensor «-g» $\varepsilon_1 = 0,95$	0,05	4,544 E-03	1,931 E-03	2,613 E-03
	0,2	6,713E-03	2,084E-03	4,544 E-03
	0,4	9,348E-03	2,260E-03	7,088E-03
	0,6	1,198E-02	2,408E-03	9,571E-03
	0,8	1,429E-02	2,546E-03	1,174E-02
	0,95	1,592E-02	2,634E-03	1,329E-02
	1,0	1,622E-02	2,669E-03	1,356E-02
№2 Light sensor «-g» $\varepsilon_1 = 0,10$	0,05	3,435E-03	2,579E-03	8,567E-04
	0,2	4,037E-03	2,888E-03	1,149E-03
	0,4	4,444E-03	3,111E-03	1,333E-03
	0,6	4,690E-03	3,240E-03	1,450E-03
	0,8	4,833E-03	3,305E-03	1,528E-03
	1,0	4,966E-03	3,372E-03	1,594E-03

На рисунку 3.11 показано залежності зазначених теплових потоків від коефіцієнта емісії для досліджених варіантів.

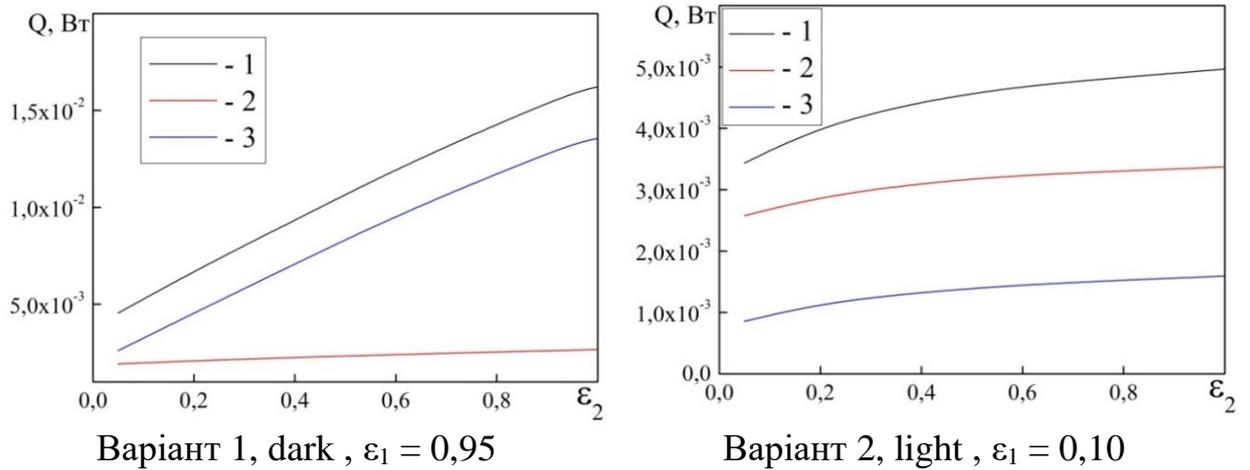
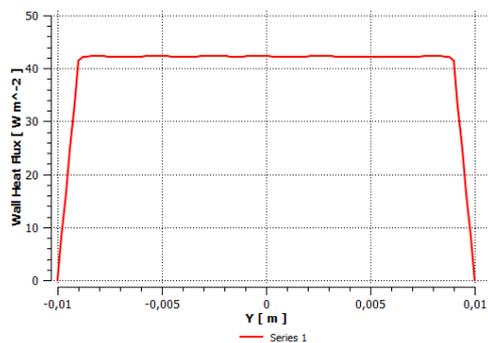


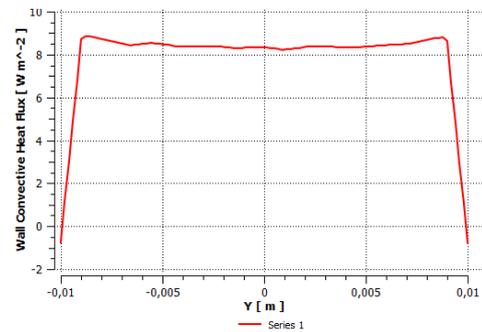
Рисунок 3.11 – Інтегральні теплові потоки з поверхні сенсора: 1 – загальний, 2 – конвективно-кондуктивний, 3 – радіаційний

Виходячи з наведених даних рис. 3.11, при значенні коефіцієнта емісії сенсора $\epsilon_1 = 0,95$ радіаційний тепловий потік перевищує конвективний. При значенні коефіцієнта емісії сенсора $\epsilon_1 = 0,10$ радіаційний тепловий потік значно менший за конвективний. [130,131]

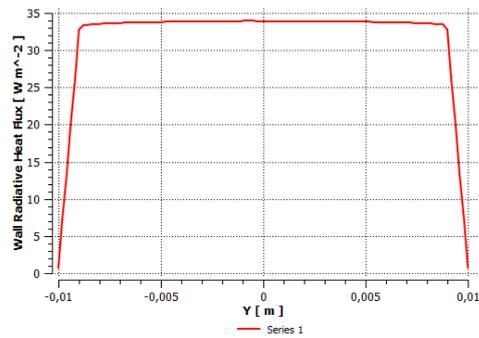
Розподілення питомих теплових потоків ($\text{Вт}/\text{м}^2$) за діаметром сенсора (вісь « Y ») при значенні коефіцієнта емісії зразка $\epsilon_2 = 0,6$ наведено на рис. 3.12 і рис. 3.13.



а

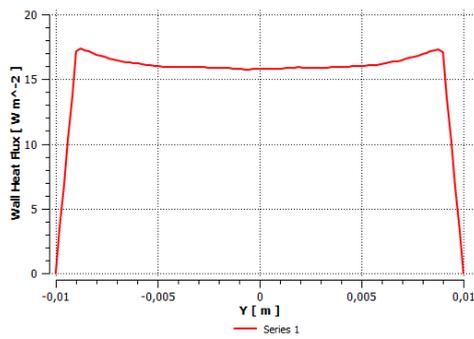


б

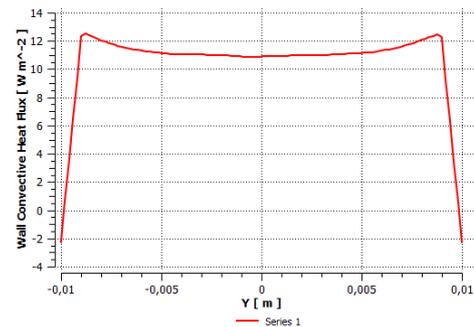


В

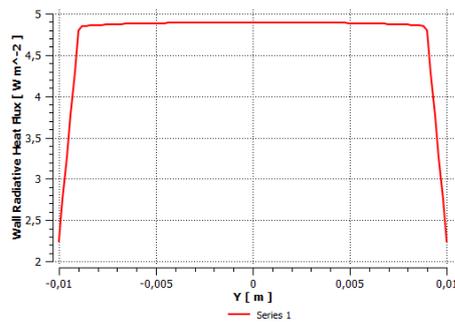
Рисунок 3.12 – Розподілення питомого теплового потоку по осі «Y» для випадку (dark, $\epsilon_1 = 0,95$): а, б, в – загальний, конвективно-кондуктивний та радіаційний теплові потоки відповідно



а



б



в

Рисунок 3.13 – Розподілення питомого теплового потоку по осі «Y» для випадку (light, $\epsilon_1 = 0,10$): а, б, в – загальний, конвективно-кондуктивний та радіаційний теплові потоки відповідно

Як видно із рисунків, при розташуванні сенсорів та нагріві комірки зверху, загальний тепловий потік в центральній зоні ($0,005 \text{ м} < Y < 0,005 \text{ м}$) є практично рівномірним. [130,131]

3.2.1 Комп'ютерна модель процесів теплообміну при різних можливих варіантах розташування вимірювальної комірки приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів

Окрім розробки основної комп'ютерної моделі з вертикальним розташуванням осі циліндричної комірки, додатково проведено розрахунки з розташуванням сенсорів у нижній площині та горизонтальним розташуванням (рис. 3.14), що надає розширені можливості використання приладу.

Розрахунки проводились використовуючи отриману раніше розрахункову сітку та граничні умови.

Вісь «Z» була направлена від зразка, координата $Z = 0$ відповідала площині зразка, яка сприймає променевий потік. Координата площини сенсора дорівнювала $Z = 0,03$ м. Варіанти позначались «g+», тобто для них вектор сили тяжіння співпадав з напрямком координати «Z». Варіанти з горизонтальним розташуванням осі позначались як «horizon dark» та «horizon light», для них вектор сили тяжіння направлено протилежно осі «X».

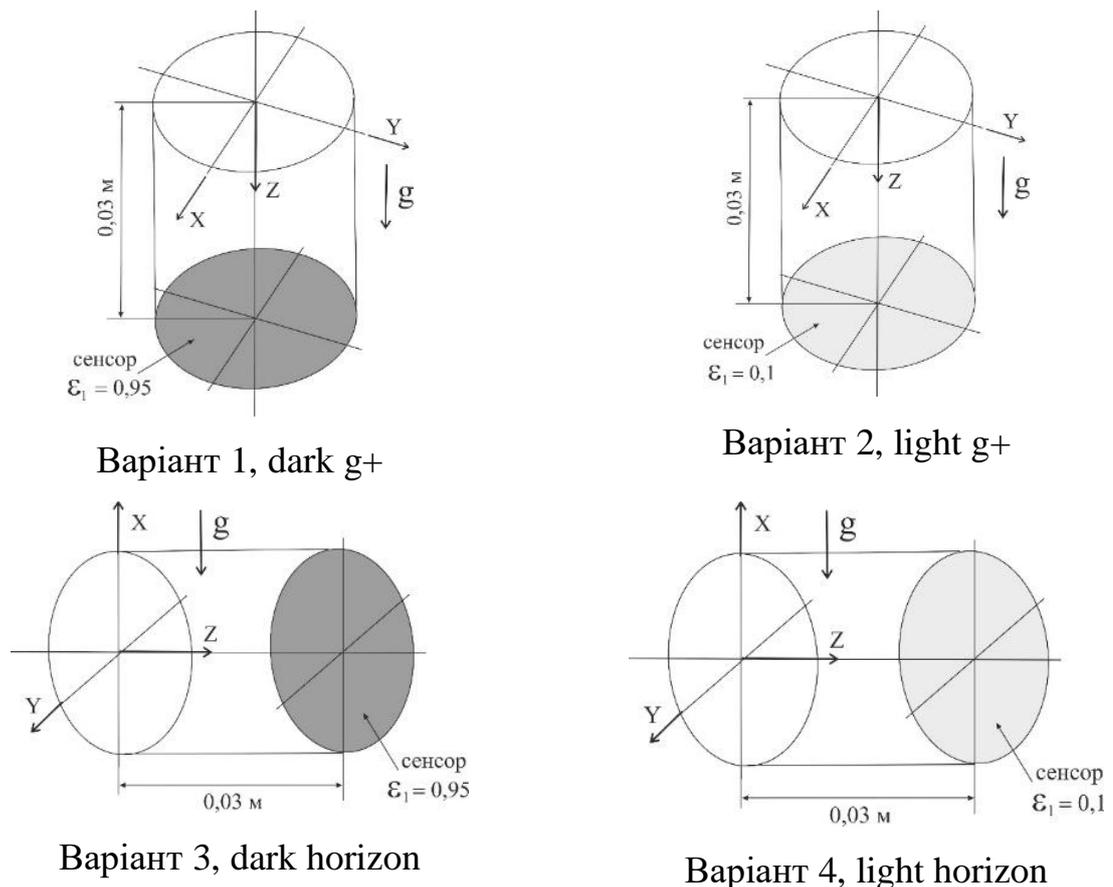


Рисунок 3.14 – Схеми варіантів розташування комірок приладу[130,131]

На рисунках 3.15 і 3.16 наведено векторні поля швидкості у центральних позовжніх перерізах циліндру.

Для вертикального положення (варіанти 1, 2) показано поля у площині «YZ», а для горизонтального положення (варіанти 3, 4) поля показано у двох площинах: вертикальній «XZ» та горизонтальній «YZ».

Виходячи з результатів моделювання наведених на рисунках, картина течії для різних варіантів суттєво відрізняється. Для випадків вертикального розташування циліндру (рис. 3.15) з нижнім підведенням теплоти (варіанти 1, 2) має місце один діагональний вихор. [130,131]

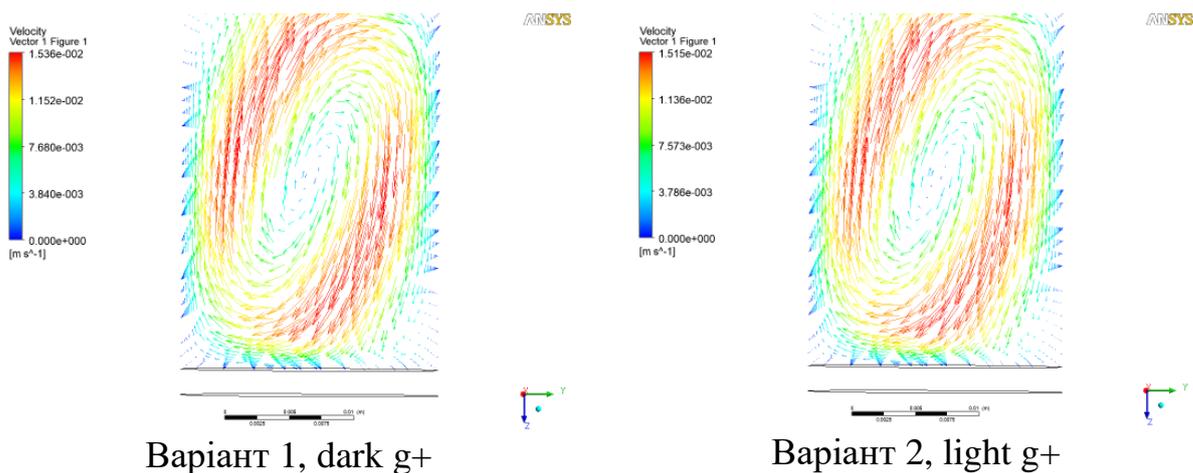
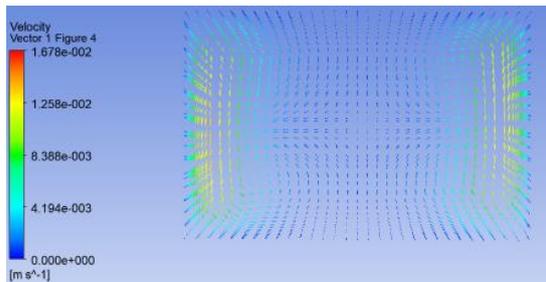
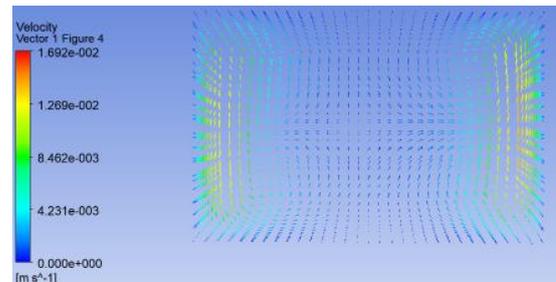


Рисунок 3.15 – Векторні поля швидкості у площині «YZ» для вертикального положення циліндру при коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon_2 = 0,6$

Векторні поля швидкості для варіантів 3 та 4 (горизонтальне положення циліндру) показано на рис. 3.16 (а, б). Картина течії в вертикальному перерізі (площина «XZ») аналогічна картині течії для варіантів 1 та 2 (g+), коли має місце один діагональний вихор. В горизонтальному перерізі (площина «YZ») спостерігаються два вихори поблизу торцевих поверхонь. Тобто, має місце складна тримірна структура течії. Зміна коефіцієнта емісії зразка практично не впливає на якісну картину течії. [130,131]

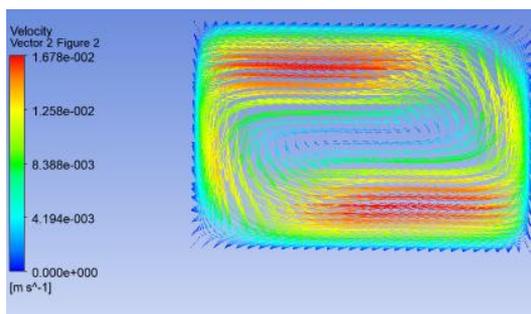


Варіант 3, dark horizon

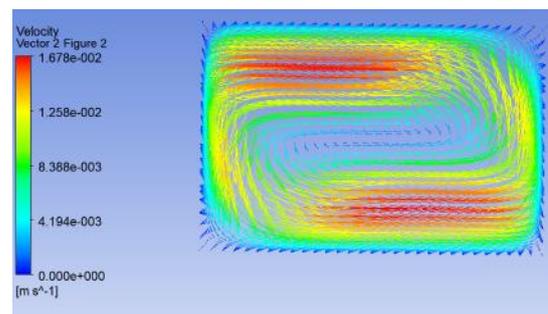


Варіант 4, light horizon

Рисунок 3.16 а – Векторні поля швидкості у горизонтальній площині «YZ» для горизонтального положення циліндру при значенні коефіцієнта емісії зразка $\varepsilon = 0,6$ [130,131]



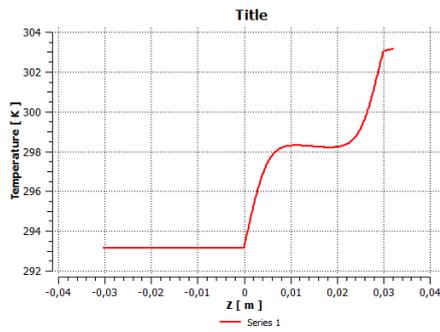
Варіант 3, dark horizon,



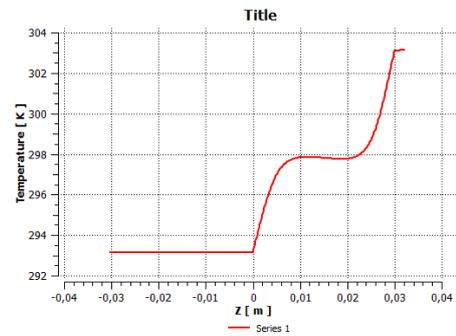
Варіант 4, light horizon,

Рисунок 3.16 б – Векторні поля швидкості у вертикальній площині «XZ» для горизонтального положення циліндру при коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon = 0,6$ [130,131]

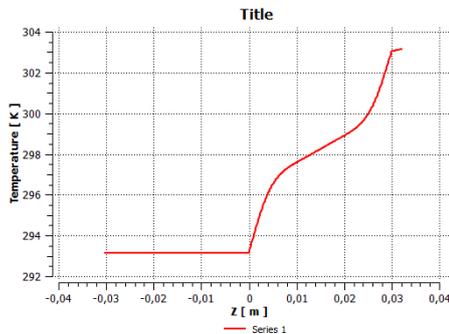
На рисунку 3.17 наведено поздовжній розподіл температури повітря в порожнині по осі «Z» для досліджених варіантів. Як видно із рисунка, для розглянутих варіантів графіків має місце точка перегину. Також слід відзначити, що попарні варіанти «dark» та «light» дещо відрізняються кількісно: в першому випадку рівень температури на половині координати «Z» дещо вищий, а це незначним чином, але впливає на конвективний тепловий потік, оскільки змінюється поздовжній градієнт температури повітря.



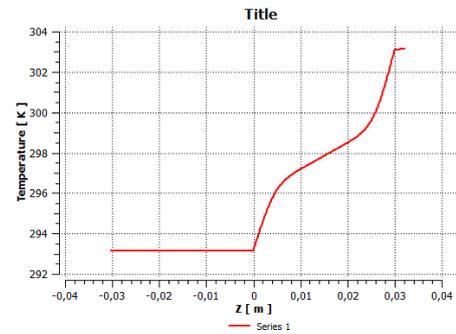
Варіант 1, dark g+



Варіант 2, light g+



Варіант 5, dark horizon



Варіант 6, light horizon

Рисунок 3.17 – Розподіл температури повітря по осі циліндричної порожнини для значення коефіцієнта емісії зразка $\varepsilon_2 = 0,6$ [130,131]

На рисунках 3.18 і 3.19 наведено температурні поля у центральних поздовжніх перерізах циліндру. Для вертикального положення (рис. 3.18, варіанти 1, 2) показано поля у площині «YZ», а для горизонтального положення циліндру комірки поля показано у двох площинах: вертикальній «XZ» (варіанти 3, 4), та горизонтальній «YZ» (варіанти 5, 6). Як видно із рисунків, картина течії для варіантів g+ та g- суттєво відрізняється. Для випадку нижнього підведення теплоти (варіанти 1, 2) температурне поле в об'ємі суттєво нерівномірне, а для випадку верхнього підводу теплоти воно практично рівномірне. [130,131]

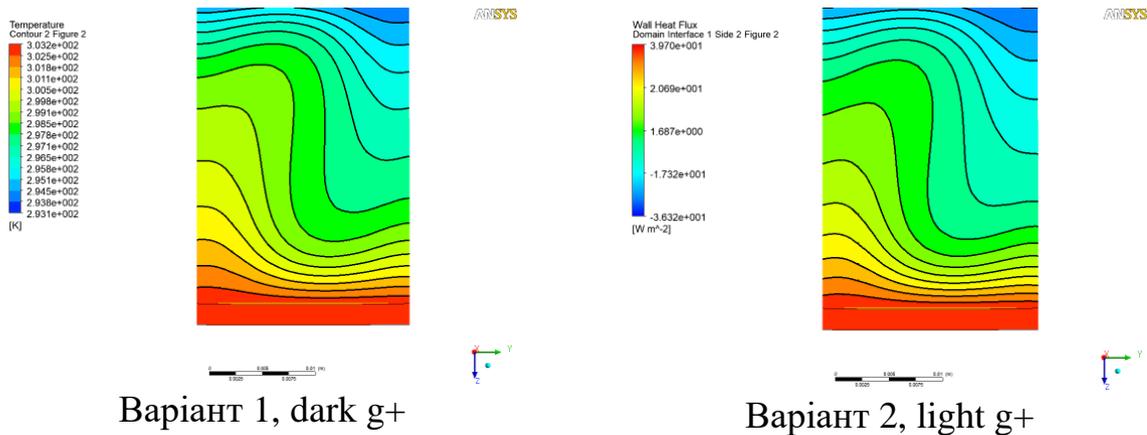


Рисунок 3.18 – Температурне поле в порожнині у площині «YZ» для вертикального положення комірки при коефіцієнті емісії зразка $\epsilon_2 = 0,6$

Температурні поля для варіантів 3 та 4 (горизонтальне положення циліндру) показано на рисунку 3.19. Як видно з рис. 3.19, поле температури в вертикальному перерізі (площина «XZ») аналогічно полю температури для варіантів 1 та 2 (g+). В горизонтальному перерізі (площина «YZ») поле температури більш рівномірне.

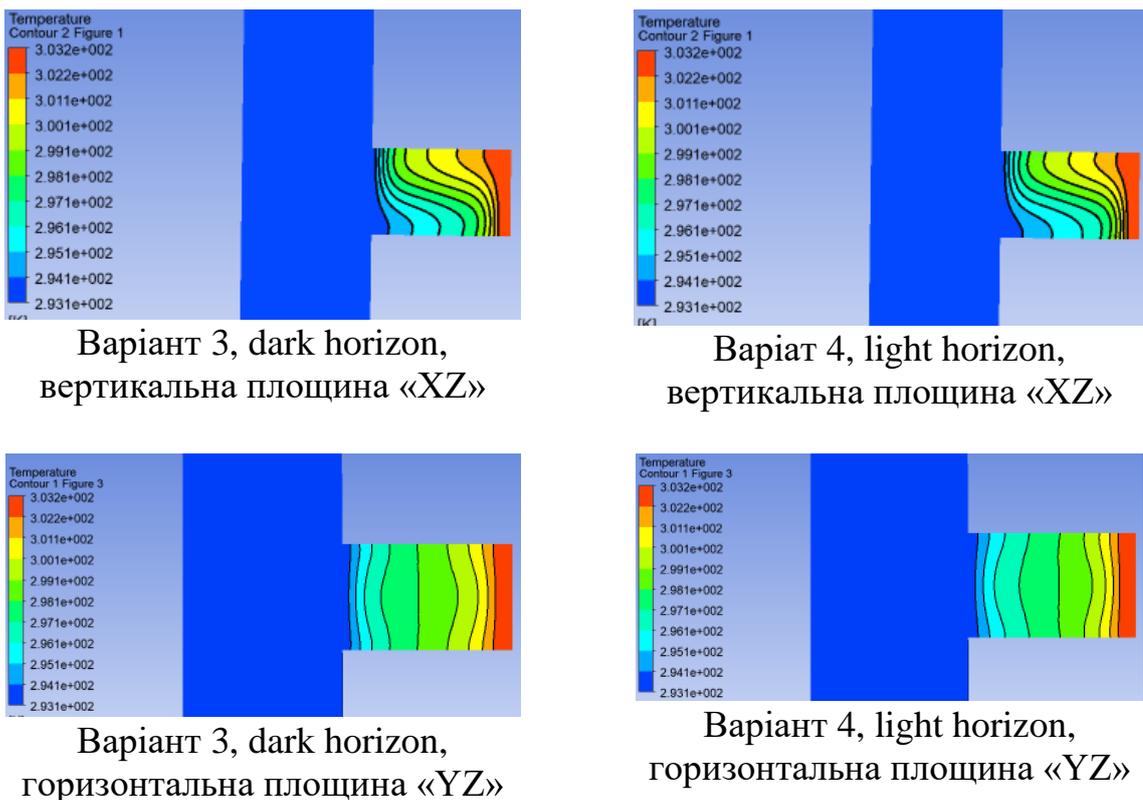


Рисунок 3.19 – Температурні поля в порожнині для горизонтального положення циліндру при значенні коефіцієнта емісії зразка $\epsilon_2 = 0,6$

На рисунку 3.19 показано залежності теплових потоків від коефіцієнту емісії зразка для досліджених варіантів. З рис. 3.19 видно, що при значенні коефіцієнту емісії сенсора $\varepsilon_1 = 0,95$ (варіанти 1, 3, «dark sensor») радіаційний теплообмін перевищує конвективний. При значенні коефіцієнту емісії сенсора $\varepsilon_1 = 0,10$ (варіанти 2, 4, «light sensor») радіаційний теплообмін значно менший за конвективний [130,131].

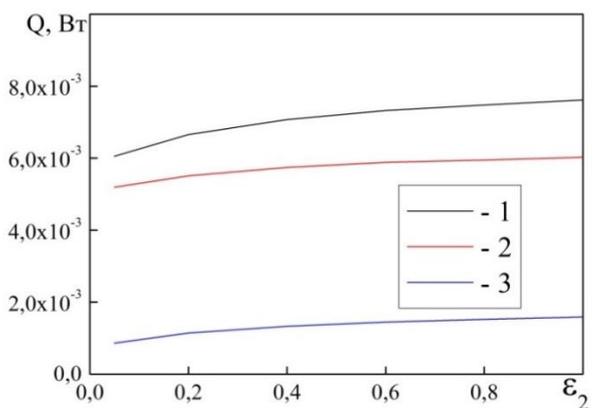
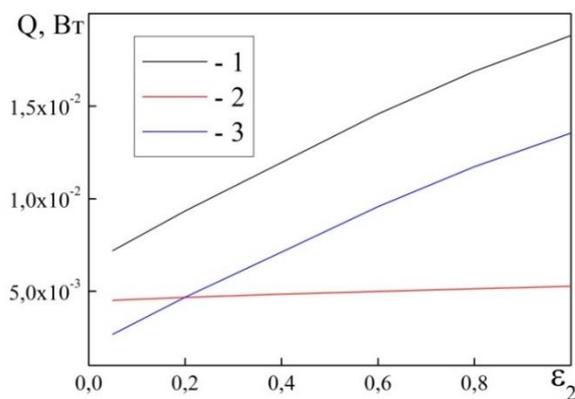
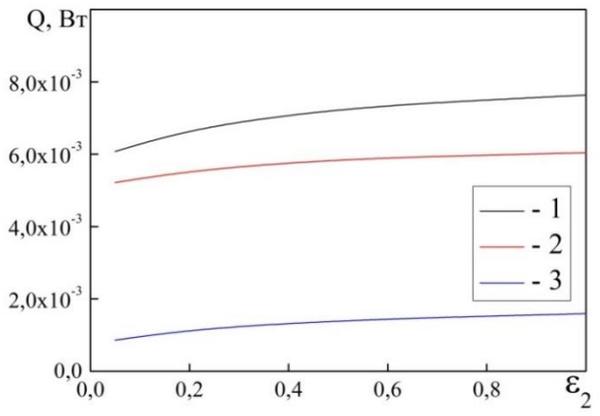
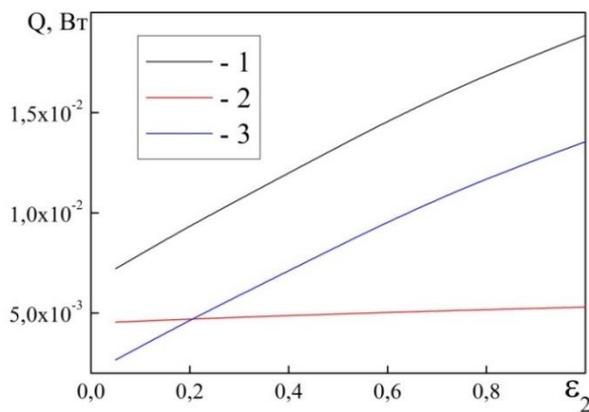


Рисунок 3.19 – Інтегральні теплові потоки з поверхні сенсора: 1 – загальний, 2 – конвективно-кондуктивний, 3 – радіаційний

Розподілення питомих теплових потоків ($\text{Вт}/\text{м}^2$) за діаметром сенсора (ось «Y») при значенні коефіцієнта емісії зразка $\varepsilon_2 = 0,6$ (рис. 3.20–3.22).

Можна зробити висновок, що при вертикальному положенні комірки ступінь нерівномірності теплового потоку залежить від розташування сенсора. Для нижнього розташування сенсора (варіанти 1, 2) загальний тепловий потік

є суттєво нерівномірним: для варіанта 1 відношення q_{\max}/q_{\min} складає величину 1,3, а для варіанта 2 вони практично дорівнює 2. Ця нерівномірність обумовлена натуральної конвекцією, радіаційний потік в центральній зоні є рівномірним. [130,131]

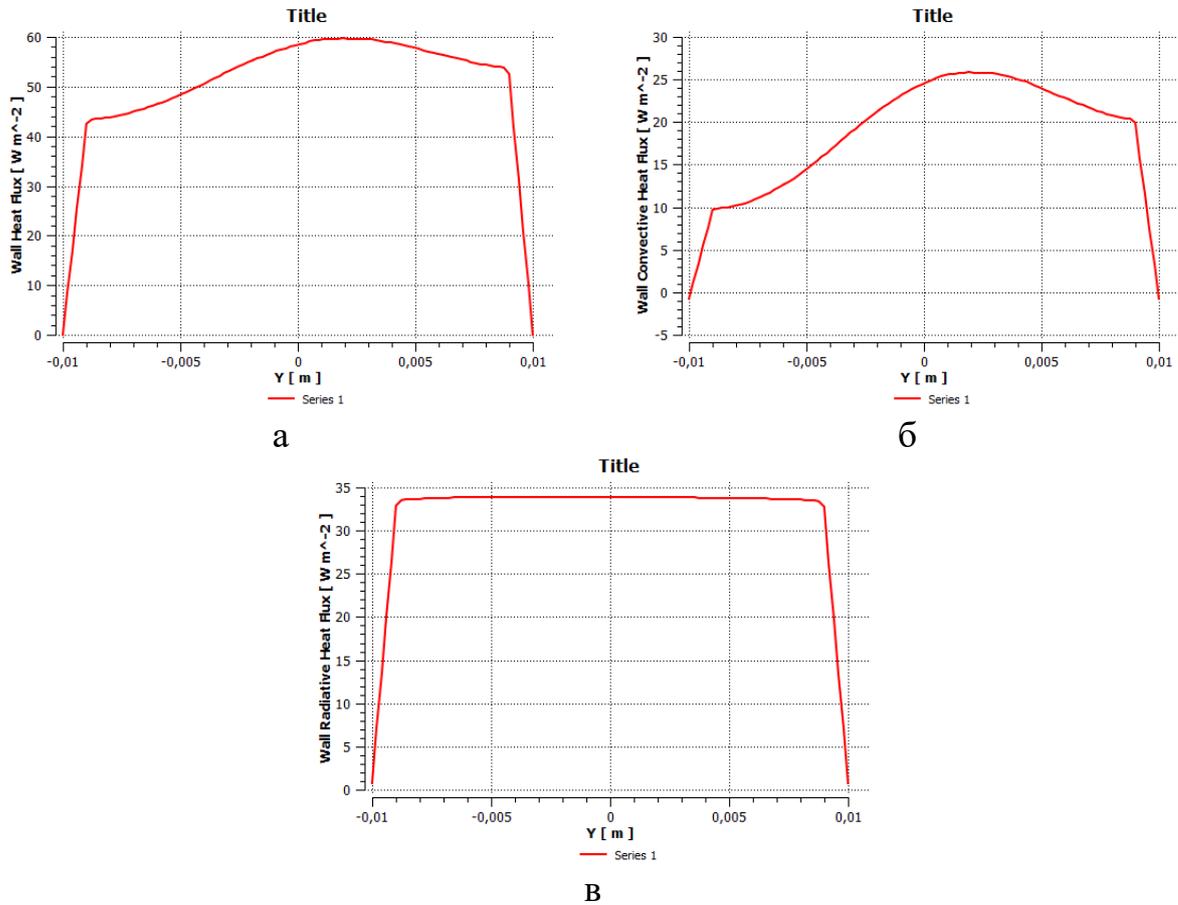
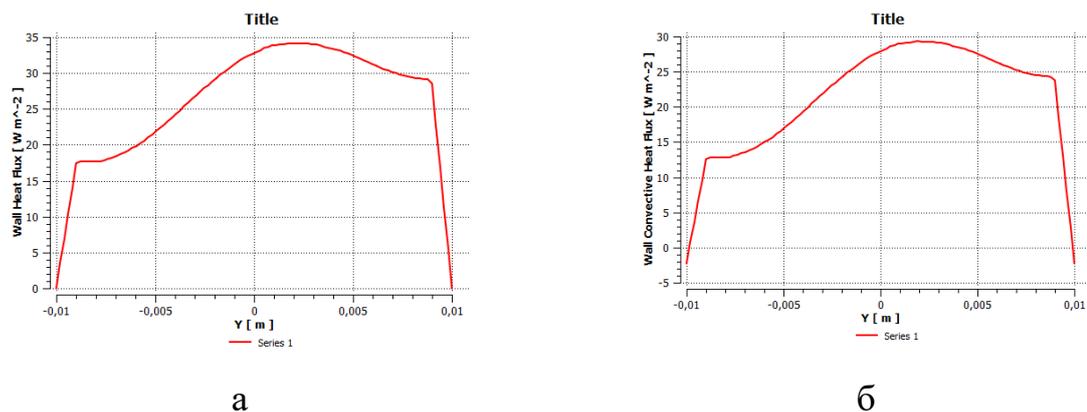
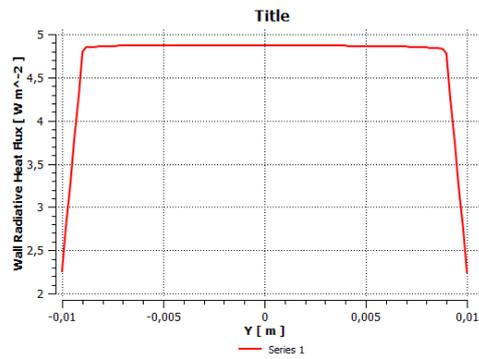


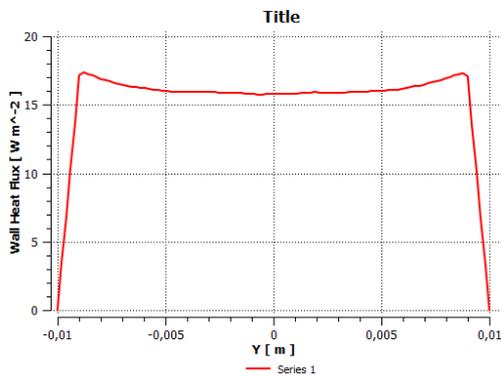
Рисунок 3.20 – Розподілення питомого теплового потоку по осі «Y» для варіанту 1 (dark g+, $\epsilon_1 = 0,95$): а, б, в – загальний, конвективно-кондуктивний та радіаційний теплові потоки відповідно



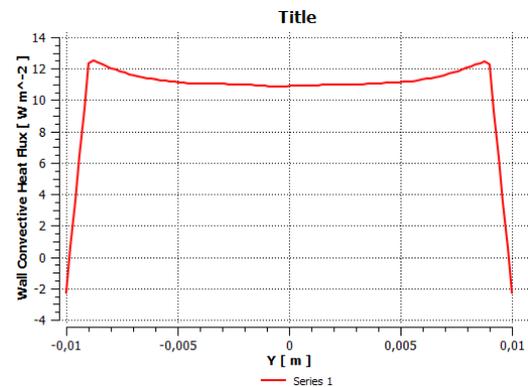


В

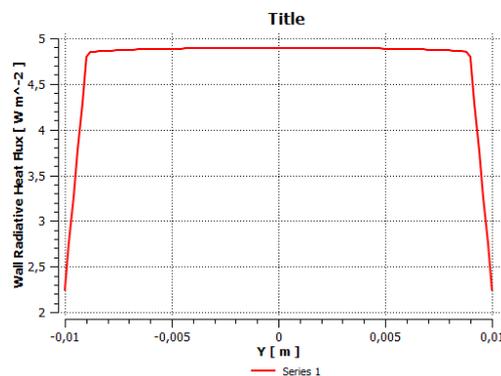
Рисунок 3.21 – Розподілення питомого теплового потоку по осі «Y» для вар. 2 (light g⁺, $\epsilon_1 = 0,10$): а, б, в – загальний, конвективно-кондуктивний та радіаційний теплові потоки відповідно



а



б



в

Рисунок 3.22 – Розподілення питомого теплового потоку по осі «Y» для варіанту 4 (light g⁻, $\epsilon_1 = 0,10$): а, б, в – відповідно загальний, конвективно-кондуктивний та радіаційний теплові потоки [130,131]

Для горизонтального розташування сенсора рівномірність теплового потоку по осям «X» та «Y» потоку суттєво відрізняється (рис. 3.23 та рис. 3.24).

По вертикальній осі «X» відношення q_{\max}/q_{\min} для обох горизонтальних варіантів приблизно дорівнює 1,6, а по горизонтальній осі «Y» тепловий потік є значно більш рівномірним, відношення q_{\max}/q_{\min} становить 1,1–1,2. Це пов'язано з характером конвективного руху повітря. [130,131]

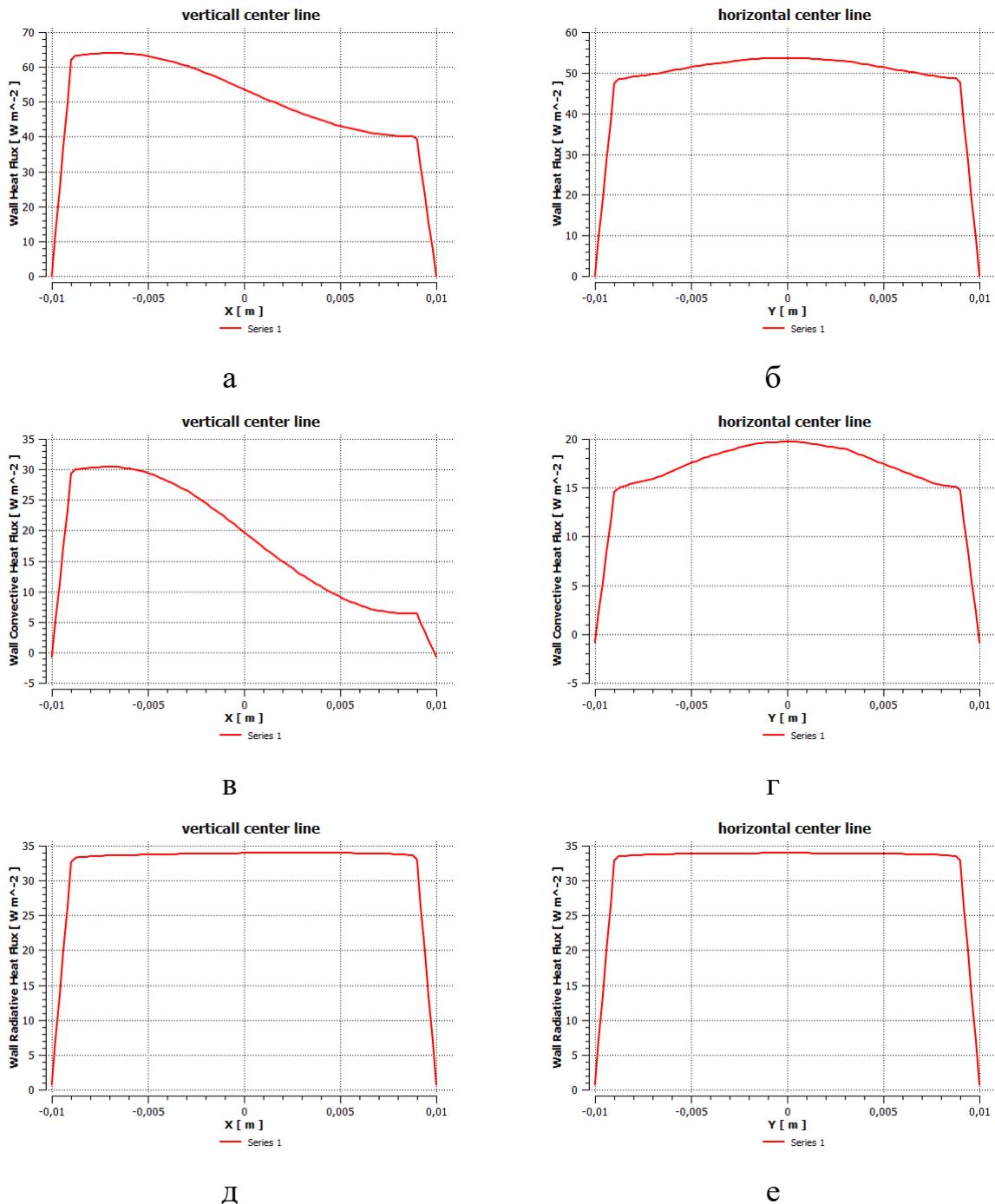


Рисунок 3.23 – Розподілення питомого теплового потоку для варіанту 5 (dark horizon, $\varepsilon_1 = 0,95$): а, б – загальний тепловий потік; в, г – конвективно-кондуктивний тепловий потік; д, е – радіаційний тепловий потік; а, в, д – по вертикальній осі «X»; б, г, е – по горизонтальній осі «Y». [130,131]

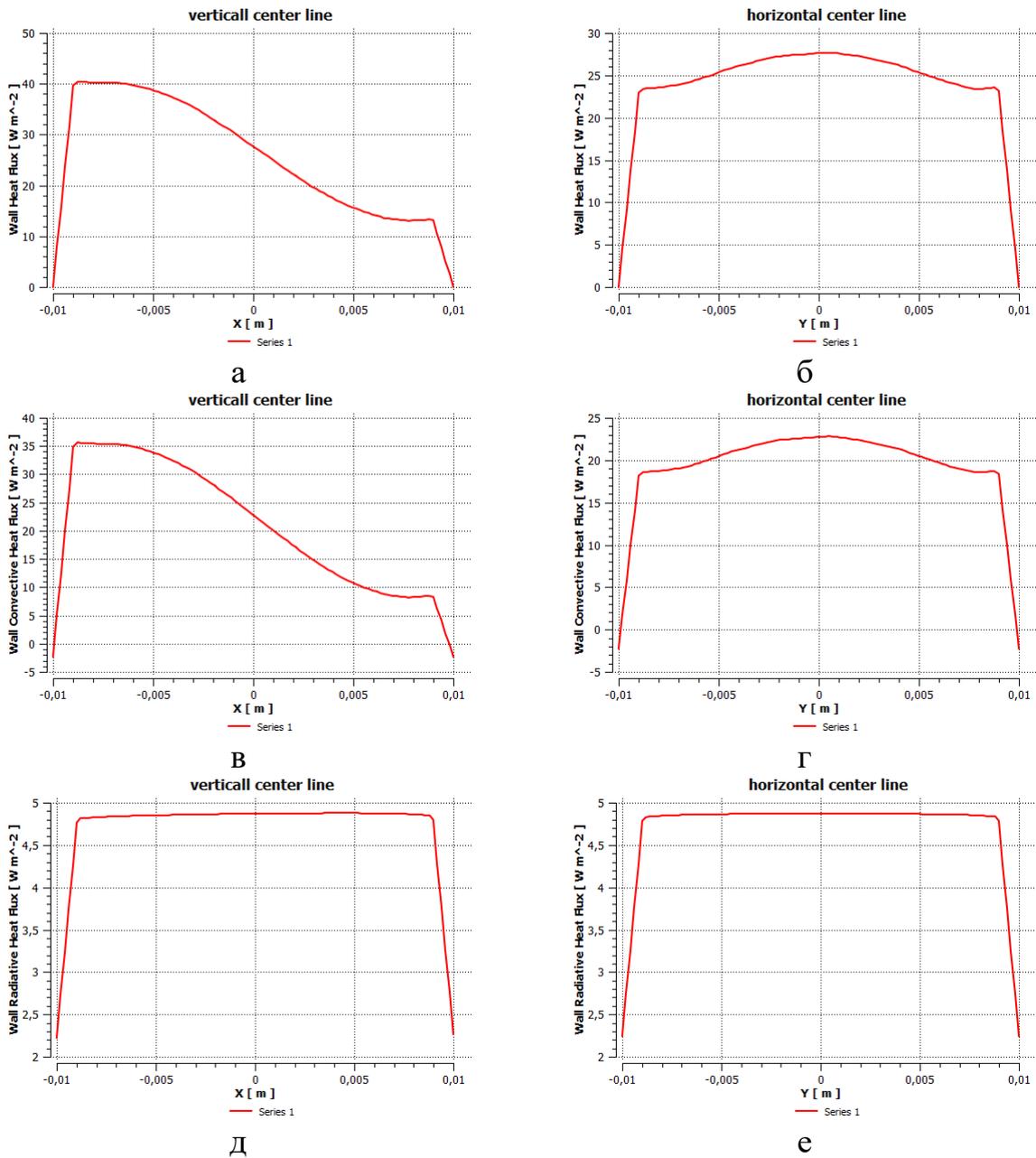


Рисунок 3.24 – Розподілення питомого теплового потоку для варіанту б (light horizon, $\varepsilon_1 = 0,10$): а, б – загальний тепловий потік; в, г – конвективно-кондуктивний пеловий потік; д, е – радіаційний тепловий потік; а, в, д – по вертикальній осі «X»; б, г, е – по горизонтальній осі «Y» [130,131]

Так для умов, які розглядаються (різниця температур між торцями $10^{\circ}C$, відстань між торцями $0,03$ м), $Ra = 2,56 \cdot 10^4$. Це значення числа Релея значно вище за критичне, і для відносної довжини циліндру $L/D = 1,5$, згідно з [132], в порожнині має місце комірчастий режим течії.

В [132–134] чисельно та експериментально досліджувалась натуральна конвекція води ($Pr = 6,7$) у вертикальній циліндричній порожнині в діапазоні числа Релея $3 \cdot 10^5 < Ra < 2 \cdot 10^6$. Експерименти проводились за допомогою анемометрії по зображенням частинок (PIV). Бокова поверхня циліндру була адіабатичною. Показано, що фізична картина течії має складну тривимірну структуру, з вертикальним вихором по всій висоті. Причому, цей вихор не є осесиметричним (рис. 3.25) [134].

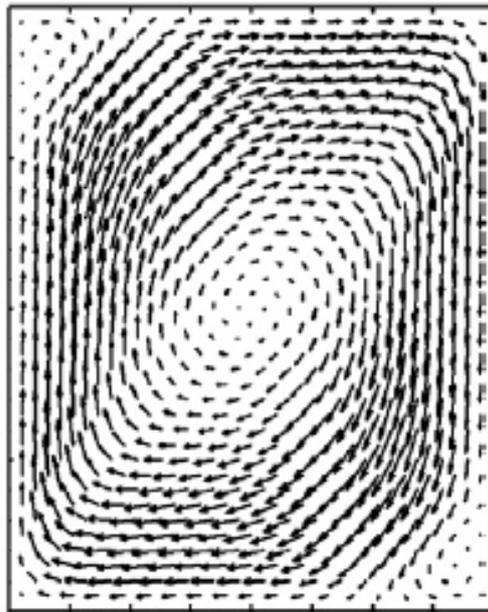


Рисунок 3.25 – Картина течії у вертикальному перерізі циліндру [134]

В [134] виконано чисельне дослідження конвекції в порожнині довгого циліндру ($L/d = 10$) з ізотермічними торцевими поверхнями при числах $Ra = 10^3 - 10^6$. Для повітряного середовища ($Pr = 0,71$) нестационарні ефекти починають проявлятися при значенні числа Релея $Ra > 10^4$. Таким чином, для розглянутого випадку структура течії є тривимірною з можливою прецесією вихору навколо поздовжньої осі.

3.2.2 Результати комп'ютерного моделювання теплообміну при диференціальному включенні комірок

За результатами моделювання проведено аналіз залежності вимірюваного значення коефіцієнту емісії від диференціального теплового потоку, визначеного як різниця потоків, виміряних у комірках з сенсорами, що мають

чорне та світле покриття: $\varepsilon_x = F(Q_1 - Q_2) = F(\Delta Q)$. Отримана залежність представлена на рис. 3.26. Просторова орієнтація комірок практично не впливає на результати вимірювань і отримані залежності співпадають у масштабі наведеного графіку – їх різниця не перевершує 0,01. [130,131]

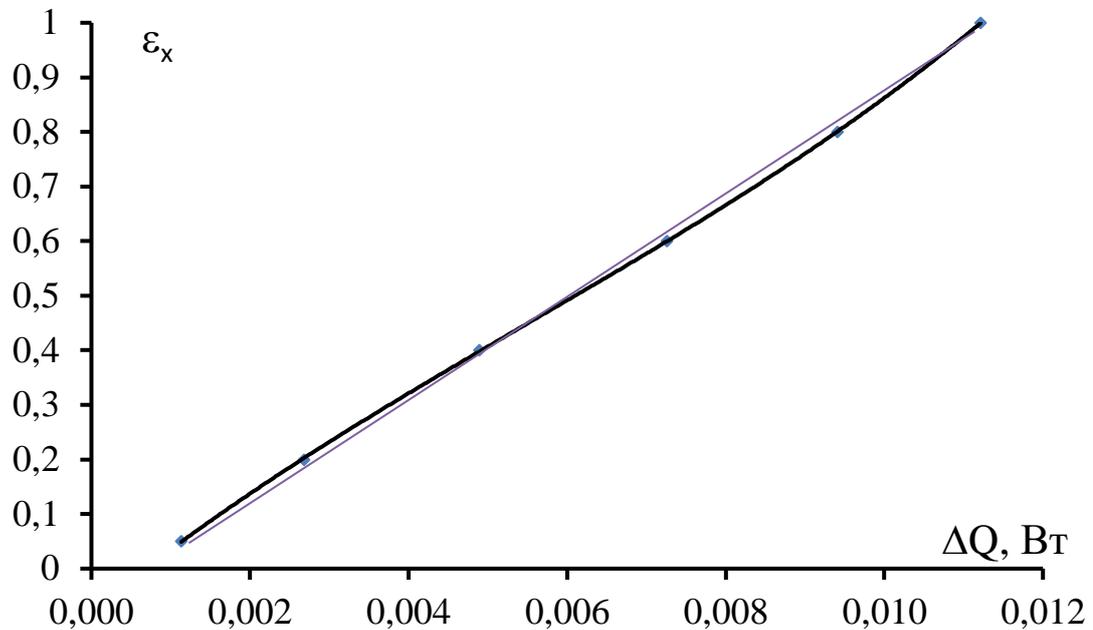


Рисунок 3.26 – Залежність вимірюваного значення коефіцієнта емісії від диференціального теплового потоку [130,131]

Отримана залежність вимірюваного значення коефіцієнта емісії від диференціального теплового потоку є калібрувальною характеристикою приладу. Ця залежність відрізняється від лінійної не більше ніж на 3%, але не проходить через центр координат, а має зміщення по осі ординат. Така відмінність зумовлена особливостями спряженого конвективно-радіаційного теплообміну у замкненому просторі з кінцевими розмірами [132, 133].

Залежність вимірюваного значення коефіцієнта емісії від диференціального теплового потоку, може бути добре апроксимована поліномом третього ступеню:

$$\varepsilon_x = 366160 \cdot (\Delta Q)^3 - 6071 \cdot (\Delta Q)^2 + 118,1 \cdot \Delta Q - 0,0775.$$

Таким чином, комп'ютерне моделювання спряженого теплообміну в комірках приладу дозволило виявити особливості такого теплообміну у

замкненому просторі з кінцевими розмірами та їх вплив на калібрувальну характеристику приладу [130,131]. Завдяки диференціальній схемі приладу, просторова орієнтація комірок практично не впливає на результати вимірювань. Виявлені нелінійність та зміщення калібрувальної характеристики необхідно враховувати в алгоритмі опрацювання інформації, яка надходить від первинних сенсорів приладу. Розроблено методику калібрування приладу з використанням зразків, коефіцієнт емісії яких попередньо визначений за допомогою стаціонарної лабораторної установки [123, 126, 130, 131].

3.3 Комп'ютерна CFD Модель процесів теплообміну приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів

Об'єкт дослідження представляє собою модель вимірювального блоку приладу експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів, що розміщений на дослідному зразку. Модель вимірювального блоку складається з прямокутного корпусу з теплоізоляційного матеріалу в який вбудовано дві замкнені циліндричні порожнини, які моделюють вимірювальні елементи, що оснащені сенсорами вимірювання поглинальних властивостей матеріалів. Порожнини заповнені атмосферним повітрям. Радіус циліндрів складає $r = 10$ мм, висота $H = 30$ мм. Верхні торцеві поверхні (сенсори) нагрівалися, а нижні (зразок) сприймали теплоту (радіаційну, кондуктивну та конвективну). Один з вимірювальних елементів має коефіцієнт емісії поверхні сенсора $\varepsilon_1 = 0,95$ (позначались «dark»), а інший сенсор має коефіцієнт емісії $\varepsilon_1 = 0,1$ (позначались «light»).

Опис розрахункової моделі. Розрахунки проводились за допомогою програмного комплексу ANSYS CFX. Геометрію досліджуваного об'єкту побудовано за допомогою підпрограми ANSYS Design Manager.

Для проведення дослідження була побудовано комп'ютерну модель об'єкту дослідження, загальний вигляд якої представлено на рис. 3.27–3.29.

Модель складалася з двох рідинних та трьох твердих розрахункових областей. Рідинні розрахункові області мали циліндричну форму з розмірами: діаметр 20 мм висота 30 мм. Кожна рідинна розрахункова область на горі мала тверду підобласть діаметр 20 мм висота 2 мм, що була моделлю сенсора, з іншого боку розташована тверда прямокутна підобласть 360x300 мм, що виконувала роль дослідного зразка, який виконаний зі скла. Товщина скла була прийнята 4 мм. Центри рідинних підобластей розташовані на відстані 60 мм одна від одної. В свою чергу рідинні підобласті поміщені в твердій підобласть розміром 120x60 мм з екструдованого полістиролу, що слугує корпусом вимірювального приладу. Усі підобласті були з'єднані інтерфейсними зв'язками для забезпечення умови сталості теплових потоків на межі кожної підобласті рідина-тверде тіло. [130,131]

Граничні умови. На зовнішній поверхні сенсора задавалася стала температура у 30°C , а на зовнішніх поверхнях зразка та приладу задавалися граничні умови 3-го роду: температура зовнішнього середовища 20°C , коефіцієнт тепловіддачі $6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. На торцевих поверхнях зразку були задані адіабатичні умови. [130,131]

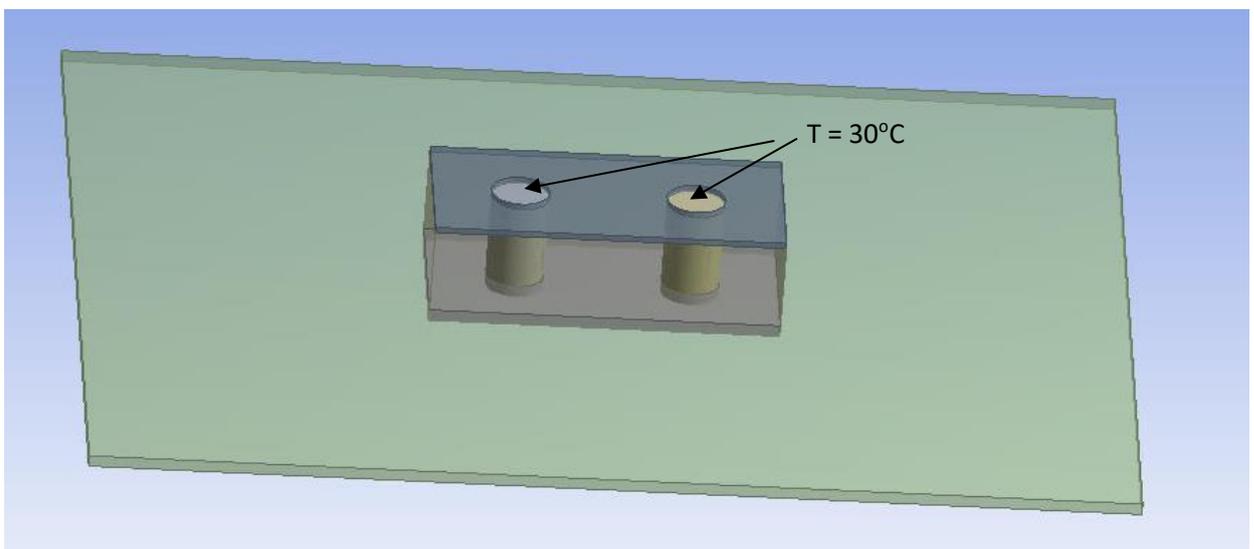


Рисунок 3.27 – Комп'ютерна модель та граничні умови: загальний вигляд[130,131]

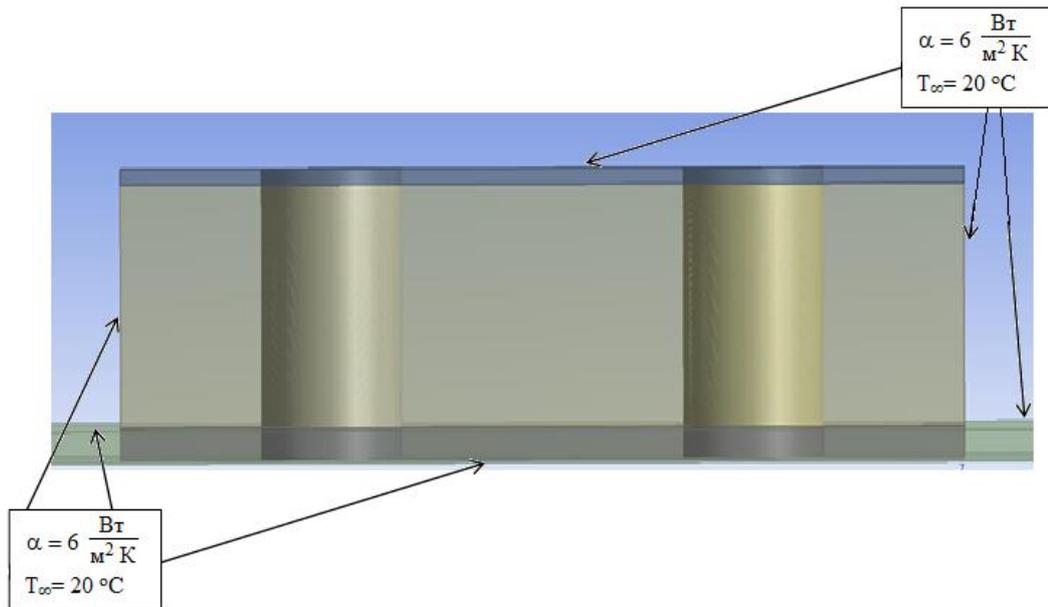


Рисунок 3.28 – Комп’ютерна модель та граничні умови: повздовжній перетин[130,131]

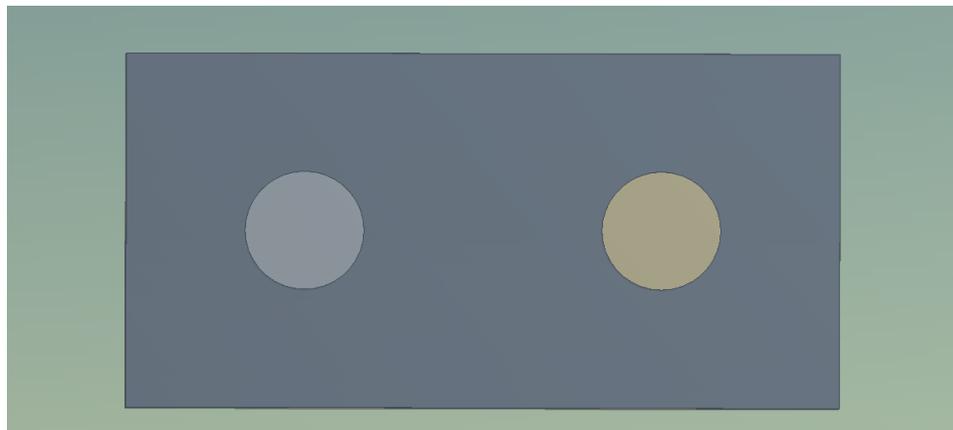


Рисунок 3.29 – Комп’ютерна модель: вид зверху[130,131]

Для виконання CFD-моделювання використано структуровану розрахункову сітку, побудовану за допомогою сіткового генератора *ANSYS CFX Mesh* (рис. 3.30–3.31). [130,131] Розрахункова сітка усіх твердих частин комп’ютерної моделі складається виключно з гексаєдральних елементів. Розрахункова сітка порожнин представляє собою комбінацію тетраєдральних елементів в середині розрахункової області, з призматичними елементами в областях згущення розрахункової сітки біля стінок рідинної підобласті.

Максимальна кількість вузлів в примежовому шарі складала 15. Загальний розмір розрахункової сітки становив 823 тис. вузлів та 775 тис. елементів.

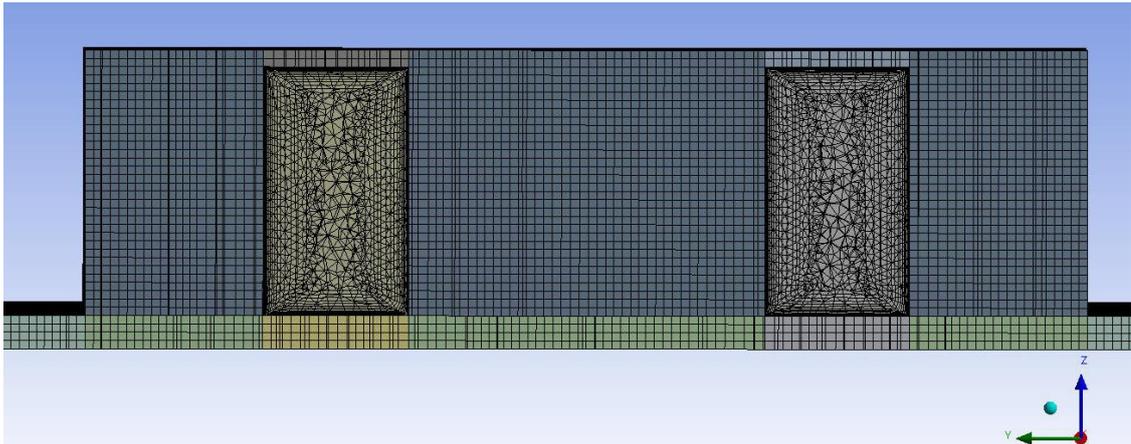


Рисунок 3.30 – Розрахункова сітка: Осьовий перетин [130,131]

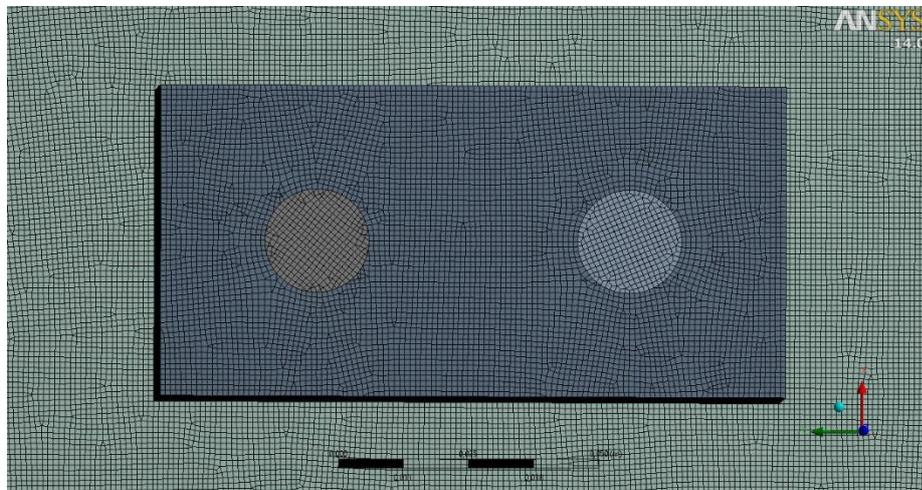


Рисунок 3.31 – Розрахункова сітка: вигляд з гори. [130,131]

Властивості повітря в рідинній підобласті вважалось сталими і взяті для температури 25°C.

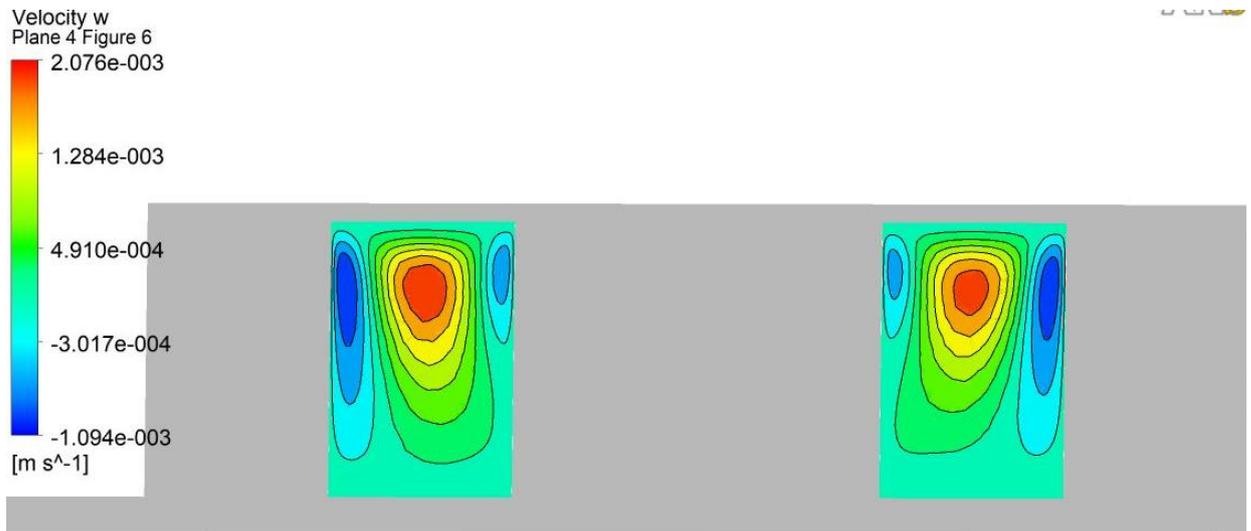
Рівняння Нав'є-Стокса (3.5) з рівнянням нерозривності (3.6) вирішувались для в'язкого теплопровідного газу в стаціонарній постановці з використанням в якості моделі теплообміну повного рівняння збереження енергії (3.7) для випадку ламінарного режиму течії. [130,131]

Вплив гравітації враховувався шляхом завдання відповідного значення в напрямку протилежному напрямку осі Z. Радіаційний теплообмін розглядався

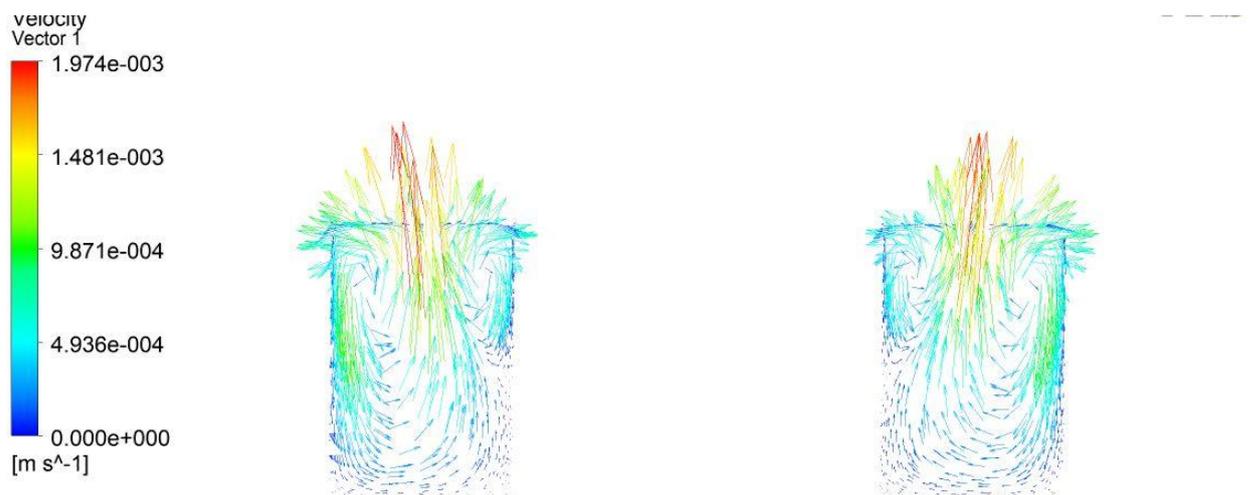
за допомогою моделі Дискретного Переносу (Discrete Transfer), яка показала себе найкраще за результатами тестування [123].

Вплив температурних полів вимірювальних комірок на поле швидкості.

Вплив температурних полів вимірювальних комірок на поле швидкості для двох діаметрально протилежних значень коефіцієнту емісії зразка наведено на рис. 3.32 та рис. 3.33.

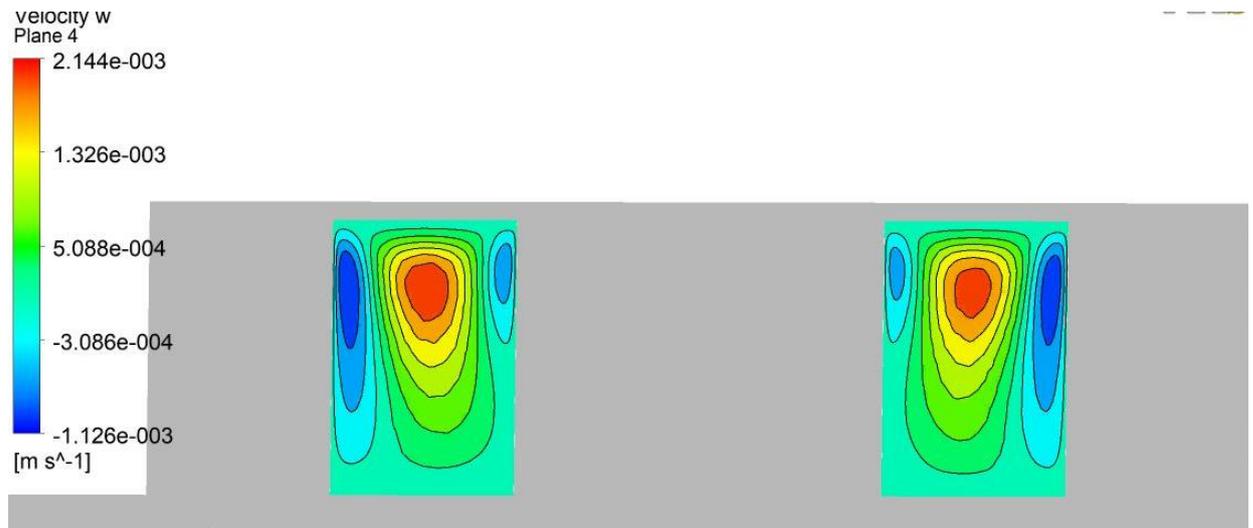


а

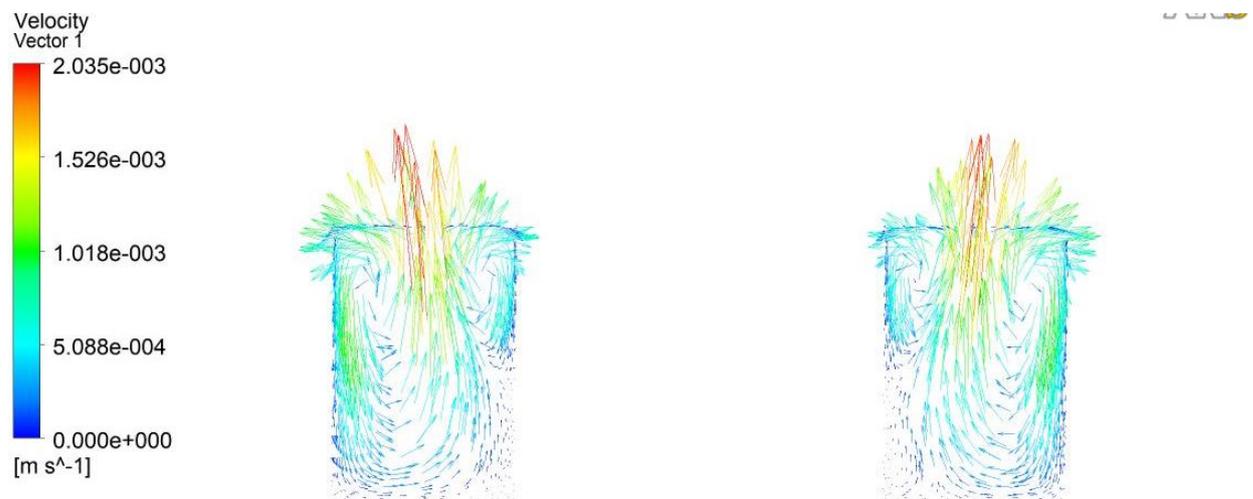


б

Рисунок 3.32 – Поле осьової (w) швидкості (а) та векторе поле повної швидкості (б) для коефіцієнта емісії зразка $\varepsilon = 0,1$, сенсор «dark» розташований з правого боку.



а



б

Рисунок 3.33 – Поле осьової (w) швидкості (а) та векторе поле повної швидкості (б) для коефіцієнта емісії зразка $\varepsilon = 0,9$, сенсор «dark» розташований з правого боку

Розподіл поля швидкості обумовлений вільною конвекцією в середині вимірювальних комірок. Порівнюючи конвективні теплові потоки для вимірювальних комірок з «dark» та «light» сенсорами (таблиця 3.2) встановлено, що вони не суттєво різняться один від одного. Даний висновок підтверджується отриманими полями швидкостей для двох діаметрально протилежних значень коефіцієнту емісії зразка [130,131]. Результати наведені

на рис. 3.32 та рис. 3.33 мають однакову структуру течії та схожі значення швидкості повітря.

Структура течії на рис. 3.32 та рис. 3.33 обумовлена в першу чергу умовами теплообміну. Так внутрішні стінки комірок перебувають в граничних умовах близьких до адіабатним, а зовнішні охолоджуються. Це призводить до утворення двох зворотних зон: однієї невеликої в кутку з внутрішньої сторони комірок, та однієї в пристінній області комірок з зовнішньої сторони. Як результат утворюється підйомна течія в середині комірок з направленням результуючого потоку в сторону зовнішньої сторони комірок. Отримані результати добре узгоджуються з результатами наведеними в літературі [132-134].

Для реалізації методу важливе значення має залежність температури в характерних точках вимірювальної частини приладу від емісійних характеристик зразка. Характерні точки позначені на рисунку 3.34.

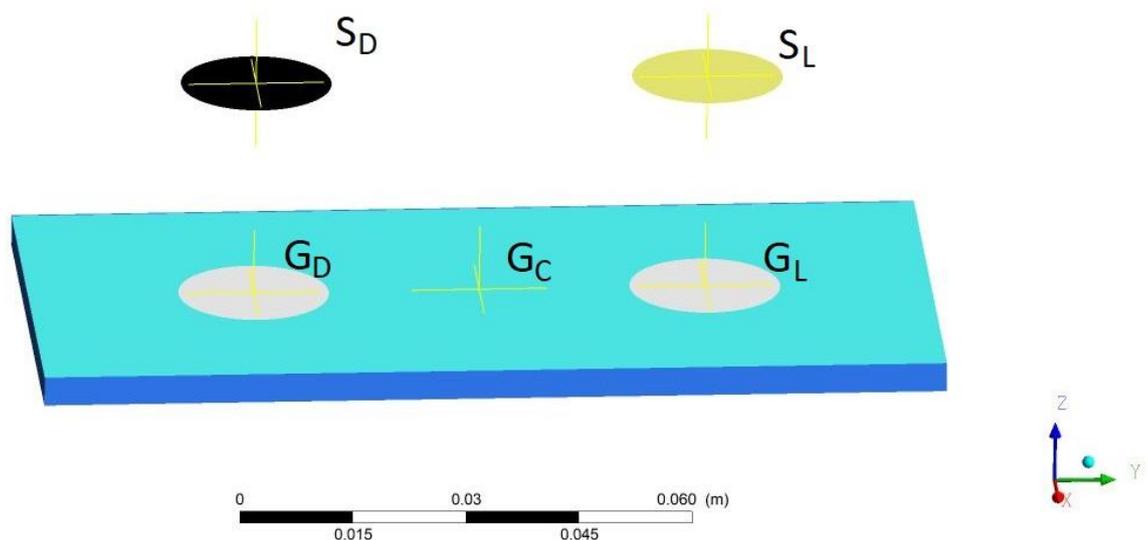


Рисунок 3.34 – Розташування характерних точок на моделі вимірювальної частини приладу

Значення температури в характерних точок на моделі вимірювальної частини приладу надано в таблиці 3.2 та показано на рис. 3.35.

Таблиця 3.2 – Зміна температур в характерних точках моделі в залежності від коефіцієнта емісії зразка

ε_2	$S_D, ^\circ\text{C}$	$S_L, ^\circ\text{C}$	$G_D, ^\circ\text{C}$	$G_C, ^\circ\text{C}$	$G_L, ^\circ\text{C}$
0,1	29,932	29,951	20,320	20,242	20,243
0,2	29,923	29,950	20,394	20,260	20,265
0,3	29,915	29,949	20,462	20,275	20,281
0,4	29,907	29,949	20,527	20,290	20,293
0,5	29,900	29,948	20,588	20,303	20,303
0,6	29,892	29,948	20,657	20,317	20,313
0,7	29,886	29,948	20,710	20,329	20,320
0,8	29,880	29,948	20,762	20,339	20,326
0,9	29,876	29,947	20,812	20,350	20,332

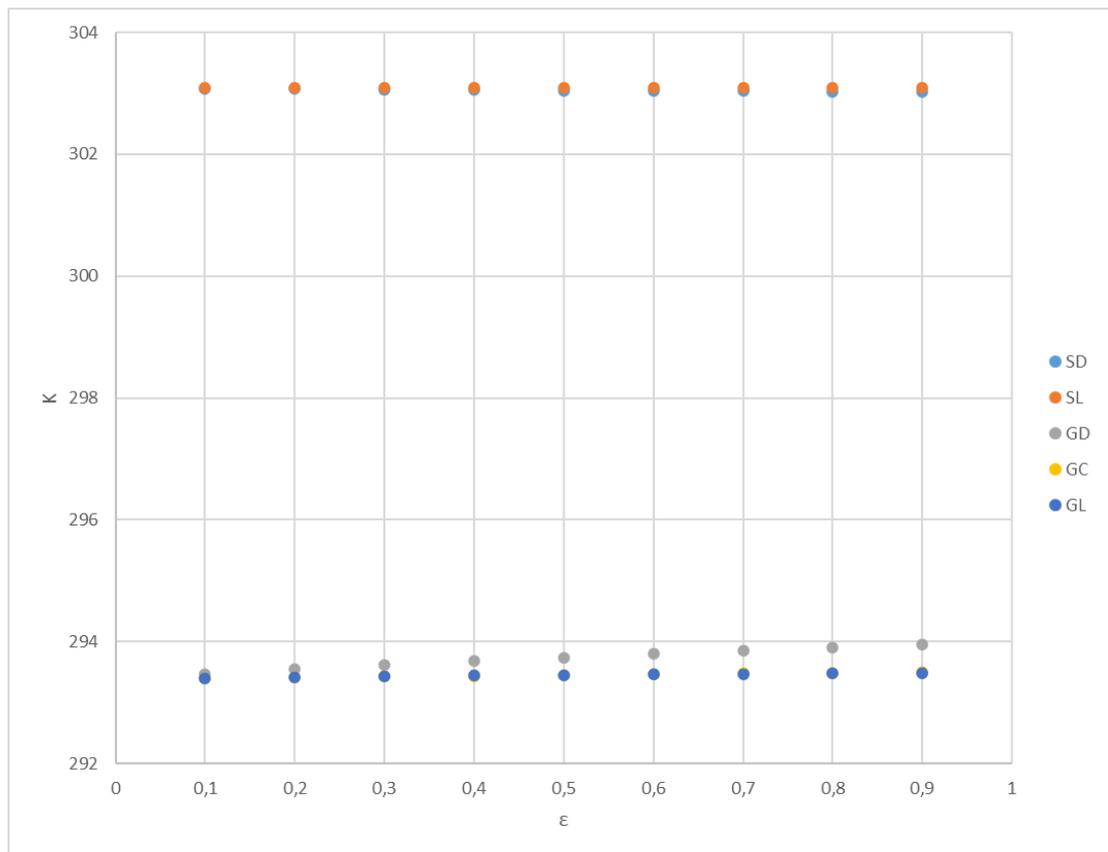


Рисунок 3.35 – Значення температури точок на моделі вимірювальної частини приладу

Значення температур в центрі «dark» сенсора (S_D) та в центрі «light» сенсора (S_L) мають майже однакове значення. Температуру в центрі «light» сенсора (S_L) можна вважати сталою в діапазоні зміни значення коефіцієнта емісії зразка $\varepsilon=0,1-0,9$. Температура в центрі «dark» сенсора (S_D) трохи нижча за температуру «light» сенсора, що пов'язано з більшою інтенсивністю радіаційного теплообміну [130,131].

При зростанні коефіцієнту емісії зразка з 0,1 до 0,9 спостерігається зростання температури на поверхні зразка напроти «dark» сенсора на $0,5^\circ\text{C}$. Відповідне зростання для точки на зразку напроти «light» сенсору складає лише $0,1^\circ\text{C}$ [130,131].

Для виявлення закономірностей у зміні радіаційного та конвективного потоків від двох сенсорів, один з яких «dark», а інший «light», в залежності від коефіцієнта емісії дослідного зразка були проведені розрахунки для стаціонарного випадку. Діапазон зміни коефіцієнта емісії змінювався від 0,1 до 0,9. Визначались локальні та інтегральні теплові потоки з поверхні сенсора, а саме, загальний, конвективно-кондуктивний та радіаційний: $Q_\Sigma=Q_c+Q_R$. Отримані значення інтегральних теплових потоків зведено в таблиці 3.3 [130,131].

Крім значень теплових потоків до розгляду були взяті результати розрахунку теплового стану вимірювального блоку приладу в повздовжньому перетині по осях вимірювальних комірок.

В Додатку А на рисунках та у таблицях наведено результати визначення розподілу температури та теплових потоків для різних значень коефіцієнта емісії зразка.

Розподіл температури по поверхні зразка має характерні два максимуми: більший знаходиться напроти центру «dark» сенсору, а менший – напроти «light» сенсору. Температура в точці напроти «dark» сенсора зі зростанням коефіцієнта емісії зразка збільшується, що пов'язано зі суттєвим зростанням впливу радіаційного теплообміну в цій комірці зі зростанням коефіцієнта

емісії зразка. При зростанні коефіцієнта емісії зразка з 0,1 до 0,9 спостерігається зростання температури на поверхні зразка на $0,5^{\circ}\text{C}$. Відповідне зростання для точки на зразку напроти «light» сенсору складає лише $0,1^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 3.3 – Значення теплових потоків в комірках приладу при варіації коефіцієнту емісії

	ε_2	Загальний тепловий потік Q_{Σ} , Вт	Конвективний тепловий потік Q_c , Вт	Радіаційний тепловий потік Q_R , Вт
Dark sensor $\varepsilon_{ID} = 0,95$	0,1	1,096e-02	6,653e-03	4,309e-03
	0,2	1,218e-02	6,676e-03	5,508e-03
	0,3	1,332e-02	6,695e-03	6,627e-03
	0,4	1,440e-02	6,712e-03	7,684e-03
	0,5	1,542e-02	6,727e-03	8,693e-03
	0,6	1,660e-02	6,733e-03	9,865e-03
	0,7	1,749e-02	6,748e-03	1,074e-02
	0,8	1,835e-02	6,762e-03	1,159e-02
	0,9	1,920e-02	6,773e-03	1,242e-02
Light sensor $\varepsilon_{IL} = 0,1$	0,1	8,329e-03	7,147e-03	1,182e-03
	0,2	8,486e-03	7,197e-03	1,289e-03
	0,3	8,597e-03	7,231e-03	1,366e-03
	0,4	8,679e-03	7,256e-03	1,423e-03
	0,5	8,741e-03	7,278e-03	1,463e-03
	0,6	8,789e-03	7,289e-03	1,500e-03
	0,7	8,821e-03	7,302e-03	1,519e-03
	0,8	8,863e-03	7,311e-03	1,552e-03
	0,9	8,901e-03	7,318e-03	1,583e-03

Отримані значення інтегральних теплових потоків (таблиця 3.3) наведено на рис. 3.36 для випадку Dark sensor ($\varepsilon_{ID} = 0,95$) та на рис. 3.37 для випадку Light sensor ($\varepsilon_{IL} = 0,1$).

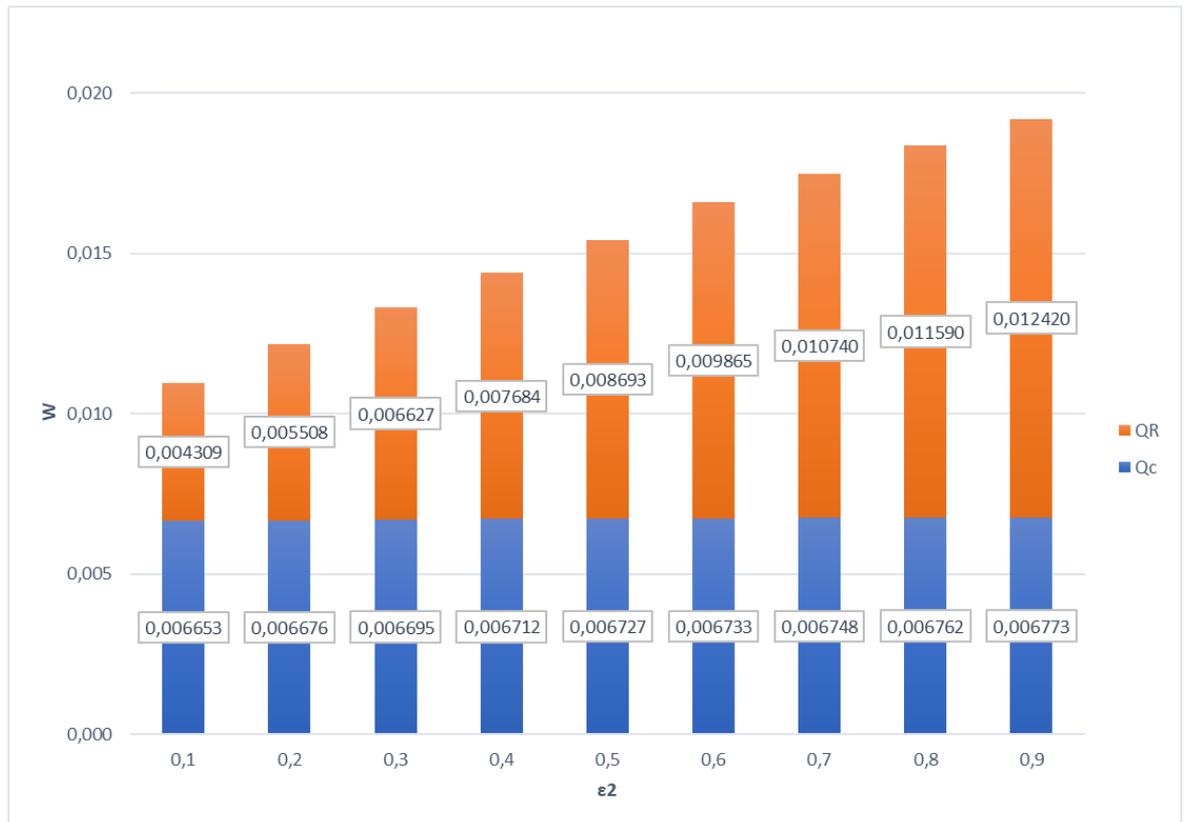


Рисунок 3.36 – Отримані значення інтегральних теплових потоків для випадку «Dark» сенсору ($\epsilon_{1D} = 0,95$)

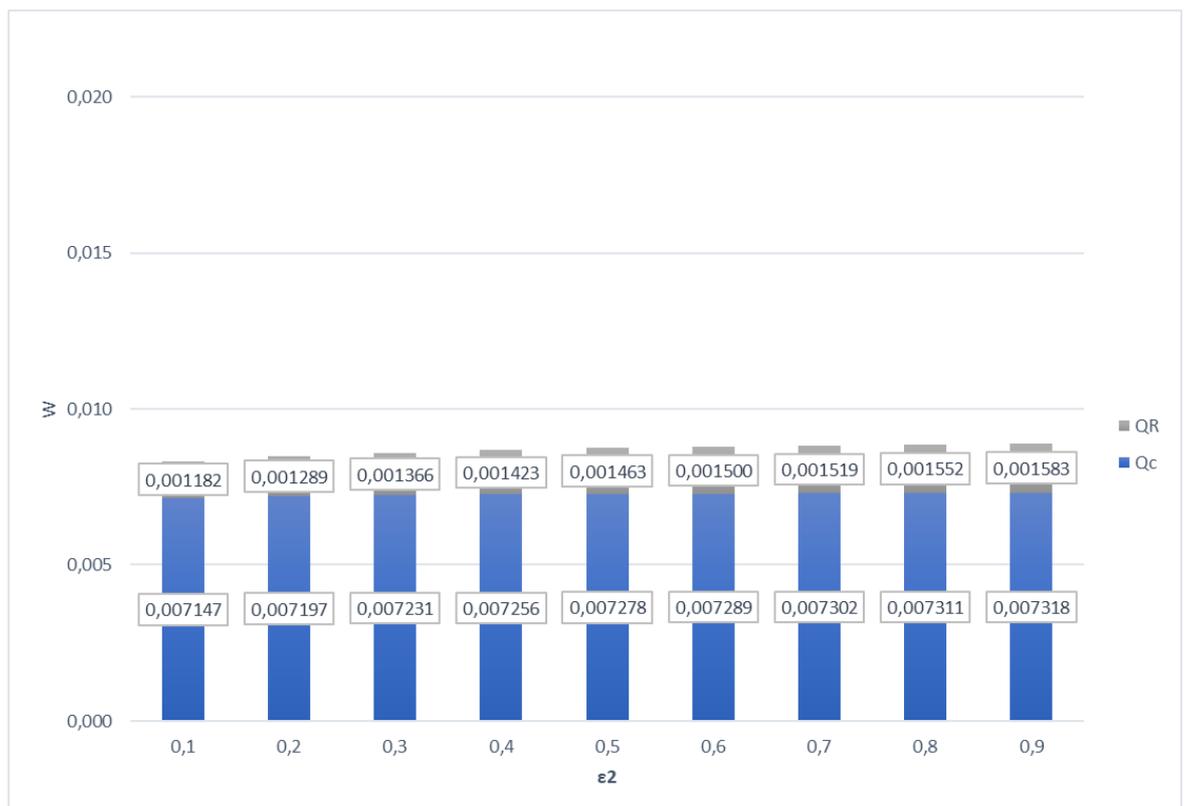


Рисунок 3.37 – Отримані значення інтегральних теплових потоків для випадку «Light» сенсору ($\epsilon_{1L} = 0,1$)

Результати наведені на рис. 3.36 та рис. 3.37 свідчать, що зі зростанням коефіцієнту емісії зразка зростають і теплові потоки з поверхні сенсорів.

У випадку використання «dark» сенсору, радіаційна складова майже у двічі більший за конвективну. Зі зростанням емісійних характеристик зразка спостерігається зростання теплового потоку з поверхні сенсору майже у двічі. Конвективний тепловий потік майже залишається постійним для дослідженого діапазону емісійних характеристик зразка. Зростання теплового потоку становить всього 1,8% при зміні коефіцієнту емісії зразка від 0,1 до 0,9. [130,131]

У вимірювальній комірці зі «light» сенсором радіаційна та конвективна складові теплового потоку мають один і той же порядок (таблиця 3.3). Так, при коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon = 0,1$ конвективна складова дорівнює 86% радіаційної, а при $\varepsilon = 0,9$ – 83%.

Порівнюючи конвективні теплові потоки для вимірювальних комірок з «dark» та «light» сенорами (таблиця 3.3) 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 ($\varepsilon=0,1$), ця різниця становить до 7%, а при високих значеннях коефіцієнта емісії зразка ($\varepsilon = 0,9$) – 2%, тобто зі збільшенням коефіцієнта емісії значення конвективних потоків для різних сенсорів наближаються один до одного. Більше значення конвективної складової теплового потоку для вимірювальної комірки зі «light» сенсором обумовлено більшою різницею температур між центром сенсора та центром поверхні зразка (таблиця 3.3). [130,131]

3.3.1 Нестационарна комп'ютерна модель процесів теплообміну приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів

Для визначення режиму роботи приладу після встановлення на зразок проведено розрахунки температури поверхні зразка в нестационарній постановці задачі. 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 3.38. [130,131]

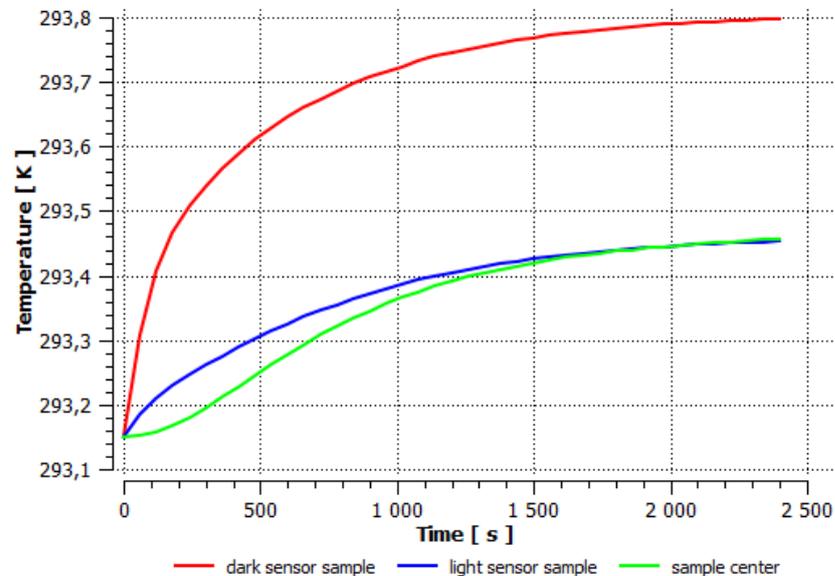


Рисунок 3.38 – Вплив приладу на температурний режим поверхні зразка після початку нагріву: червона лінія – зона напроти центру «dark» сенсора; синя лінія – зона напроти центру «light» сенсора; зелена лінія – зона посередині центрів сенсорів [130,131]

Виходячи з отриманих результатів, приведених на рис. 3.38 стабілізація температури зразка відбувається після 2000 секунди, що в подальшому дає змогу розглядати режим як допустимий для проведення контролю коефіцієнта емісії.

3.3.2 Комп'ютерна модель процесів теплообміну приладу експрес-контролю коефіцієнту емісії при дослідженні різних видів скла

Окремим етапом комп'ютерного моделювання процесів конвективно-кондуктивного теплообміну проведено дослідження, для випадку коли матеріалом зразка було обрано скло при варіації коефіцієнтів емісії покриття.

Дослідження проведено з метою отримання розподілів температури та теплових потоків в вимірювальній частині приладу. До розгляду були прийняті наступні види скла: звичайне віконне, матове скло, і-скло, к-скло. [130,131]

На рис. 3.39–3.40 наведено результати моделювання для зразка *віконного скла*.

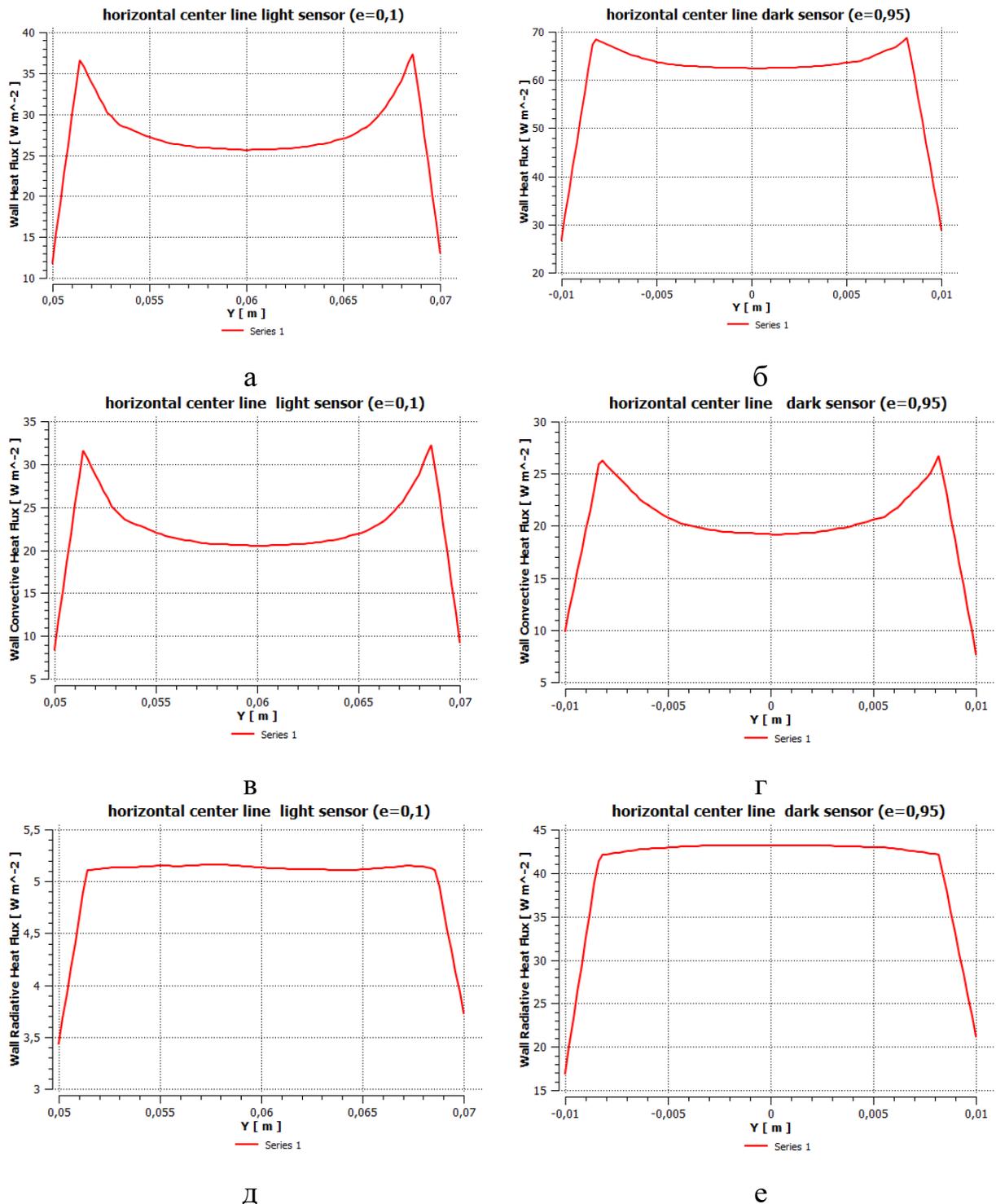


Рисунок 3.39 – Розподіл теплових потоків в комірках приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії віконного скла: а, б – загальний тепловий потік для комірки з сенсором «light» і «dark» відповідно, в, г – конвективний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно, д, е – радіаційний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно

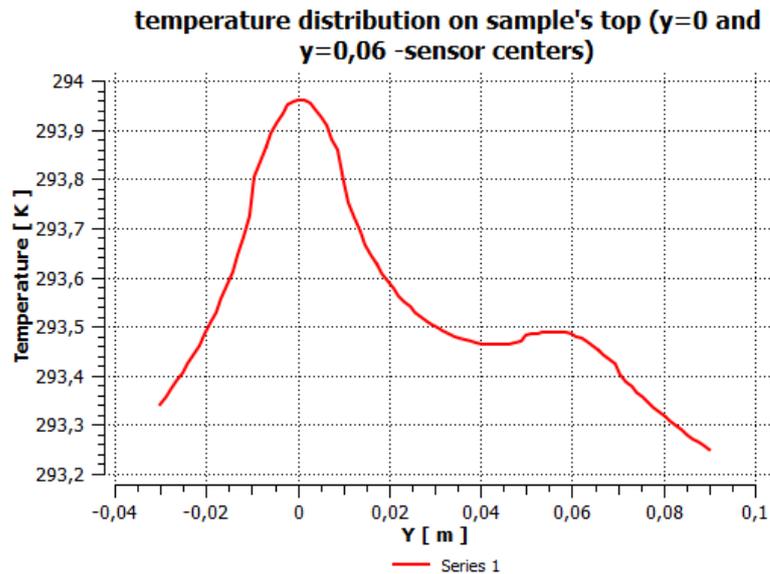


Рисунок 3.40 – Розподіл температури по поверхні зразка при експрес-контролі коефіцієнту емісії віконного скла навпроти сенсорів: $y = 0$ м – «dark» сенсор; $y = 0,06$ м – «light» сенсор

На рис. 3.41 зображено температурне поле в перерізі приладу для вимірювання контролю коефіцієнту емісії, яке проходить через центр комірок «light» та «dark» для випадку випробувань на зразку віконного скла.

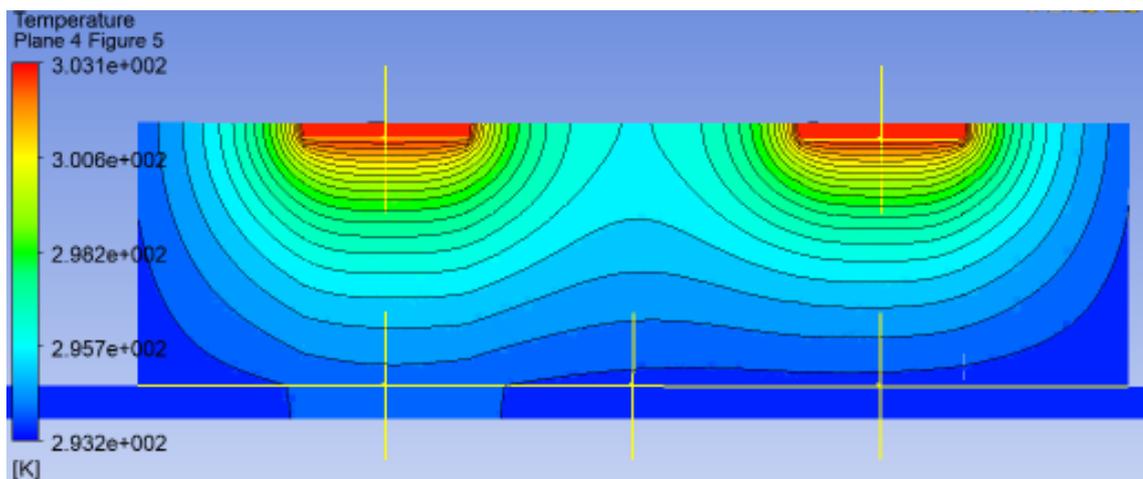


Рисунок 3.41 – Температурне поле на осі вимірювального елемента для віконного скла

В табл. 3.4 наведено інтегральні величини значень теплового потоку в комітках «light» та «dark» при проведенні досліджень віконного скла.

Таблиця 3.4 – Інтегральні теплові потоки для віконного скла

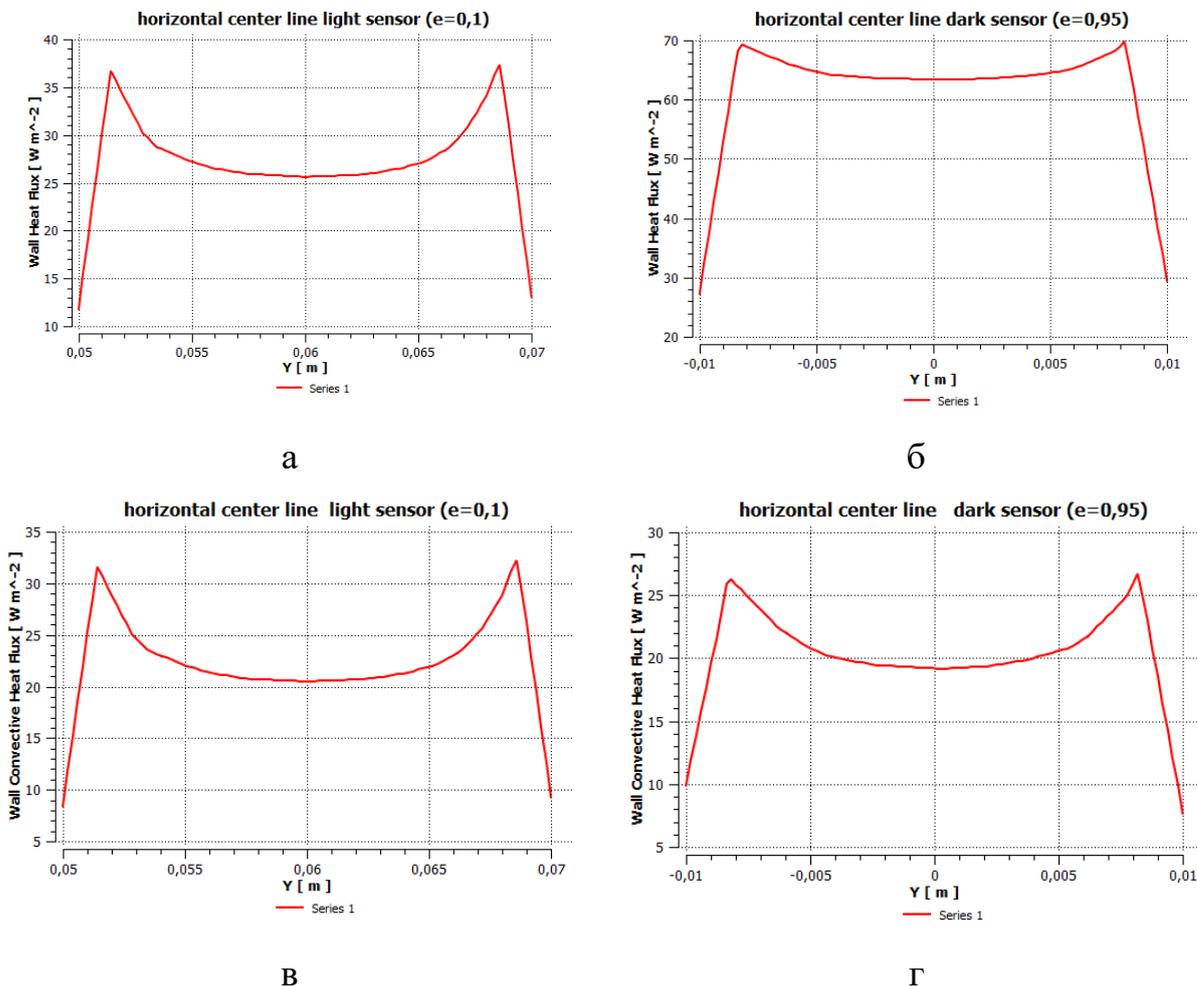
Тепловий потік	Dark sensor $\varepsilon = 0,95$	Light sensor $\varepsilon = 0,1$
Загальний тепловий потік Q_{Σ} , Вт	1,915e-02	8,873e-03
Конвективний тепловий потік Q_C , Вт	6,779e-03	7,326e-03
Радіаційний тепловий потік Q_R , Вт	1,238e-02	1,546e-03

В таблиці 3.5 наведено значення температур в усталеному режимі в характерних точках, які показано на рис. 3.34 у випадку випробувань на віконному склі.

Таблиця 3.5 – Зміна температур в характерних точках моделі для віконного скла

ε_2	S_D , °C	S_L , °C	G_D , °C	G_C , °C	G_L , °C
0,9	29,874	29,948	20,811	20,349	20,333

На рис. 3.42–3.43 наведено результати моделювання для зразка матового скла.



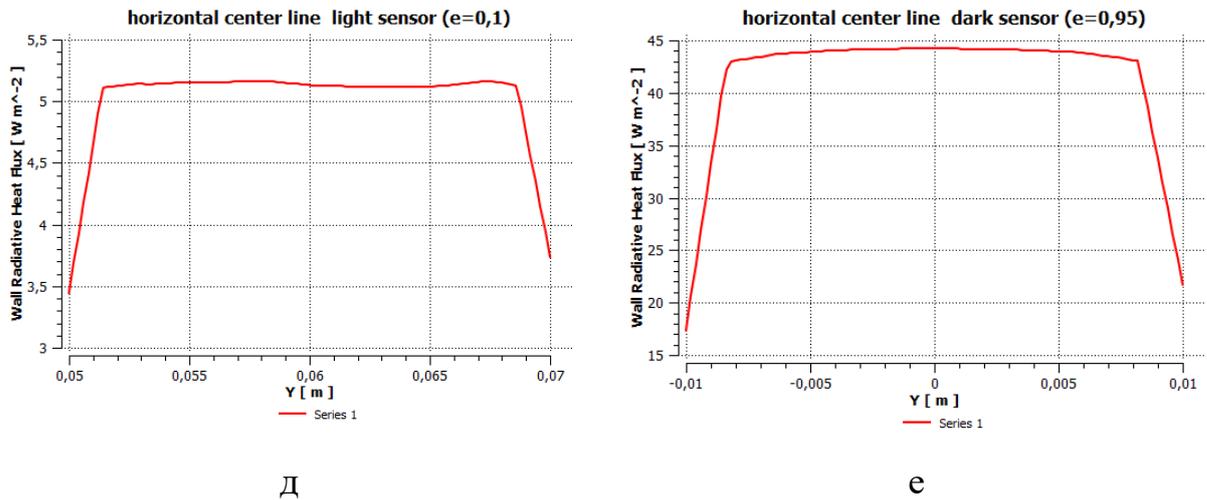


Рисунок 3.42 – Розподіл теплових потоків в комірках приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії матового скла: а, б – загальний тепловий потік для комірки з сенсором «light» і «dark» відповідно, в, г – конвективний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно, д, е – радіаційний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно

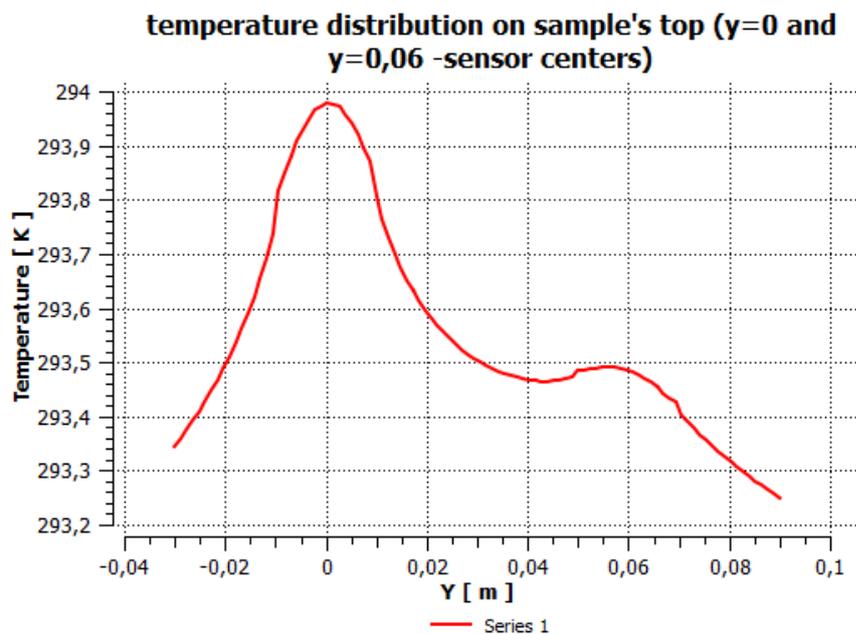


Рисунок 3.43 – Розподіл температури по поверхні зразка (для матового скла) навпроти сенсорів: $y = 0$ м – «dark» сенсор; $y = 0,06$ м – «light» сенсор

На рис. 3.44 зображено температурне поле в перерізі приладу для вимірювання контролю коефіцієнту емісії, яке проходить через центр комірок «light» та «dark» для випадку випробувань на зразку матового скла.

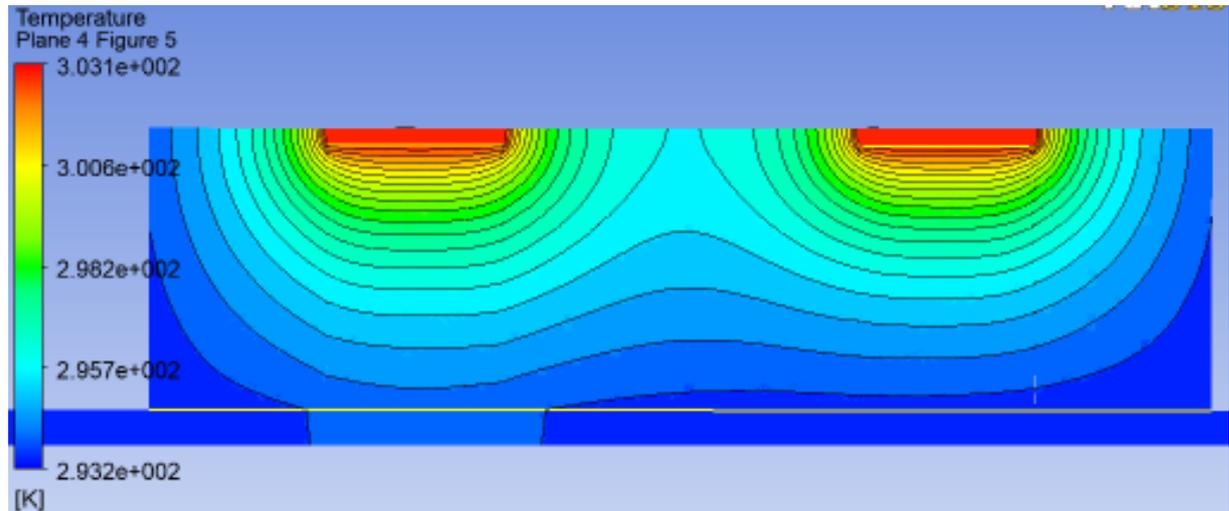


Рисунок 3.44 – Температурне поле на осі вимірювального елемента для матового скла [130,131]

В табл. 3.6 наведені інтегральні величини значень теплового потоку в комітках «light» та «dark» при проведенні досліджень матового скла.

Таблиця 3.6 – Інтегральні теплові потоки для матового скла

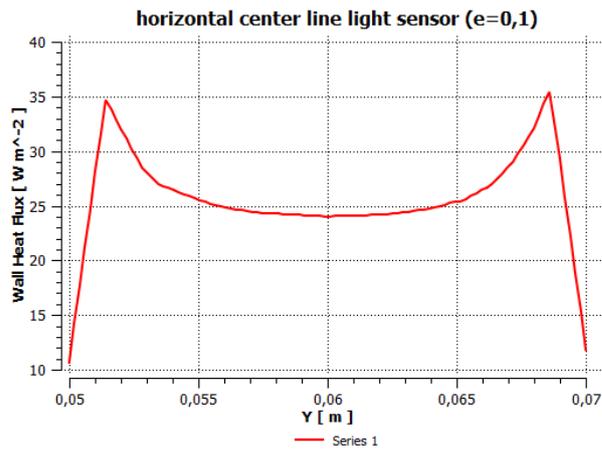
Тепловий потік	Dark sensor $\varepsilon = 0,95$	Light sensor $\varepsilon = 0,1$
Загальний тепловий потік Q_{Σ} , Вт	1,943e-02	8,877e-03
Конвективний тепловий потік Q_c , Вт	6,781e-03	7,329e-03
Радіаційний тепловий потік Q_R , Вт	1,265e-02	1,548e-03

В таблиці 3.7 наведено значення температур в усталеному режимі в характерних точках, які показано на рис. 3.34 у випадку випробувань на матовому склі.

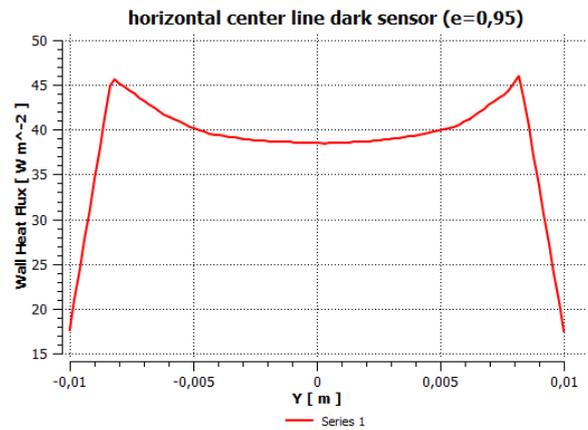
Таблиця 3.7 – Зміна температур в характерних точках моделі для матового скла

ε_2	S_D , °C	S_L , °C	G_D , °C	G_C , °C	G_L , °C
0,93 (Diffuse Fraction 0,05)	29,872	29,948	20,827	20,353	20,334

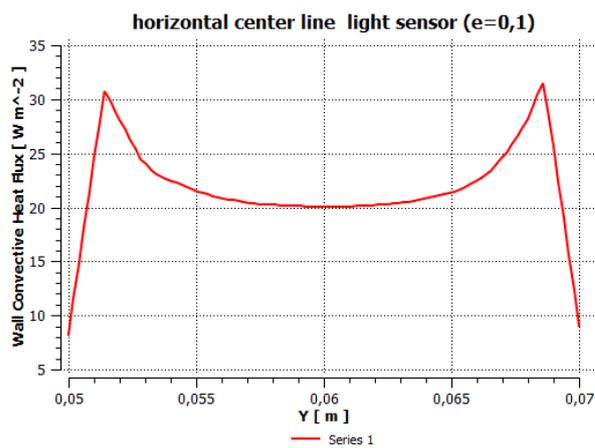
На рис. 3.45–3.46 наведено результати моделювання для зразка к-скла.



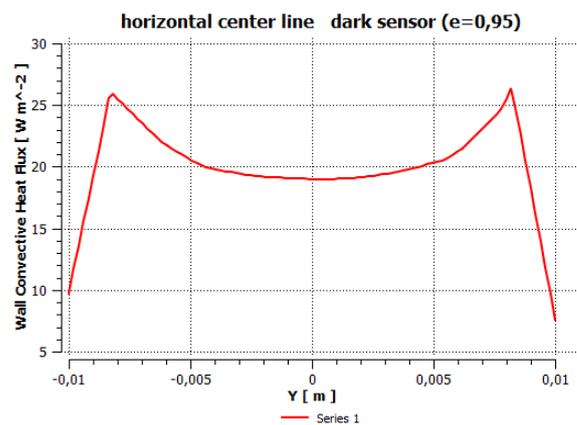
а



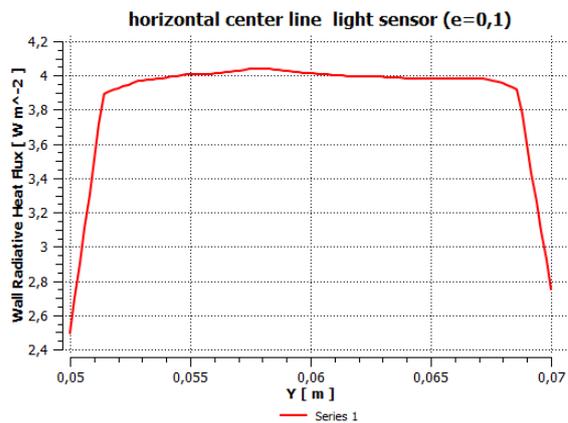
б



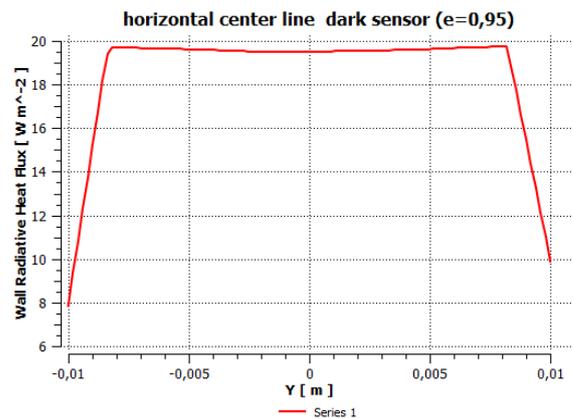
в



г



д



е

Рисунок 3.45 – Розподіл теплових потоків в комірках приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії к-скла: а, б – загальний тепловий потік для комірки з сенсором «light» і «dark» відповідно, в, г – конвективний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно, д, е – радіаційний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно

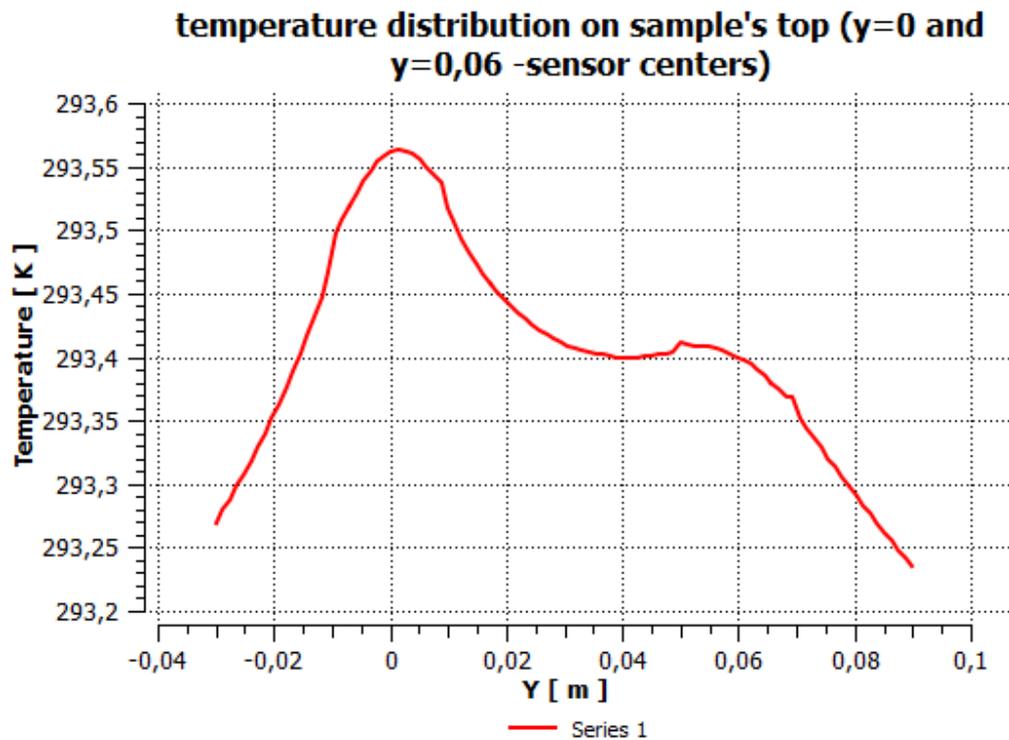


Рисунок 3.46 – Розподіл температури по поверхні зразка (для к-скла) напроти сенсорів: $y = 0$ м – «dark» сенсор; $y = 0,06$ м – «light» сенсор

На рис. 3.47 зображено температурне поле в перерізі приладу для вимірювання контролю коефіцієнту емісії, яке проходить через центр комірок «light» та «dark» для випадку випробувань на зразку *к-скла*.

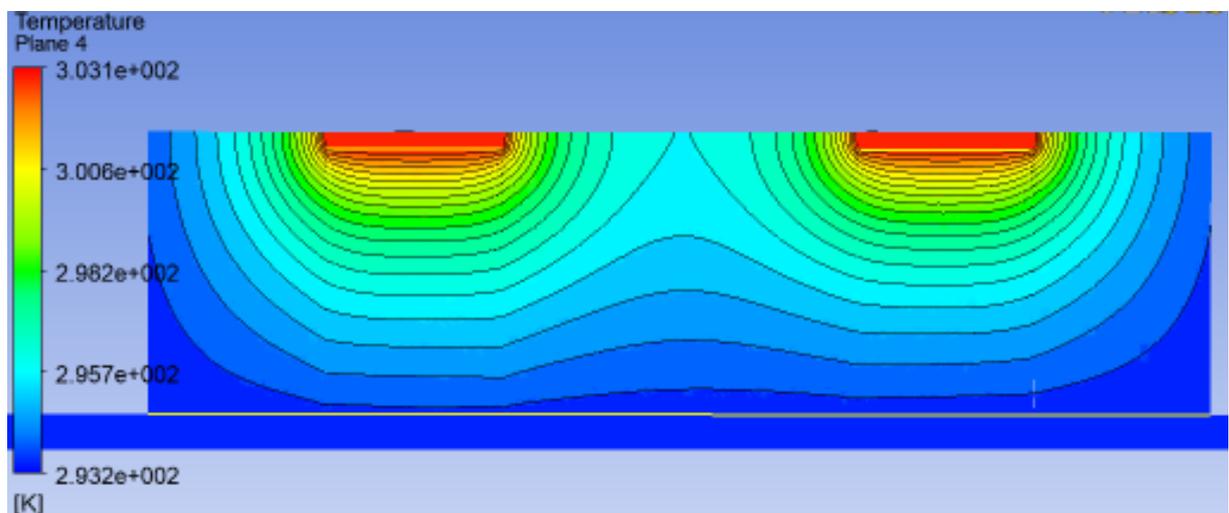


Рисунок 3.47 – Температурне поле на осі вимірювального елемента для к-скла

В табл. 3.8 наведено інтегральні величини значень теплового потоку в комірках «light» та «dark» при проведенні досліджень к-скла.

Таблиця 3.8 – Інтегральні теплові потоки для к-скла

Тепловий потік	Dark sensor $\varepsilon = 0,95$	Light sensor $\varepsilon = 0,1$
Загальний тепловий потік Q_{Σ} , Вт	1,243e-02	8,344e-03
Конвективний тепловий потік Q_c , Вт	6,693e-03	7,154e-03
Радіаційний тепловий потік Q_R , Вт	5,733e-03	1,190e-03

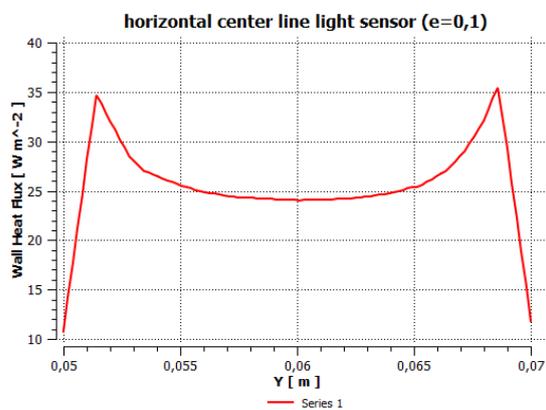
В таблиці 3.9 наведено значення температур в усталеному режимі в характерних точках, які показано на рис. 3.34 у випадку випробувань на к-склі.

Таблиця 3.9 – Зміна температур в характерних точках моделі для к-скла

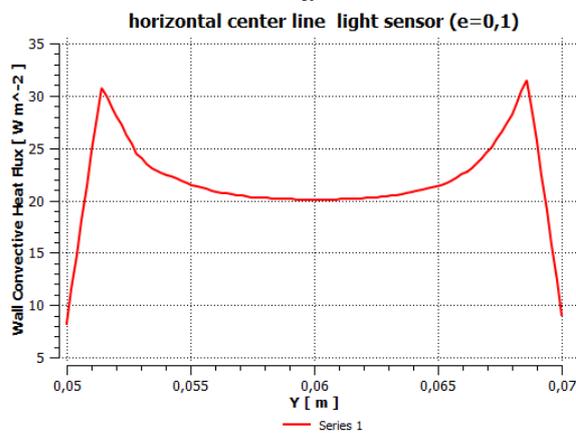
ε_2	S_D , °C	S_L , °C	G_D , °C	G_C , °C	G_L , °C
0,23	29,922	29,951	20,411	20,261	20,250

На рис. 3.48–3.49 наведено результати моделювання для зразка і-скла.

«light» сенсор

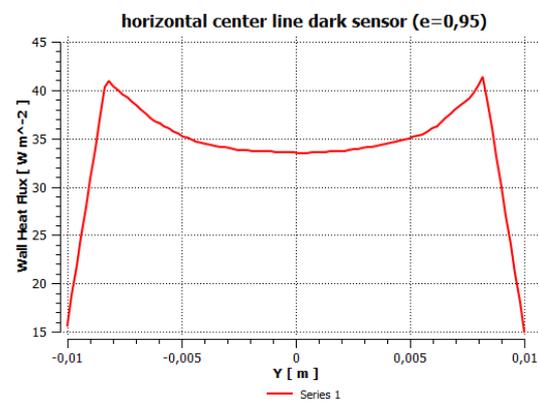


а

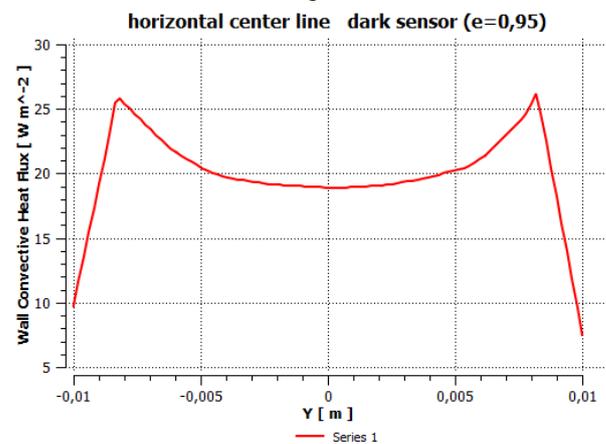


в

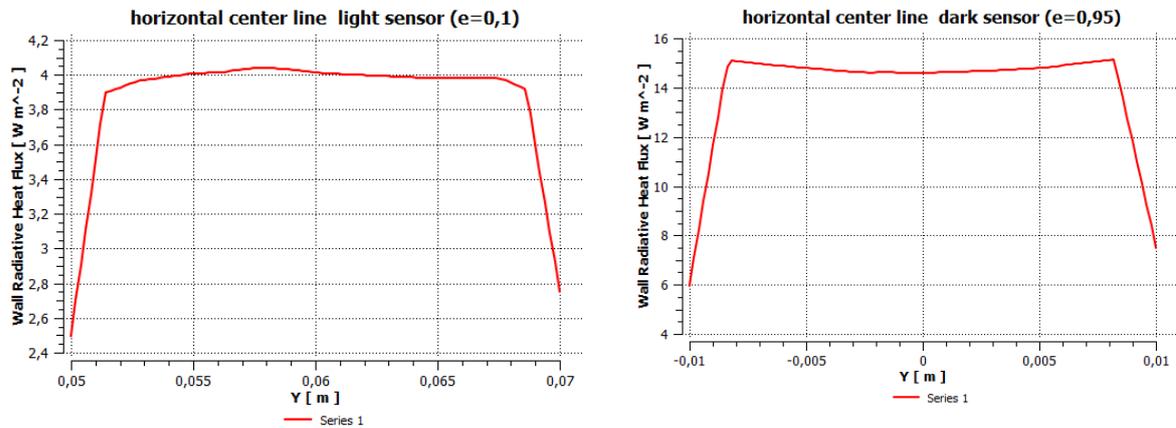
«dark» сенсор



б



г



д

е

Рисунок 3.48 – Розподіл теплових потоків в комірках приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії *i-скла*: а, б – загальний тепловий потік для комірки з сенсором «light» і «dark» відповідно, в, г – конвективний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно, д, е – радіаційний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно

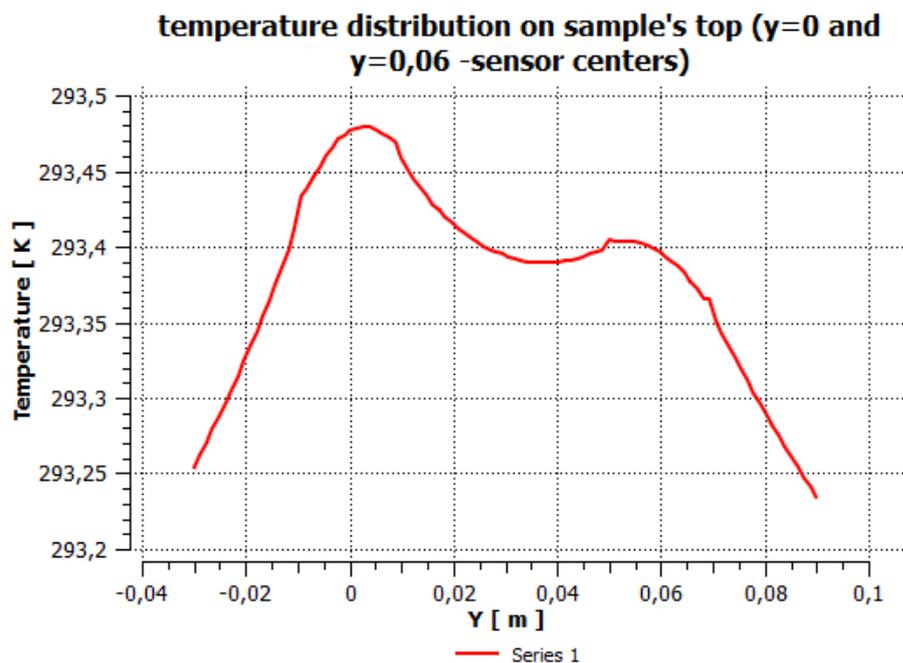


Рисунок 3.49 – Розподіл температури по поверхні зразка (для *i-скла*) напроти сенсорів: $y = 0$ м – «dark» сенсор; $y = 0,06$ м – «light» сенсор

На рис. 3.50 зображено температурне поле в перерізі приладу для вимірювання контролю коефіцієнту емісії, яке проходить через центр комірок «light» та «dark» для випадку випробувань на зразку і-скла.

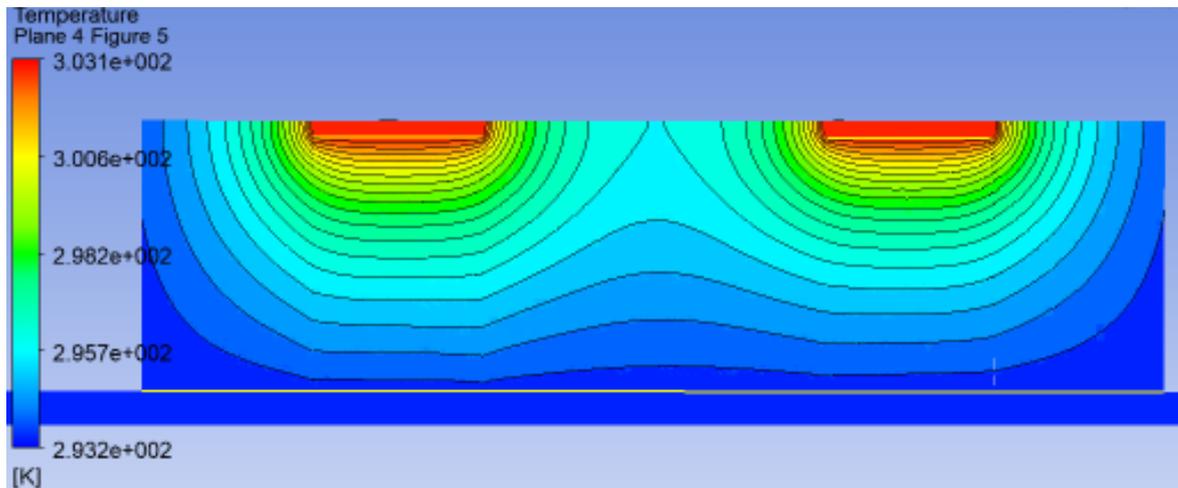


Рисунок 3.50 – Температурне поле на осі вимірювального елемента для і-скла

В табл. 3.10 наведено інтегральні величини значень теплового потоку в комірках «light» та «dark» при проведенні досліджень і-скла.

Таблиця 3.10 – Інтегральні теплові потоки для і-скла

Тепловий потік	Dark sensor $\varepsilon = 0,95$	Light sensor $\varepsilon = 0,1$
Загальний тепловий потік Q_{Σ} , Вт	1,103e-02	8,346e-03
Конвективний тепловий потік Q_C , Вт	6,664e-03	7,156e-03
Радіаційний тепловий потік Q_R , Вт	4,362e-03	1,190e-03

В таблиці 3.11 наведено значення температур в усталеному режимі в характерних точках, які показано на рис. 3.34 у випадку випробувань на і-склі.

Таблиця 3.11 – Зміна температур в характерних точках моделі для і-скла

ε_2	S_D , °C	S_L , °C	G_D , °C	G_C , °C	G_L , °C
0,11	29,932	29,951	20,326	20,244	20,246

Виходячи з отриманих результатів, наведених на рис. 3.39-3.50, для випадку, коли як зразок розглядалося скло, при варіації коефіцієнтів емісії покриття, різниця температури між центральною точкою та поверхнею зразка не перевищувала 0,5 К. [130,131]

3.4 Висновки до розділу

Проведено комп'ютерне моделювання та верифікацію процесів складного радіаційного та конвективно-кондуктивного теплообміну в циліндричних робочих комірках приладу для вимірювання 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.

Комп'ютерне моделювання встановило нелінійність та зміщення калібрувальної характеристики, які необхідно враховувати в алгоритмі опрацювання інформації, що надходить від первинних сенсорів приладу. В той же час, завдяки диференціальній схемі приладу, просторова орієнтація комірок практично не впливає на результати вимірювань.

За результатами моделювання теплообміну в приладі з двома комірками встановлено, що для комірки з «dark» сенсором, радіаційна складова теплового потоку майже у двічі більша за конвективну, а для комірки з «light» сенсором радіаційна та конвективна складові теплового потоку мають один і той же порядок. При зміні коефіцієнту емісії зразка спостерігається зростання теплового потоку з поверхні сенсору. Конвективна складова теплового потоку майже залишається постійною для дослідженого діапазону, зростання теплового потоку становить всього 1,8% при зміні коефіцієнту емісії зразка від 0,1 до 0,9.

При порівнянні конвективні теплові потоки для вимірювальних комірок з «dark» та «light» сенсорами встановлено, що конвективний тепловий потік у комірці зі «light» сенсором більший за конвективний потік у комірці з «dark» сенсором. Так для малих емісійних характеристиках зразка ($\varepsilon = 0,1$), ця різниця становить до 7%, а при високих значеннях коефіцієнта емісії зразка ($\varepsilon = 0,9$) – 2%, тобто зі збільшенням коефіцієнта емісії значення конвективних потоків для різних сенсорів наближаються один до одного. Більше значення конвективної складової теплового потоку для вимірювальної комірки з «light»

сенсором обумовлено більшою різницею температур між центром сенсора та центром поверхні зразка.

Для визначення динаміки зміни температури з часом були проведені розрахунки в нестационарній постановці комп'ютерної моделі теплообміну приладу, виходячи з отриманих результатів, стабілізація температури зразка відбувається після 2000 секунди, що в подальшому дозволяє розглядати режим як допустимий для проведення контролю коефіцієнту емісії.

4 МЕТОДИЧНЕ ТА АПАРАТНО-ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕПЛОВОГО ОПОРУ ОБОЛОНКИ БУДІВЛІ ТА ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ЕМІСІЇ.

4.1. Методика контролю теплового опору оболонки будівлі

Запропонована методика є розвитком чинних стандартів ДСТУ БВ.2.6-17 [8], ДСТУ БВ.2.6-101 [1], ДСТУ 4035 [7], ДСТУ ISO 6946 [19], ДСТУ ISO 9869 [18], ДСТУ ISO 10211-1 [34], ДСТУ ISO 10211-2 [35], ISO 6781 [29], будівельних норм ДБН В.2.6-31 [14] і нормативного документу М 00013184.50.23-01 [135]. Він стосується експериментального визначення фактичних значень опору теплопередаванню і трансмісійних теплових втрат будівель (споруд) і поширюється на зовнішні огорожувальні конструкції різних будівельних об'єктів, наприклад, житлових, адміністративних, суспільних, виробничих, сільськогосподарських споруд, що вимагають витрат енергії на своє функціонування, а саме: зовнішні стіни, дахи, горищні та підвальні перекриття та перекриття над проїздами та підвалами, вікна, вітражі в зовнішніх стінах тощо.

Методика може бути застосована для обстеження як теплоізоляційної оболонки будівлі (споруди) в цілому, так і окремих будівельних елементів.

Методика поєднує в собі дистанційний (за допомогою тепловізійної техніки) якісний аналіз температурних полів зовнішніх огорожувальних конструкцій та інструментальне визначення теплотехнічних показників навколишнього середовища – температури, вологості, тиску та швидкості руху повітря поблизу поверхонь огорожувальних конструкцій – з кількісними контактними вимірюваннями значень поверхневої густини теплового потоку та температури обстежуваної поверхні та повітря поблизу них в представницьких зонах огорожувальних конструкцій [115, 116, 136, 137]. Теплотехнічні характеристики теплоізоляційної оболонки будинку визначають за наявності значного температурного напору, що не менше ніж 15 К, при включеній системи опалення в холодний період року, або в весняно-

осінній період шляхом штучного підігрівання або підсиленої вентиляції повітря всередині приміщення (рисунок 4.1) [115,116].



Рисунок 4.1 – Методика неруйнівного контролю теплового опору

На першому етапі проводяться аналіз та визначення параметрів приміщення, необхідні для проведення експерименту та моделювання.

На другому етапі проводиться термографування приміщення відповідно до ISO 6781 [29] для знаходження місць відповідного розташування сенсорів, щоб уникнути місць пошкоджень огорожувальної конструкції.

Після цього проводиться монтаж сенсорів теплового потоку та температури відповідно до рекомендацій ISO 9869 [18] та врахуванням результатів тепловізійної зйомки.

На третьому етапі проводяться випробування відповідно до [18].

Вхідними для CFD моделі є результати за перших 6–24 годин експерименту або дані отримані методом відбору зразків згідно з ISO 9869 [18]. Після чого експеримент продовжується відповідно до рекомендацій стандарту ISO 9869 [18].

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

Наступним етапом проводиться валідація CFD моделі за результатами вимірювань, використовуючи значення відповідних температур і теплових потоків.

При *підготованні до обстеження* оболонки будівлі в натурних умовах потрібно ознайомитися з технічною документацією і вибрати та підготувати необхідні засоби вимірювальної техніки. Необхідно ознайомитися з проектною документацією, енергетичним паспортом (за наявності) та нормативно-технічними документами, що стосуються будівлі (споруди), включаючи вивчення будівельних креслень фасадів, планів, деталей огорожувальних конструкцій з геометричною прив'язкою до лінійних розмірів будівлі в цілому та розглянути загальні відомості про будівлю, у тому числі норми з опору теплопередаванню, що діяли під час будівництва, а також термін експлуатації, дані про проведені раніше роботи з ремонту, модернізації та (або) реконструкції, про кліматичний район розташування будівлі, особливості навколишнього ландшафту [93, 115, 116, 136, 137]. Це дозволить визначати місця розташування утеплювачів, елементів та зон з теплопровідними включеннями, що впливають на розподіл температури по поверхні обстежуваної оболонки будівлі і попередньо вибрати представницькі зони, а також визначити очікувані значення основних теплотехнічних характеристик за енергетичним паспортом або проектною документацією чи, у разі їх відсутності, попереднім розрахунком з використанням додаткових даних про теплофізичні характеристики будівельних матеріалів [93, 115, 116, 136, 137].

Враховуючи рекомендації нормативних документів [18, 19] виконується вибір та комплектування потрібних засобів вимірювальної техніки та допоміжного устаткування.

Шляхом *візуального обстеження* умов експлуатації і технічного стану огорожувальних конструкцій за зовнішніми ознаками виявляються в

будівельних елементах із зовнішнього та внутрішнього боків будівлі можливі дефекти та пошкодження, які знижують теплозахисні властивості огорожувальних конструкцій [93, 115, 116, 136, 137]. До них можна віднести:

а) в цегляних стінах – деформації та пошкодження, що з'явилися в результаті нерівномірного осадження фундаменту, впливу теплових і динамічних факторів (тріщин у кладці по осях колон, сколів цеглин, пошкоджень опорних вузлів перекриття, тощо), руйнування та відшарування цеглини і розчину із зовнішнього боку цегляних стін; сколи, мокрі плями і замочені стіни через незадовільне відведення води з крівлі, руйнування цокольної частини стін внаслідок замочування (при розморожуванні та порушенні гідроізоляції), місця руйнування кладки на карнизах та підвіконних ділянках [93, 115, 116, 136, 137];

б) в панельних стінах – зсуви та перекоси (прогини) стінових панелей в площині стін, руйнування елементів закладання у стиках стінних панелей (цементні закладання, ущільнені прокладки, герметизувальні мастики) відшарування захисних шарів у стінових панелях з оголенням та кородуванням арматури, кородовані закладові деталі, опорні вузли і арматура панелей, місця з порушеним антикорозійним шаром деталей кріплення, а також деформації вузлів кріплення стінових панелей внаслідок нерівномірного осадження фундаментів, теплових і динамічних дій (зсувів опорних вузлів, руйнування швів в панелях тощо) [93, 115, 116, 136, 137];

в) зниження несучої здатності залізобетонних покрівельних плит (тобто руйнований захисний шар бетону, оголена та кородована арматура, зруйновані опорні плити, наявність на внутрішній поверхні плит тріщин, наскрізних отворів, вологих плям); місця з корозійним ураженням профільного настилу, підвищеним зволоженням утеплювачів, відсутність зчеплення пароізоляційного шару з гофрами профільного настилу і утеплювача з пароізоляцією, розривів, проколів і здуття покрівельного килима, ступеню збереження в ньому бітумної основи, фарби або захисного шару, неспівпадіння з'єднання покрівлі з вертикальними конструкціями

(стінами, парапетами), невідповідності ухилів покрівлі та водостоків вимогам проекту, а також товщини шарів покрівів та матеріалів, що застосовані в них, проектним рішенням, застій води в розжолобку покрівлі, засмічення водостоків та водоприймальних пристроїв, наявність навантажень на покриття, що не передбачені проектом, відкладення матеріалів, сміття, частин устаткування, снігового покриву, місцевої нальоди тощо; порушення герметичності швів і сполучень віконних і дверних рам та відсутність пристроїв відкривання віконних рам, парапетних плит або інших засобів захисту на карнизних ділянках стін, фартухів, жолобів на підвіконних та інших ділянках стін з водовідведенням [93, 115, 116, 136, 137];

г) на внутрішніх поверхнях огорожувальних конструкцій – ознаки порушення температурно-вологісного режиму (мокрі плями, сліди паморозі, льоду на поверхні оболонки будівлі, в кутах тощо) [93, 115, 116, 136, 137].

За результатами цього візуального обстеження складається відомість виявлених дефектів, що погіршують теплозахисні властивості огорожувальних конструкцій. За наявності численних дефектів і пошкоджень, вказаних у відомості дефектів, а також ознак незадовільного температурно-вологісного режиму всередині приміщень, приймається рішення щодо оформлення протоколу про доцільність або недоцільність продовження обстеження. У випадку визнання недоцільності подальших робіт приймається рішення про дату повторного обстеження стану теплозахисту після усунення виявлених недоліків [93, 115, 116, 136, 137].

По закінченні візуального обстеження, включаючи оцінювання умов експлуатації будинку та метеоумов на момент обстеження, та прийняття рішення щодо продовжування випробувань готують поверхні, які підлягають обстеженню, оцінюють метеоумови і вимірюють показники навколишнього середовища, які повинні відповідати таким вимогам [93, 115, 116, 136, 137]:

- швидкість вітру не більше 4 м/с при обстеженні будівель з опором теплопередаванню огорожувальних конструкцій на рівні $(1,0-2,0) \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ і

2,0 м/с при обстеженні будівель з опором теплопередаванню більше ніж $2,0 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

- відносна вологість повітря не більше 80% за температури 20°C ;
- атмосферний тиск від 84 кПа до 106,7 кПа;
- температура повітря від мінус 15°C до 30°C .

Вимірювання показників зовнішнього навколишнього середовища виконують поблизу будівлі на відстані не більше ніж 20 м, на висоті 1,5 від поверхні землі, а для вимірювань на даху – не менше 2 м над найбільш високою ділянкою покрівлі. Швидкість вітру вимірюють в тих самих точках, в яких виміряні температура та відносна вологість повітря. Вимірювання в різних точках слід виконувати синхронно або з мінімальним розривом у часі.

Температуру та відносну вологість повітря всередині приміщення вимірюють у центральній зоні приміщення на висоті від 1 м до 1,5 м від підлоги. Повний цикл одиничних вимірювань температури, відносної вологості повітря та швидкості руху повітря всередині приміщення виконують одночасно на різних рівнях будівлі не менше трьох разів за період обстеження [93, 115, 116, 136, 137].

За відсутності серйозних відхилень показників навколишнього середовища від перелічених вимог виконують **оглядову тепловізійну зйомку** зовнішньої поверхні з одночасним фотографуванням будівлі та вимірюванням лінійних та кутових розмірів з метою визначення представницьких зон з характерними базовими і аномальними ділянками та їх площі. За результатами аналізування термограм та отриманих температурних полів остаточно вибирають представницьку зону (зони), які включають максимально можливу кількість різних типів характерних термічно однорідних ділянок, наприклад, фрагмент фасаду будівлі, що містить однорідну ділянку стіни, вікно, надвіконну балку, ділянку стіни уздовж теплових комунікацій тощо. [93, 115, 116, 136, 137] На рисунку 4.2 наведено приклад відбору характерних ділянок на фасаді будинку.

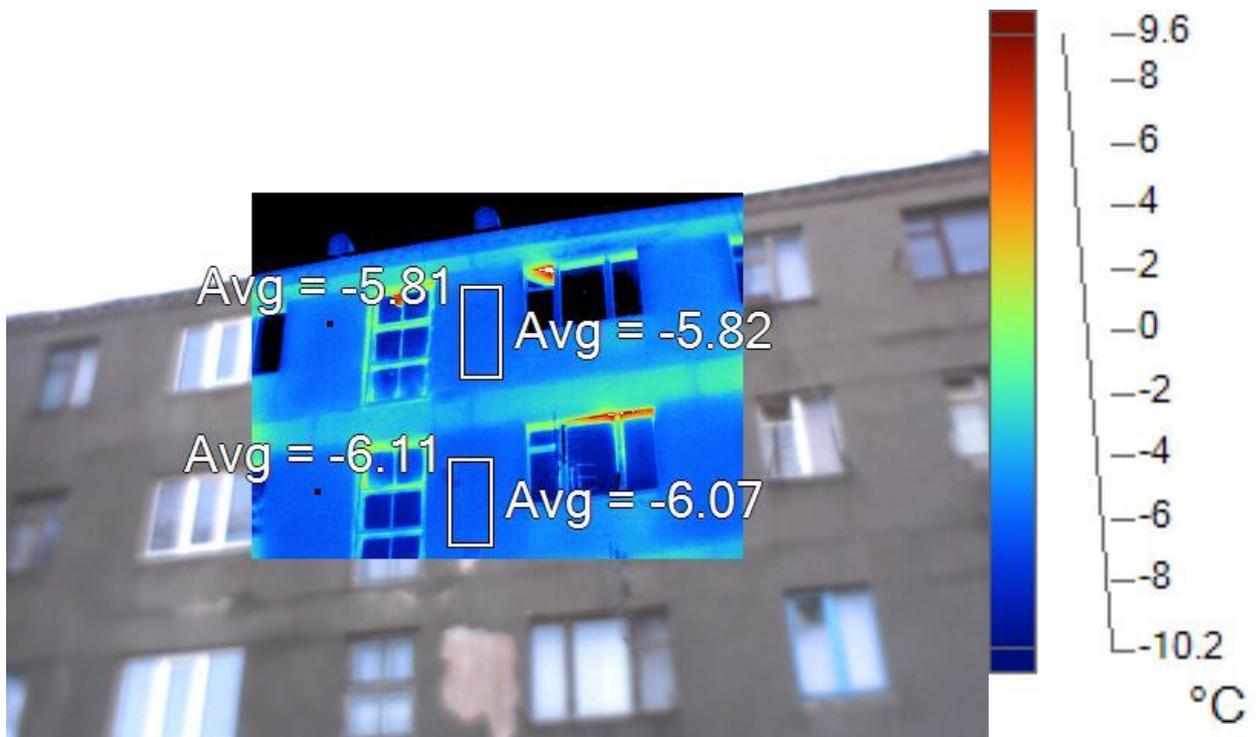


Рисунок 4.2 – Приклад визначення характерних ділянок на фасаді будинку

Обрану представницьку зону (зони) поверхні огорожувальних конструкцій розбивають на характерні термічно однорідні ділянки для проведення повного обсягу безконтактних і контактних вимірювань та визначають серед них бездефектні, що мають неоднакову конструкцію, які приймають за базові, а також ділянки з відхилами поверхневої температури – аномальні. До цих ділянок відносять ділянки, температура зовнішньої поверхні яких відрізняється від температури характерної базової ділянки більше ніж на 2 К [93, 115, 116, 136, 137].

Основне тепловізійне обстеження теплоізоляційної оболонки будівлі (споруди) направлене на безконтактне вивчення розподілів поверхневої температури огорожувальних конструкцій з одночасним уточненням даних обмірних робіт для обчислення значень площі вибраних представницьких зон і окремих характерних ділянок, базових й аномальних. Структуру і зміст робіт з основного тепловізійного обстеження огорожувальних конструкцій показано на рисунку 4.3 [93, 115, 116, 136, 137].

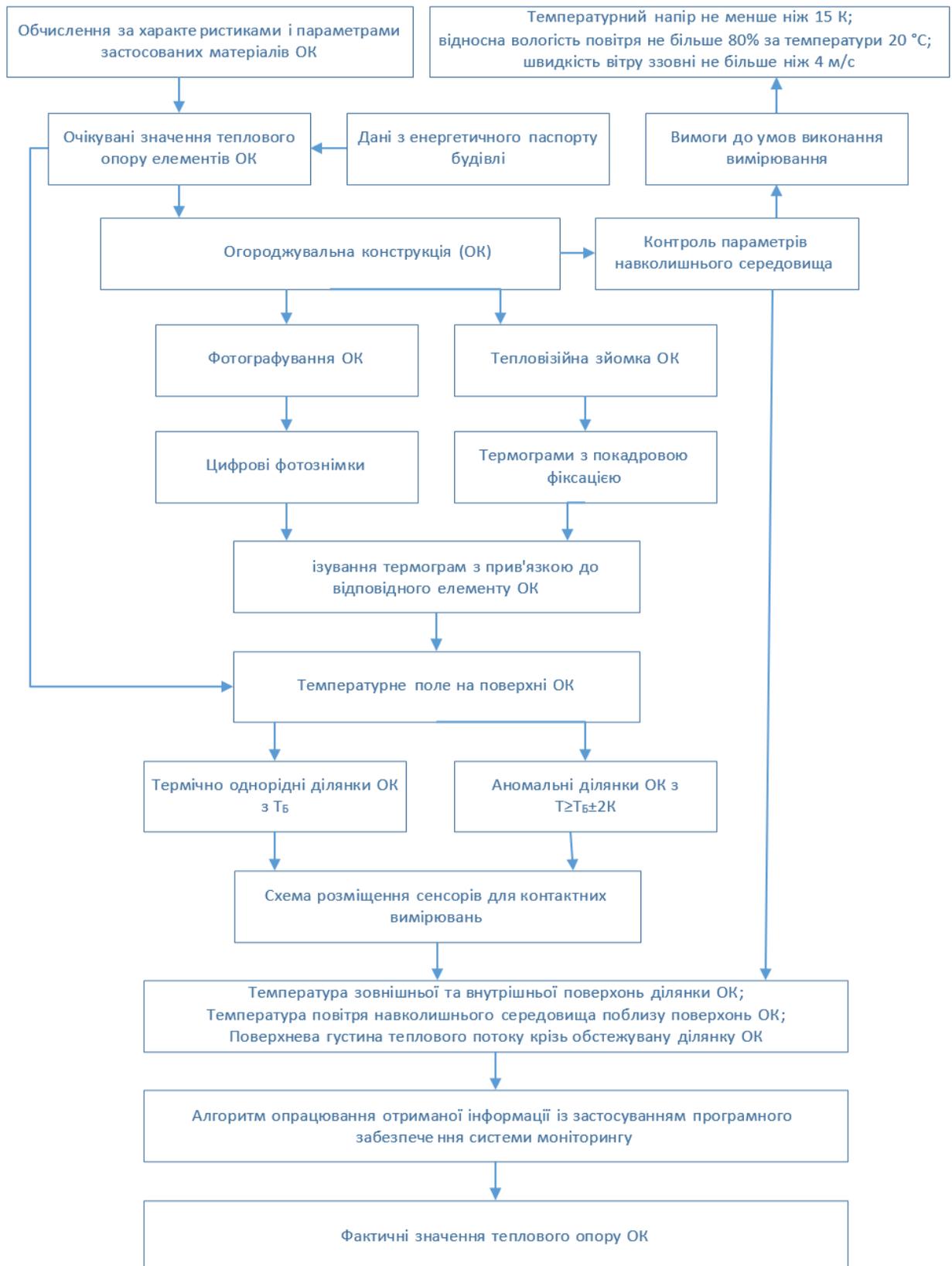


Рисунок 4.3 – Структурна блок-схема проведення робіт з безконтактного визначення температурних полів обстежуваної оболонки будівлі (основного тепловізійного обстеження) [93, 115, 116, 136, 137]

Під час основного тепловізійного обстеження автоматично контролюють показники навколишнього середовища, зокрема середньодобові значення температури зовнішнього та внутрішнього повітря. При цьому результати вимірювання температури та відносної вологості зовнішнього повітря, швидкості та напрямку вітру зіставляють з даними спостережень найближчих метеостанцій за період проведення натурних обстежень, а також середньомісячними та багатомісячними [93, 115, 116, 136, 137].

Якщо отримані показники навколишнього середовища відповідають вимогам до їх значень для проведення тепловізійного обстеження, приступають до безконтактного обстеження огорожувальних конструкцій шляхом термографування зі застосуванням тепловізійної техніки, починаючи з налаштування тепловізора згідно з вказівками, що надані в його експлуатаційному документі. При цьому заздалегідь визначають температуру фону і коефіцієнт емісії обстежуваних поверхонь огорожувальних конструкцій в актуальному для тепловізора спектральному діапазоні [93, 115, 116, 136, 137].

За результатами основної тепловізійної зйомки уточнюють межі, геометричні розміри і площі ділянок, ступінь їх термічної однорідності, наявність теплопровідних включень, містків холоду, а також місця установки контактних перетворювачів теплового потоку і температури на характерних базових ділянках [93, 115, 116, 136, 137].

Детальне термографування внутрішньої поверхні базових і виявлених аномальних ділянок виконують усередині приміщення послідовно по намічених ділянках з покадровим записом термограм. Термографування верхніх поверхів висотних будівель проводять всередині приміщень, якщо неможливо близько підійти до них з балкона або сусідніх споруд то застосовують БПЛА з змонтованою тепловізійною камерою [138,139].

Якщо огорожувальних конструкцій верхніх поверхів висотних будівель мають таку ж конструкцію, що і на нижніх поверхах, і немає інформації про наявність дефектів в них, то термографування верхніх поверхів

можна обмежити загальним зовнішнім оглядовим знімком, що охоплює всю стіну.

Для виявлених температурних відхилів встановлюють їх тип і розміри та можливі причини, наслідком яких вони є (наприклад, дефекти і пошкодження теплоізоляції, недостатність або відсутність теплоізоляційних шарів, наявність вологи, проникнення повітря та інше). Розміри та можлива причина виявленої аномальної ділянки можуть бути встановлені, виходячи з досвіду робіт з термографування, теплотехнічних розрахунків, інших досліджень, а також за допомогою використання довідкових термограм для порівняння з отриманими на обстежуваній огорожувальній конструкції. Довідкові термограми можуть бути отримані в лабораторії або в реальних умовах при випробуванні аналогічних огорожувальних конструкцій (бездефектних і з конкретними дефектами) за ідентичних умов навколишнього середовища при вимірюваннях[93, 115, 116, 136, 137]..

За результатами термографування аномальних ділянок усередині будівлі визначають їх межі та площу, оцінюють можливість випадання роси і уточнюють межі та площу поверхні конденсації. На термограмах представницьких зон, знятих усередині будівлі, відзначають ділянки з найнижчою температурою, обчислюють можливі значення температури цієї ділянки на підставі розрахункової температури повітря всередині приміщення та зовні [93, 115, 116, 136, 137]..

За термограмами аномальних ділянок оцінюють їх розміри, і, якщо площа аномальної ділянки перевищує 5% від загальної площі всіх аналогічних характерних базових ділянок і може вплинути на результати розрахунку приведенного опору теплопередаванню, приймається рішення про необхідність контактних вимірювань на цих ділянках.

За наявності в огорожувальних конструкціях представницьких зон з теплопровідними включеннями також приймається рішення про виконання контактних досліджень цих включень. У разі неможливості установки контактних сенсорів температури на зовнішні поверхні цих зон слід провести

ретельні безконтактні вимірювання поверхневої температури за допомогою тепловізора або оптичного пірметра [29, 31, 32]. Такі вимірювання проводять періодично з інтервалом 2–3 год впродовж всього періоду виконання контактних вимірювань.

За результатами основного тепловізійного обстеження уточнюють обсяг робіт з контактного обстеження та місця встановлення первинних сенсорів (сенсорів теплового потоку і сенсорів температури). При складанні схеми розміщення сенсорів враховують всі ділянки огорожувальних конструкцій, на яких необхідно знайти опір теплопередаванню, тобто базові бездефектні ділянки огорожувальних конструкцій, що мають різну конструкцію, а також ділянки з аномальними значеннями температури поверхні. Базові ділянки для контактних вимірювань доцільно вибирати так, щоб якомога більша їх кількість була сконцентрована в одній представницькій зоні – для зручності одночасних вимірювань. Зазвичай, представницьку зону огорожувальних конструкцій вибирають в кутовому приміщенні, фасад якого виходить на північ, північний схід або північний захід [93, 115, 116, 136, 137].

Метою *контактних вимірювань теплотехнічних параметрів і характеристик* (значень поверхневої температури та густини теплового потоку) із залученням результатів вимірювання показників навколишнього середовища є визначення фактичних значень теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій за умов експлуатації. Отримане значення приведенного опору теплопередаванню крізь огорожувальних конструкцій застосовують при обчисленні показників, які потрібні для оформлення додатку до енергетичного паспорту будівлі [93, 115, 116, 136, 137].

Перед початком контактних вимірювань відповідно до уточненої схеми встановлюють сенсори теплового потоку, як правило, на внутрішню поверхню огорожувальних конструкцій в центрі термічно однорідної зони, при цьому робочі поверхні сенсорів теплового потоку мають бути нормальні до напрямку вимірюваного теплового потоку (рис. 4.5). Для вимірювання температури

поверхонь sensori температури встановлюють як на внутрішньому, так і на зовнішньому боці огорожувальних конструкцій [93, 115, 116, 136, 137].



Рисунок 4.5 – Внутрішній вигляд приміщень під час контактних вимірювань

При встановленні сенсорів теплового потоку на відповідне місце обстежуваного об'єкту слід дотримуватися таких правил:

- 1) місце встановлення сенсорів теплового потоку має бути вибрано в зоні, що відповідає одномірності вимірюваного теплового потоку, тобто на відстані від деталей та вузлів, які мають високу теплосприймальність (наприклад, металеві заставні деталі, елементи вентиляційних систем тощо);
- 2) поверхня в місці встановлення сенсорів теплового потоку має бути зачищена до зняття відчутної шорсткості та не мати кривизни;
- 3) у площині контакту з об'єктом не повинно бути повітря;
- 4) сенсори теплового потоку необхідно екранувати від будь-яких зовнішніх впливів, що призводять до виникнення градієнта температури на поверхні сенсорів теплового потоку;
- 5) коефіцієнт емісії поверхні сенсорів теплового потоку повинна бути близька до коефіцієнту емісії обстежуваної поверхні. Його значення не повинно відрізнятися від значення коефіцієнту емісії обстежуваної поверхні більше ніж на $\pm 0,03$;

б) кріплення сенсорів теплового потоку на поверхні слід виконувати згідно з ДСТУ 3756 [37].

У разі застосування сенсорів теплового потоку з вбудованим сенсором температури, чутливий елемент якого розміщено у шарі однієї з робочих поверхонь сенсорів теплового потоку, його встановлюють так, щоб робоча поверхня з вмонтованим чутливим елементом (термоелектричного сенсору температури) була звернена до навколишнього середовища.

Електричні сигнали сенсорів теплового потоку та сенсорів температури реєструють безпосередньо через встановлений інтервал часу протягом декількох повних діб (детальніше критерії оцінювання достатності терміну вимірювання розглянуто в ДСТУ ISO 9869 [18]).

Вимірювана інформація, яку отримують під час теплотехнічного обстеження будівлі (споруди), містить лінійні розміри для обчислення площі окремих характерних ділянок і представницьких зон та загальної площі огорожувальних конструкцій (теплоізоляційної оболонки будівлі) та довжини теплопровідних включень, а також масиви поточних значень сигналів сенсорів теплового потоку і сенсорів температури та покази інших задіяних пристроїв і приладів [93, 115, 116, 136, 137].

За результатами обмірних робіт, які виконані шляхом прямих вимірювань лінійних і кутових величин за допомогою відповідних засобів вимірювальної техніки або непрямих вимірювань із застосуванням геометричного репера за термограмами і фотографіями детальної зйомки (якщо таку інформацію не можна почерпнути з проектної документації), обчислюють площу теплоізоляційної оболонки A_0 та всіх ділянок A_n , як базових, так і аномальних, а також довжину всіх теплопровідних включень l_m [93, 115, 116, 136, 137].

За результатами вимірювання сигналів сенсорів температури у мілівольтах обчислюють поточні значення температури поверхонь

огороджувальних конструкцій ($T_{ВН_i}^П$ і $T_{ЗОВ_i}^П$) та повітряного середовища ($T_{ВН_i}^{НС}$ і $T_{ЗОВ_i}^{НС}$). При цьому значення температури в градусах Цельсія визначають:

- за показами вторинного вимірювального приладу (у мілівольтах) з урахуванням характеристик перетворення термоелектричних сенсорів температури та фактичної температури термостатування опорних спаїв;
- за показами вторинного вимірювального приладу з урахуванням характеристик перетворення сенсор температури – термометрів опору за;
- за показами цифрового табло при застосуванні контактних чи безконтактних цифрових вимірювачів температури.

За результатами вимірювання сигналів сенсорів теплового потоку вторинними вимірювальними приладами обчислюють поточні значення вимірюваної густини теплового потоку $q_{ВИМ_i}$ [Вт/м²] як добуток поточних показів вторинного вимірювального приладу $E_{сенсор_i}$ на градуовальний коефіцієнт сенсорів теплового потоку $K_{сенсор}$ за формулою (4.1):

$$q_{ВИМ_i} = K_{сенсор} \cdot E_{сенсор}, \quad (4.1)$$

За результатами вимірювання поточних значень густини теплового потоку $q_{ВИМ_i}$, температури поверхонь $T_{ВН_i}^П$ і $T_{ЗОВ_i}^П$ та повітря поблизу них $T_{ВН_i}^{НС}$ і $T_{ЗОВ_i}^{НС}$ для кожної ділянки n -го типу з N обстежених контактним способом обчислюють усереднені за певний період часу значення:

- температури поверхонь огороджувальних конструкцій $\bar{T}_{ВН_n}^П$ і $\bar{T}_{ЗОВ_n}^П$, повітря навколишнього середовища у граничних шарах цих поверхонь з обох боків ділянки $\bar{T}_{ВН_n}^{НС}$ і $\bar{T}_{ЗОВ_n}^{НС}$ та оберненої до прилеглого граничного шару навколишнього середовища поверхні сенсорів теплового потоку, застосованого для вимірювання густини теплового потоку, $\bar{T}_{ПТП_n}^П$;
- поверхневої густини теплового потоку, $q_{ВИМ_n}$.

Усереднення значень цих величин здійснюють за період часу, що дорівнює одній повній добі (24 год), або за кілька повних діб. За усереднені

значення перелічених величин слід брати середнє арифметичне поточних значень кожної величини, що виміряні через однакові проміжки часу.

Далі для кожної ділянки n -го типу з N обстежених обчислюють за усереднених значень вимірних величин, усереднені значення таких **теплотехнічних параметрів**:

температурного перепаду за формулою (4.2):

$$\Delta \bar{T}_{OK_n}^{\Pi} = \bar{T}_{BH_n}^{\Pi} - \bar{T}_{ZOB_n}^{\Pi}; \quad (4.2)$$

де $n = 1, 2, \dots, N$;

температурного напору за формулою (4.3):

$$\Delta \bar{T}_n^{HC} = \bar{T}_{BH_n}^{HC} - \bar{T}_{ZOB_n}^{HC}; \quad (4.3)$$

температурного перепаду між навколишнім середовищем та прилеглою поверхнею ділянки, тобто на відповідному граничному шарі за формулами (4.4) та (4.5):

$$\Delta \bar{T}_{BH_n} = \bar{T}_{BH_n}^{HC} - \bar{T}_{BH_n}^{\Pi}, \quad (4.4)$$

$$\Delta \bar{T}_{ZOB_n} = \bar{T}_{ZOB_n}^{\Pi} - \bar{T}_{ZOB_n}^{HC}; \quad (4.5)$$

фактичної густини теплового потоку за формулою (4.6):

$$\bar{q}_{\Phi AK_n} = \bar{q}_{\text{ВИМ}_n} \cdot \frac{\bar{T}_{BH_n}^{HC} - \bar{T}_{BH_n}^{\Pi}}{\bar{T}_{BH_n}^{HC} - \bar{T}_{\text{ПТП}_n}^{\Pi}}; \quad (4.6)$$

Для кожної ділянки n -ого типу з N обстежених обчислюють усереднені значення основних **теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій**, а саме:

теплового опору (4.7) з урахуванням формул (4.2) і (4.6):

$$\bar{R}_{OK_n} = \Delta \bar{T}_{OK_n}^{\Pi} / \bar{q}_{\Phi AK_n}, \quad (4.7)$$

або з урахуванням формули розрахунку теплового опору за значеннями товщини конструкції та її ефективної теплопровідності (4.8):

$$\bar{R}_{OK_n} = d_n / \bar{\lambda}_{\text{ЕФ}_n}; \quad (4.8)$$

опору теплопередаванню крізь ділянку у разі відсутності теплопровідних включень за формулою (4.9):

$$\bar{R}_{\Sigma_n} = \Delta \bar{T}_n^{HC} / \bar{q}_{\Phi AK_n}. \quad (4.9)$$

За відомих усереднених значень коефіцієнтів теплообміну $\alpha_{\text{ВН}}$ та $\alpha_{\text{ЗОВ}}$ та теплового опору \bar{R}_{OK_n} , усереднене значення опору теплопередаванню \bar{R}_{Σ_n} крізь ділянку n -го типу обчислюють за формулою (4.10):

$$\bar{R}_{\Sigma_n} = 1/\alpha_{\text{ВН}} + \bar{R}_{\text{OK}_n} + 1/\alpha_{\text{ЗОВ}}. \quad (4.10)$$

Для конкретних типів огорожувальних конструкцій у якості відомих значень коефіцієнтів теплообміну $\alpha_{\text{ВН}}$ та $\alpha_{\text{ЗОВ}}$, як правило, беруть нормативні дані: $\alpha_{\text{ВН}} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ і $\alpha_{\text{ЗОВ}} = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (див. додаток Е до ДБН В.2.6-31 [14]).

У відповідності до таблиці Ф3 до ДБН В.2.6-31 [14], для кожного з будівельних елементів оболонки будівлі, повинні бути вказані характерні термічно однорідні ділянки, що входять до їх складу (наприклад, для будівельного фрагмента «стіна» це є цегляні кладки, залізобетонні перекриття, панелі, стики панелей тощо). Також повинні бути приведені наступні дані:

- сумарна площа ділянок кожного типу $\sum_{N=1}^{n=1} A_n$,
- сумарна довжина всіх теплопровідних включень $\sum_{M=1}^{m=1} l_m$,
- загальна площа всіх обстежених будівельних елементів A_0 .

Якщо для будь якої характерної ділянки вимірювання виконано в кількох точках (наприклад, в трьох по висоті приміщення), то в таблицю записують середні арифметичні значення теплового опору та опору теплопередаванню.

Також повинні бути розраховані усереднені значення приведенного теплового опору і приведенного опору теплопередаванню крізь будівельні елементи оболонки будівлі при цьому:

- усереднене значення приведенного теплового опору, що розраховують для термічно неоднорідного будівельного елементу оболонки будівлі, який містить N типів характерних термічно однорідних ділянок, обчислюють за формулою (4.11) з урахуванням (2.7) або (2.8):

$$\bar{R}_{\text{ПР}}^{\text{OK}} = \frac{\sum_{N=1}^{n=1} A_n}{\sum_{N=1}^{n=1} (A_n / \bar{R}_{\text{OK}_n})}, \quad (4.11)$$

- усереднене значення приведенного опору теплопередаванню крізь термічно неоднорідну огорожувальну конструкцію (або неоднорідний елемент оболонки), що містить N типів характерних термічно однорідних ділянок, обчислюють за формулою (4.12) з урахуванням (4.9) або (4.10):

$$\bar{R}_{\Sigma_{\text{ПР}}} = \frac{\sum_{n=1}^N A_n}{\sum_{n=1}^N (A_n / \bar{R}_{\Sigma_n})}, \quad (4.12)$$

- усереднене значення приведенного опору теплопередаванню крізь неоднорідну огорожувальну конструкцію, яка містить крім N типів характерних термічно однорідних ділянок ще M лінійних теплопровідних включень з відомими значеннями лінійних коефіцієнтів теплопередавання \bar{U}_{lm} , обчислюють за формулою (4.13):

$$\bar{R}_{\Sigma_{\text{ПР}}}^{\text{TB}} = A_o / \left[\sum_{n=1}^N (A_n / \bar{R}_{\Sigma_n}) + \sum_{m=1}^M (\bar{U}_{lm} \cdot l_m) \right]. \quad (4.13)$$

Додатково розраховують значення приведеної густини теплового потоку крізь термічно неоднорідну зону, що містить крім N типів характерних термічно однорідних ділянок ще M лінійних теплопровідних включень, за формулою (4.12), або з урахуванням даних, отриманих (4.13) за такою формулою:

$$\bar{q}_{\text{ФАКПР}}^{\text{TB}} = \frac{\Delta \bar{T}^{\text{HC}}}{A_o} \left[\sum_{n=1}^N (A_n / \bar{R}_{\Sigma_{\text{ПР}n}}) + \sum_{m=1}^M (l_m \cdot \bar{U}_{lm}) \right]. \quad (4.14)$$

За цими розрахунковими даними за необхідності можна далі обчислити такі величини:

- усереднене значення трансмісійного коефіцієнту теплопередавання крізь огорожувальні конструкції будівлі (споруди) за формулою (4.15):

$$\bar{U}_{\text{ТР}} = \bar{q}_{\text{ФАКПР}}^{\text{TB}} / \Delta \bar{T}^{\text{HC}} = \left[\sum_{n=1}^N (A_n / \bar{R}_{\Sigma_{\text{ПР}n}}) + \sum_{m=1}^M (l_m \cdot \bar{U}_{lm}) \right] / A_o; \quad (4.15)$$

- загальні трансмісійні тепловтрати будівлі за опалювальний період обчислюють за формулою (4.16):

$$Q_{\text{ТР}} = \bar{U}_{\text{ТР}} \cdot A_{\text{БУД}} \cdot D_d \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 10^{-9}, \text{ ГДж}, \quad (4.16)$$

де $A_{буд}$ – загальна площа оболонки опалюваної частини будівлі; D_d – кількість градусо-днів опалювального періоду, яку визначають залежно від температурної зони експлуатації будівлі з додатком В ДБН В.2.6-31 [14].

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 (4.17):

$$u_B(\epsilon_i) = \frac{U(\epsilon_i)}{k} \cdot 100\%, \quad (4.17)$$

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 (4.18):

$$u_B(S) = \sqrt{u_B(Ts)^2 + u_B(qs)^2} \quad (4.18)$$

Складова невизначеності, викликана дрейфом температури, оцінювалась за формулою:

$$u_B(q_\tau) = \frac{c \cdot \rho \cdot h}{q} \cdot \frac{dT}{d\tau} \cdot 100, \% \quad (4.19)$$

Складова стандартної невизначеності вимірювань різниці температури, оцінювалась за формулою (4.20):

$$u_B(T_\Delta) = \frac{U(T)}{\Delta T} \cdot 100, \% \quad (4.20)$$

Складова стандартної невизначеності вимірювань теплового потоку, за типом В, з урахуванням різниці коефіцієнтів емісії сенсора та поверхні досліджуваного об'єкта, оцінювалась за формулою (4.21):

$$u_B(q_{\Delta+\epsilon}) = \frac{U(q)}{k} + \left(\frac{\epsilon_{sens}}{\epsilon_{surf}} - 1 \right) \cdot 100, \% \quad (4.21)$$

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

$$u_B(\alpha, R_K, s_{sens}) = \left(\frac{\frac{1}{\alpha}}{\frac{1}{\alpha} + R_{sens} + R_K} - 1 \right) \cdot \left(1 + \alpha \cdot \frac{r_{sens}}{\lambda} \cdot \frac{\frac{1}{\alpha}}{\frac{1}{\alpha} + R_{sens} + R_K} \cdot \gamma \left(s_{sens}, \alpha \cdot \frac{r_{sens}}{\lambda} \right) \right) \cdot 100, \% \quad (4.22)$$

$$\text{де } \gamma \left(s_{sens}, \alpha \cdot \frac{r_{sens}}{\lambda} \right) = \frac{\int_0^\infty \frac{J_1(x) \cdot J_1(x \cdot s_{sens})}{x \left(x + \alpha \cdot \frac{r_{sens}}{\lambda} \right)} dx}{\int_0^\infty \frac{J_1(x) \cdot J_1(x \cdot s_{sens})}{x + \alpha \cdot \frac{r_{sens}}{\lambda}} dx};$$

R_K – 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.

Сумарна стандартна невизначеність вимірювань теплового опору за типом В визначається за формулою (4.23):

$$u_B(R_T) = \sqrt{u_B(S)^2 + u_B(q_\tau)^2 + u_B(T_\Delta)^2 + u_B(\alpha, R_K, s_{sens})^2 + u_B(q_{\Delta+\epsilon})^2} \quad (4.23)$$

Стандартні невизначеності типу А, при багатократних вимірюваннях вхідних величин температури $u_A(\Delta T)$ та теплового потоку $u_A(q)$ визначались за формулою (4.24):

$$u_A(E) = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (E_n - \bar{E})^2}{N(N-1)}} \quad (4.24)$$

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 (4.25):

$$u_A(R_T) = \frac{1}{R_T} \sqrt{\left(\left(\frac{1}{q}\right) \cdot u_A(\Delta T)\right)^2 + \left(\left(-\left(\frac{\Delta T}{q^2}\right)\right) \cdot u_A(q)\right)^2} \cdot 100\% \quad (4.25)$$

Сумарна стандартна невизначеність вимірювання теплового опору оболонки будівлі визначається за формулою (4.26):

$$u_C(R_T) = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (4.26)$$

Розширена стандартна невизначеність результатів вимірювання теплового опору оболонки будівлі при коефіцієнті охоплення $k = 2$ визначається за формулою (4.27):

$$U(R_T) = k \cdot u_C(R_T) \quad (4.27)$$

Для оцінки достовірності контролю теплового опору була використана формула (4.28):

$$D'(R_T) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \delta_{ST}} \int_{\delta_{RT}}^{\delta_{ST}} \exp\left(\frac{(R_T - x)^2}{-2(\delta_{ST})^2}\right) dx - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \delta_{RT}} \int_{\delta_{ST}}^{\delta_{RT}} \exp\left(\frac{(R_T - x)^2}{-2(\delta_{RT})^2}\right) dx \quad (4.28)$$

$$\text{де } \delta_{RT} = \frac{U(R_T)}{2} \cdot \frac{R_T}{100};$$

$$\delta_{ST} = \frac{U_{ST}(R_T)}{2} \cdot \frac{R_T}{100};$$

$U_{ST}(R_T)$ – розширена невизначеність результатів вимірювання теплового опору згідно стандарту ISO 9869 [18].

За результатами теплотехнічного обстеження теплозахисту будівлі (споруди) мають бути оформлені такі документи:

- відомість дефектів за результатами візуального огляду всіх зовнішніх будівельних елементів та тепловізійної зйомки їх зовнішніх поверхонь;
- акт теплотехнічного обстеження будівлі (споруди) за результатами визначення теплотехнічних характеристик і параметрів із застосуванням тепловізійної техніки для безконтактних вимірювань температури і сенсорів теплового потоку і сенсор температури для контактних вимірювань в сукупності з іншими задіяними приладами;
- протокол ступеню відповідності характеристик теплозахисту будівлі (споруди) нормативним вимогам за результатами опрацювання вимірної інформації та порівнянням отриманих числових значень з даними НТД;

- додаток до енергетичного паспорту будівлі (споруди), за необхідності, що повинен відповідати вимогам ДБН БВ.2.6.-31 [14].

4.2. Апаратно-програмна реалізація системи контролю теплового опору теплозахисної оболонки будівель

Для забезпечення дослідження теплового опору оболонки будівель підсистема вимірювання системи контролю реалізовано у відповідності до вимог встановленим для інформаційно-вимірювальних систем, і є сукупністю функціонально-об'єднаних вимірювальних, обчислювальних технічних засобів [140-142]. Характерною особливістю інформаційно-вимірювальних систем є модульний принцип побудови, який передбачає створення конструктивно завершених модулів і використання стандартних приладів [140-142]. Цей принцип забезпечує технічну та інформаційно-функціональну сумісність модулів, спрощує технічне обслуговування, дозволяє розширити функціональні можливості, а також підвищує точність і надійність системи [140-142].

Серед основних вимог, що висувуються до системи контролю теплового опору, є такі [137, 143]:

– теоретична обґрунтованість, відповідність вимогам стандартів, що регламентують проведення дослідження [137,140 , 143];

– функціональність: можливість проведення контролю теплового опору огорожувальних конструкцій теплозахисної оболонки будівель різних типів та в різних умовах [137,140 , 143];

– надійність: забезпечення можливості проведення вимірювань протягом тривалого часу в автономному режимі та автоматичне корегування помилок [137,140 , 143];

– економічність: мінімізація фінансових та ресурсних витрат при проведенні вимірювань [137,140 , 143].

На рис. 4.6 представлена схема побудови системи за модульним принципом. Відповідно до цієї схеми враховуються особливості огорожувальної конструкції та з'являється можливість проведення досліджень одночасно в великій кількості зон.

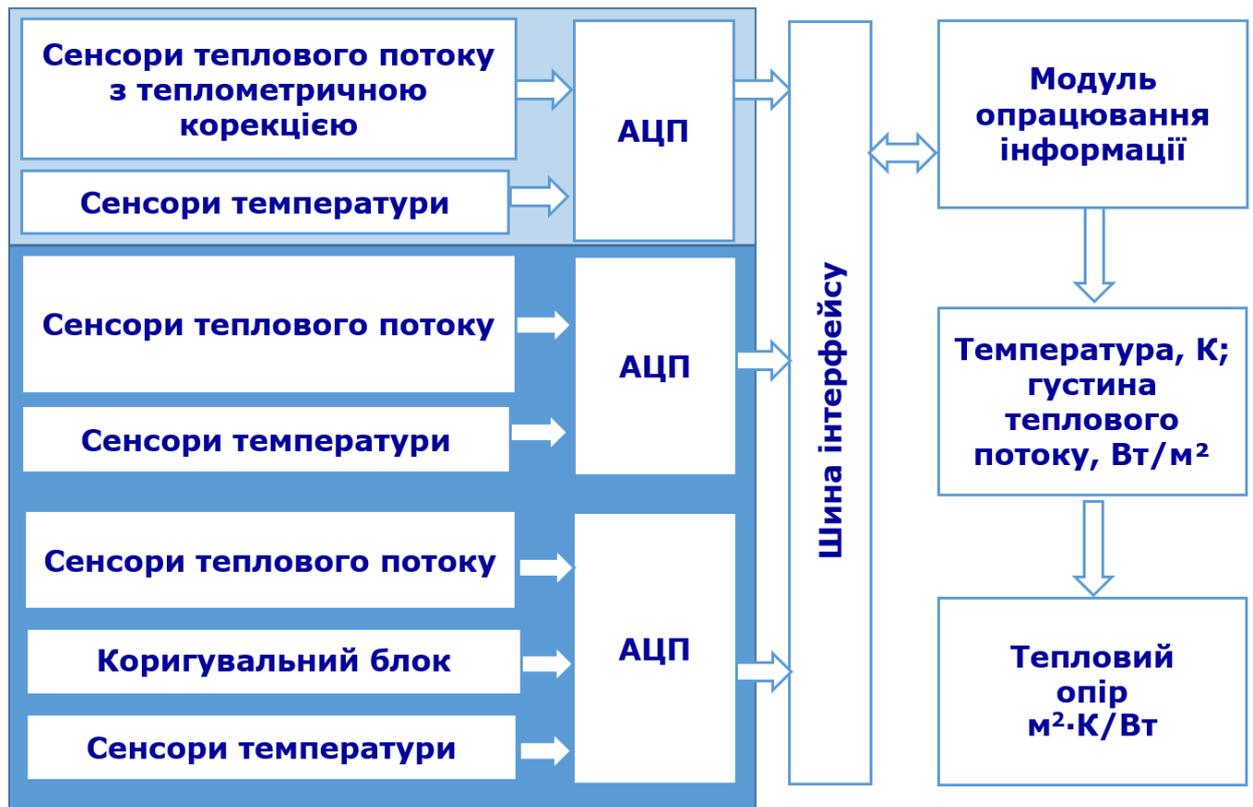


Рисунок 4.6 Схема побудови вимірювальної підсистеми, складена за модульним принципом [137, 143]

В першому варіанті модуля передбачається використання сенсорів теплого потоку з теплометричною корекцією інерційності [100], 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 сенсорі температури з індивідуальним калібруванням[137, 143].

В третьому варіанті модуля передбачається використання сенсорів теплого потоку різного розміру [93, 137, 143] та коригувального блоку, який

дозволяє враховувати складову пропорційну теплоті, що витрачається на нагрівання самого сенсору теплового потоку протягом вимірювання [143], знизити похибку вимірювання теплового опору огорожувальних конструкцій. Таке рішення рекомендується застосовувати для дослідження огорожувальних конструкцій складної форми. Для цього варіанту модуля пропонується використовувати сенсори температури поверхні, через вплив контактного теплового опору [93, 137, 143].

Модулі системи підключаються до шини інтерфейсу для встановлення і підтримання інформаційного обміну. У всіх випадках апаратно-програмний модуль реєстрації, опрацювання та візуалізації вимірювальної інформації залишається єдиним.

Для забезпечення гнучкості та масштабованості системи, проведено розробку модулів системи контролю з різною кількістю вимірювальних каналів, здатних адаптуватися до різноманітних типів огорожувальних конструкцій теплозахисної оболонки будівлі. При цьому ці модулі можуть бути з'єднані за допомогою інтерфейсу при дослідженні великих об'єктів. Варіанти модулів системи контролю на 48 та 8 каналів наведені на рис.4.7.



Рисунок 4.7 Зовнішній вигляд апаратних модулів системи контролю теплового опору [93, 137, 143].

Реєстрацію температури та густини теплового потоку, передавання, опрацювання та архівування вимірювальної інформації здійснюють за

допомогою апаратно-програмного модуля системи, структуру якого представлено на рисунку. 4.8 [93, 137, 143].



Рисунок. 4.8. Структура апаратно-програмного модуля системи [93, 137, 143]

На рисунку. 4.8. представлена реалізація апаратної частини системи моніторингу теплового опору огорожувальних конструкцій будівель, що реалізовано у вигляді інформаційно-вимірювальної системи. Вона являє собою сукупність функціонально об'єднаних модулів, сенсорів, допоміжного обладнання і персональний комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням.

Модуль реєстрації первинних даних складається з блоків реєстрації температури поверхонь огорожувальної конструкції та навколишнього середовища, а також реєстрації сигналів сенсорів теплового потоку.

Варіант модуля реєстрації первинних даних на 48 каналів для дослідження складних огорожувальних конструкцій з великою кількістю вимірювальних зон наведений на рис 4.9 [93, 137, 143].

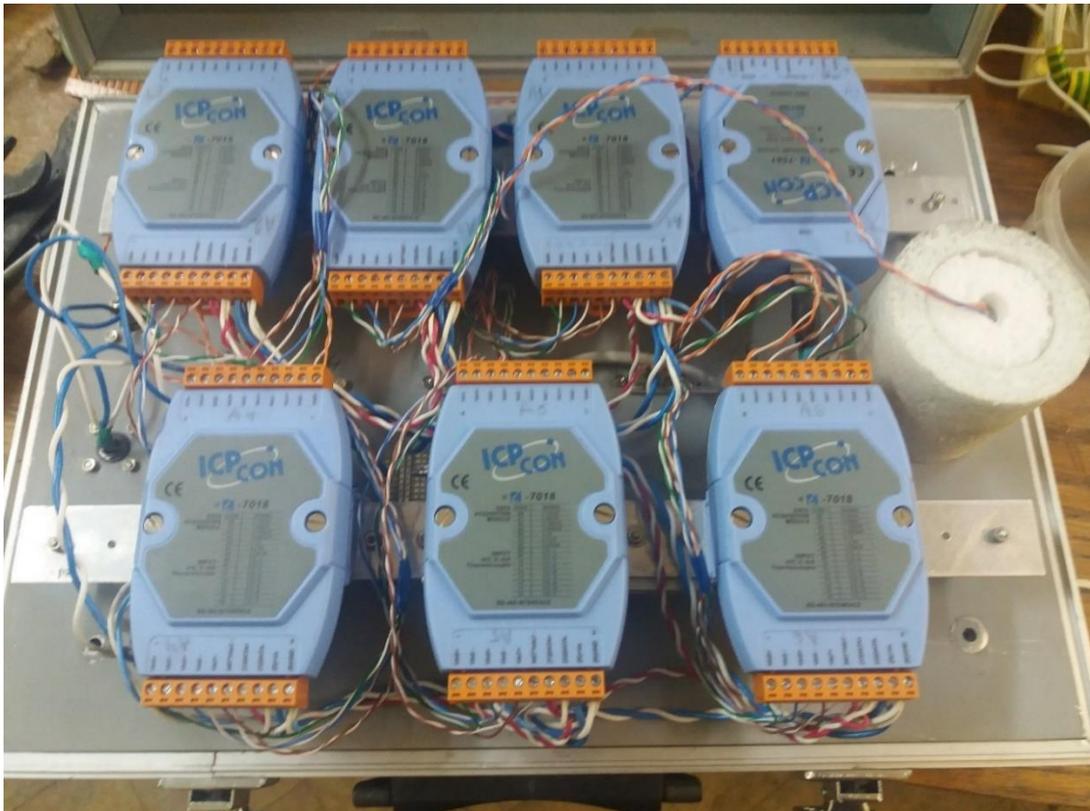


Рисунок 4.9 Модуль реєстрації первинних даних 48 каналів [93, 137, 143]

Для модулів реєстрації температури елементів системи та реєстрації сигналів досліджуваних сенсорів використано пристрій ICP DAS I-7018 [144], який має наступні характеристики:

- 8-канальний АЦП з розрядністю 16 біт і частотою перетворення 10 Гц;
- налаштування динамічного діапазону ± 15 мВ, ± 50 мВ, ± 100 мВ, ± 500 мВ, ± 1 В, ± 2.5 В;
- підтримка промислового магістрального інтерфейсу RS-485 зі швидкістю 1200 ~ 115200 bps та адресації, що дає можливість об'єднати до 255 пристроїв;
- підтримує термоелектричні перетворювачі J, K, T, E, R, S, B, N, C;
- оснащений блоком компенсації вільних спаїв термопар;
- в захищений корпус.

Також до модулю входить конвертер інтерфейсу RS-485/USB, який має гальванічну розв'язку та додатковий блок компенсації вільних спаїв термопар.

Модуль реєстрації первинних даних 8 каналів призначений для дослідження огорожувальних конструкцій з 2 зонами вимірювання, або може

бути використаний для вимірювання температур при наріжному монтажу та важкодоступних місцях (рис 4.10) [93, 137, 143].



Рисунок 4.10 Модуль реєстрації первинних даних 8 каналів [93, 137, 143]

Модуль також обладнаний модулем фірми ICP DAS I-7018 [144] та має автономне живлення від акумуляторної батареї.

Модуль з'єднується із системою за допомогою інтерфейсу RS-485 або за допомогою стандартних радіочастотних модулів YS-1100U (Рисунок 4.11), які призначені для застосування в різних системах малого радіусу дії з двостороннім передаванням даних в безліцензійному діапазоні частот 433 МГц і дозволяють організувати безпроводне передавання даних на відстані до 500 метрів між двома пристроями з інтерфейсом RS-485. Завдяки вбудованому, попередньо запрограмованому мікроконтролеру NXP радіомодуль YS-1100U може передавати дані в «прозорому» режимі на одному з 16 частотних каналів.

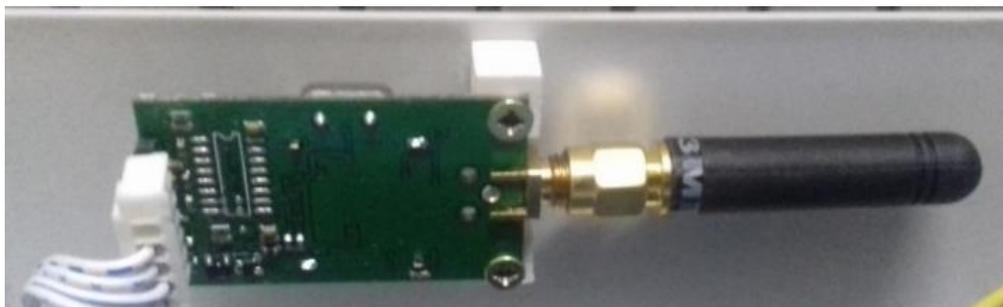


Рисунок 4.11 радіочастотний модуль YS-1100U

Вихідна потужність (17 дБм) і висока чутливість (112 дБм) дозволяють забезпечити надійне передавання даних навіть в промислових умовах.

Застосування модульного принципу в розробці програмного забезпечення, а також використання готових динамічно приєднуваних бібліотек, дозволило створити гнучкий програмний пакет реєстрації та опрацювання вимірювальної інформації [].

Програмний пакет реєстрації та опрацювання вимірювальної інформації апаратно-програмного модуля системи контролю теплового опору теплозахисної оболонки будівель розділено на три взаємопов'язані рівня.

Перший рівень відповідає за безпосереднє перетворення аналогових сигналів на цифрові, керує форматуванням отриманих даних та забезпечує передачу цих даних через інтерфейс [].

На другому рівні відбувається попередня опрацювання даних: прийнята з інтерфейсу інформація конвертується у значення густини теплового потоку і температури та зберігається для подальшого використання.

Спеціалізований третій рівень програмного забезпечення пристосований до виконання конкретних завдань системи, пов'язаних з аналізом теплових процесів. Через третій рівень здійснюється загальне управління системою, а також опрацювання даних, зібраних на нижчих рівнях.

Застосування модульного принципу в розробці програмного забезпечення, а також використання готових динамічно приєднуваних бібліотек, дозволило створити гнучку систему.

Для реалізації першого програмного рівня використовується драйвери обладнання та динамічні бібліотеки dll модулів серії I-7000, що поставляються фірмою ICP DAS [93, 137, 143]. З метою забезпечення другого програмного рівня розроблено програмне забезпечення, основне вікно якого показано на рис. 4.12. Третій програмний рівень реалізовано за допомогою розробленого програмного забезпечення та забезпечена можливість експорту даних в форматі Microsoft Excel, що дозволяє створювати додаткові шаблони та

використовувати інші програмні засоби для додаткового опрацювання даних[93, 137, 143].

Время	Тбос	ТПП1, Вт/кв	ТПП2, Вт/кв	ТПП3, Вт/кв	ТПП4, Вт/кв	ТПП9, Вт/кв	ТПП10, Вт/кв	ТПП11, Вт/кв	ТПП12, Вт/кв	Тнар1, С	Тнар2, С	Тнар3, С	Тнар4, С	Тнар5, С	Тнар6, С	Тнар7, С	Тнар8, С	Тнар9, С	Тнар1
11:52:24	+0018,4	25,806	27,702	11,5379	12,8334	10,7689	23,6851	26,7485	11,7127	17,9263	18,1252	18,2628	17,7428	15,7042	13,4119	29,9792	11,3579	2,0276	11,82
11:52:54	+0018,4	26,5144	26,9244	11,8464	11,9544	10,2103	23,7722	23,7765	11,8243	17,9416	18,1404	18,3086	17,7428	15,7196	23,9526	-1,7628	11,2805	25,2533	11,76
11:53:24	+0018,4	28,4372	26,73	11,9081	12,306	8,78	24,1562	24,9643	11,2714	17,9569	18,1557	18,2933	17,7734	15,7349	16,6248	26,4608	11,1722	12,3781	11,76
11:53:54	+0018,4	25,7048	27,1188	11,2294	12,1888	12,2357	22,7891	25,1283	11,994	17,9722	18,1557	18,3392	17,7734	15,7196	29,9192	4,8529	11,1877	11,4043	11,80
11:54:24	+0018,4	26,0084	26,6328	11,3528	11,72	9,563	24,1152	24,1492	11,4169	17,9722	18,1557	18,3545	17,7887	15,7196	31,716	-2,54	11,3269	13,9358	11,79
11:54:54	+0018,4	26,312	27,216	11,9081	12,1888	10,5026	24,3149	24,8251	12,0037	17,9722	18,171	18,3545	17,7887	15,7349	15,3817	28,1774	11,2341	33,4181	11,80
11:55:24	+0018,5	32,1816	26,73	11,5379	12,7748	8,8636	26,2502	25,8887	11,0968	18,0877	18,2864	18,4546	17,9042	15,8202	26,1976	9,9567	11,3509	2,5082	11,92
11:55:54	+0018,5	26,0084	26,5356	10,9826	12,1888	11,0299	23,8797	26,177	11,2908	18,103	18,3017	18,4699	17,9042	15,8355	22,9001	22,0653	11,4283	25,5335	12,00
11:56:24	+0018,5	27,2228	26,8272	11,4762	11,8372	9,0567	23,6186	25,6999	11,3635	18,103	18,317	18,4851	17,9042	15,8355	4,9554	47,6288	11,7531	11,2426	12,09
11:56:54	+0018,6	25,9072	28,9656	10,7975	10,9582	7,0731	23,3933	28,3489	11,8885	18,2184	18,4171	18,5699	18,0196	15,936	15,6751	28,5096	11,777	11,8389	12,17
11:57:24	+0018,6	24,9964	28,3824	10,8592	10,841	7,047	23,6696	25,1333	11,9795	18,2337	18,4324	18,5547	18,0502	15,936	25,6928	10,988	11,7925	30,2955	12,20
11:57:54	+0018,6	24,3892	28,8684	10,9209	11,0168	7,4124	22,8762	27,0219	11,1307	18,2337	18,4477	18,5699	18,0349	15,936	13,8757	31,7922	11,8234	5,1518	12,24
11:58:24	+0018,7	25,6036	27,216	10,2422	11,3684	6,4676	23,8438	25,7496	11,446	18,3491	18,5478	18,67	18,1504	16,0519	10,1754	38,5663	11,8319	14,946	12,28
11:58:54	+0018,7	25,806	28,188	10,4273	12,013	7,3237	23,3114	27,0616	11,2035	18,3338	18,5631	18,67	18,1657	16,0519	26,4405	11,1823	12,0946	13,6993	12,43

Рисунок 4.12. Основне вікно програмного забезпечення [93, 137, 143]

Розроблене програмне забезпечення включає до свого складу блоки, які за функціональним призначенням поділяються на три групи: блок взаємодії з елементами системи, блок керування процесом роботи та блок опрацювання вимірювальної інформації [93, 137, 143].

Блок налаштування системи, вікно інтерфейсу якого наведено на рис 4.13 забезпечує:

- налаштування динамічного діапазону та частоти опитування модулів АЦП I-7018;
- налаштування часу циклу опитування включаючи додаткову затримку в мс,
- часу очікування відповіді від модуля I-7018;
- черги опитування вимірювальних каналів;
- автоматичний перезапуск в разі помилки;
- індивідуальна конфігурація каналів (рис 4.14)

Вся відповідна інформація зберігається в конфігураційних файлах і може бути завантажена при наступному використанні[93, 137, 143].

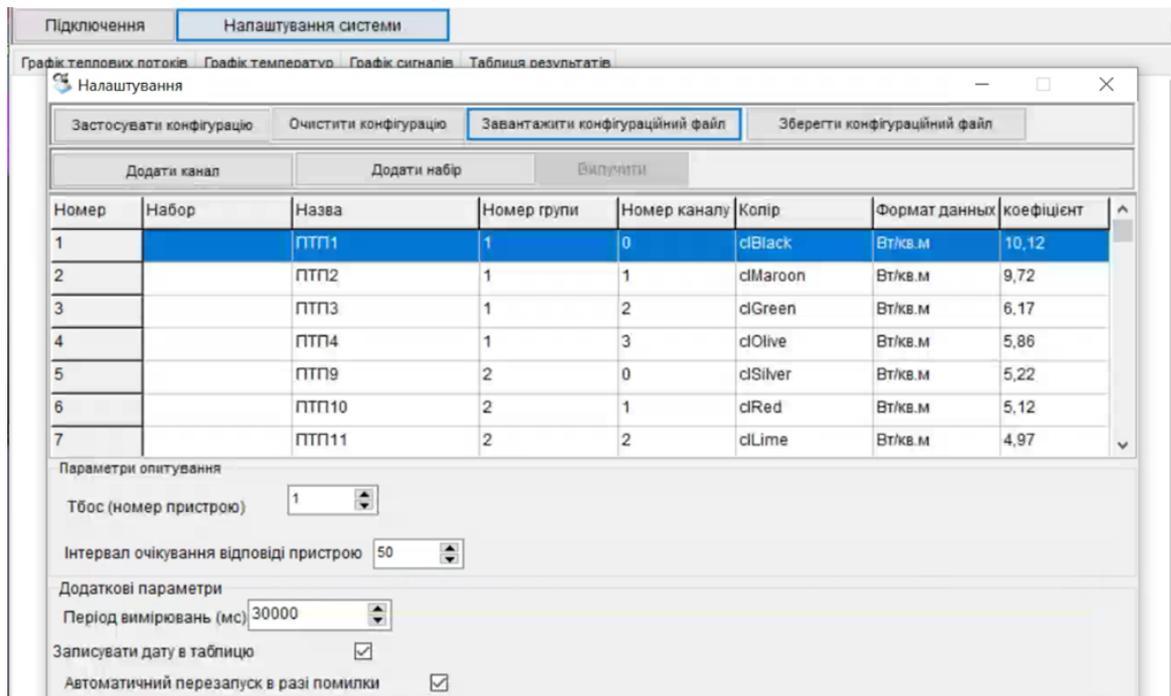


Рисунок 4.13. Вікно інтерфейсу налаштування системи

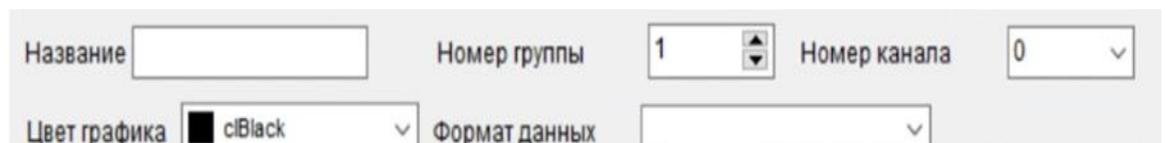


Рисунок 4.14. Вікно інтерфейсу налаштування окремого каналу системи

Блок ініціалізації забезпечує програмне узгодження і виконує наступні завдання:

- налаштування параметрів з'єднання для конвертера RS-485/USB або бездротового модуля та ініціалізація інтерфейсу ;

- пошук отримання ідентифікаторів та ініціалізацію окремих модулів I-7018 у бездротовій та RS-485 або мережі;

Блок отримання вибірок даних та обмін даними з апаратними модулями і виконує наступні функції та команди [93, 137, 143]:

- запуск процедури отримання даних;

- відправлення команди запиту до приладів АЦП I-7018 або окремого каналу;
- очікування відповіді, в разі перевищення заданого інтервалу опитування, передається запит у блок керування процесом роботи системи;
- отримання інформаційних сигналів від приладів АЦП I-7018;
- завершення процедури збирання даних за командою оператора або автоматично.

Отримані дані передаються до програмних блоків, що реалізують та опрацювання вимірювальної інформації – це блок керування процесом роботи системи та опрацювання вимірювальної інформації.

Блок опрацювання вимірювальної інформації складається з блоку попереднього цензурування вибірок даних вимірювань, Блок накопичення первинних даних та блоку архівування даних та формування звіту [93, 137, 143].

Блок накопичення первинних даних виконує зберігання вхідних значень сигналів, які використовуються для подальшого опрацювання, при цьому додатково зберігаються дані в вхідному форматі(мВ). Це дає можливість провести опрацювання сигналів у разі, перекалібрування сенсору [93, 137, 143].

Блок статистичного опрацювання даних вимірювань призначено для опрацювання даних та корекції помилок, які виникли внаслідок передавання через інтерфейс RS-485 або бездротову мережу. Завдання корекції помилок вирішується шляхом перевірки отриманої ANSI строки та перетворення в число, якщо при цьому виникає помилка, то передається запит у блок керування процесом роботи [93, 137, 143]. Після цього виконується перетворення отриманих даних з використанням відповідних поліномів та коефіцієнтів та перевірка значень температури та теплового потоку за

допомогою статистичних критеріїв, які дозволяють розрахувати граничні вибіркові значення [93, 137, 143].

Блок архівування даних, вікно інтерфейсу якого наведено на рис. 4.15 відповідає за збереження вхідних значень сигналів та опрацьованих даних, зокрема в автоматичному режимі.

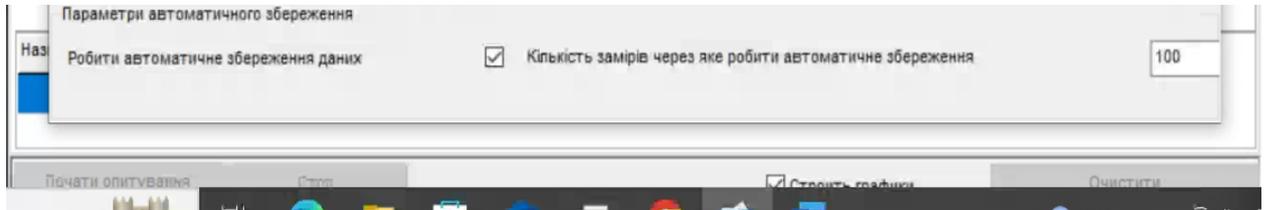
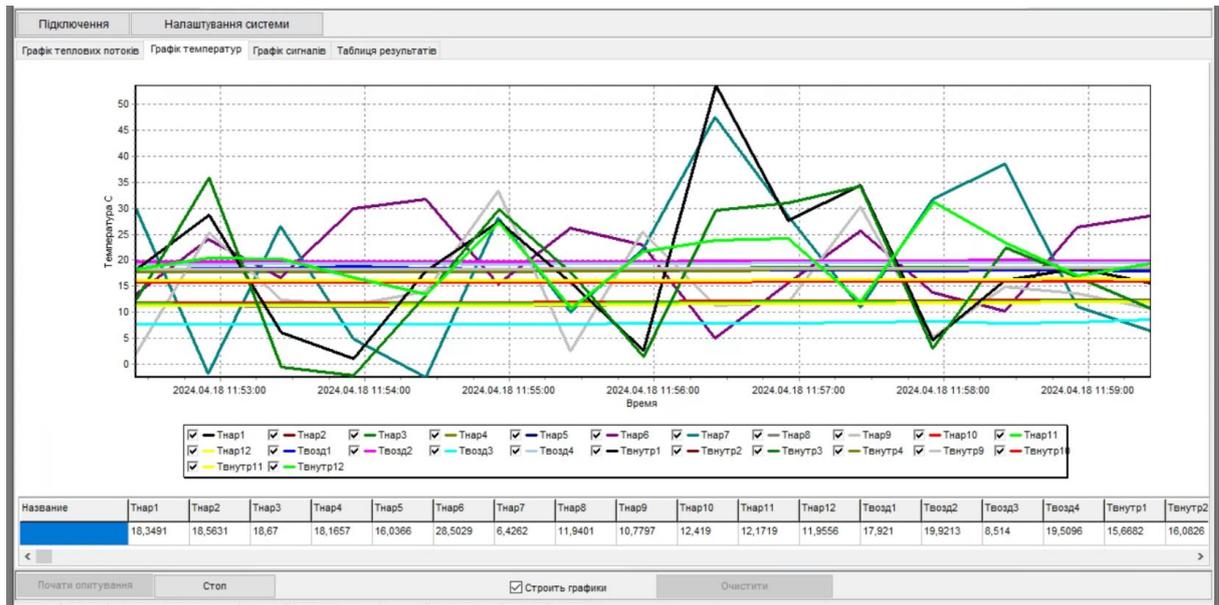


Рисунок 4.15. Вікно інтерфейсу архівування даних

Це забезпечує безпеку даних у разі непередбачених ситуацій, таких як збої в роботі обладнання чи програмного забезпечення. Крім того, це дає змогу багаторазово аналізувати зібрані дані за допомогою різних програм[93, 137, 143].

Блок керування взаємодіє з усіма компонентами системи, формуючи команди для модулів аналого-цифрового перетворення та виконуючи первинне опрацювання отриманих даних. Блок аналізує отриману інформацію на предмет наявності помилок, ініціюючи необхідні дії для їх усунення. Крім того, блок забезпечує зручний інтерфейс для користувача (рис 4.16), дозволяючи візуально оцінити результати вимірювань та керувати роботою системи [93, 137, 143].



а



б

Рисунок 4.15. Вікно інтерфейсу системи контролю: а- контроль температури, б – контроль теплових потоків.

4.3 Апаратно-програмна реалізація приладу для визначення коефіцієнту емісії.

Запропоновано два варіанти виконання двоканального теплового блоку переносного приладу для визначення коефіцієнту емісії. Прилад відповідає технічному рішенню, що детально розглянуто в розділі 3 [130, 131]. На рисунку 4.16 наведено збиральну схему елементів теплового блоку для

першого варіанту конструкції, а на рисунку 4.17 – загальний вид перерізу блоку у зібраному вигляді [130, 131].

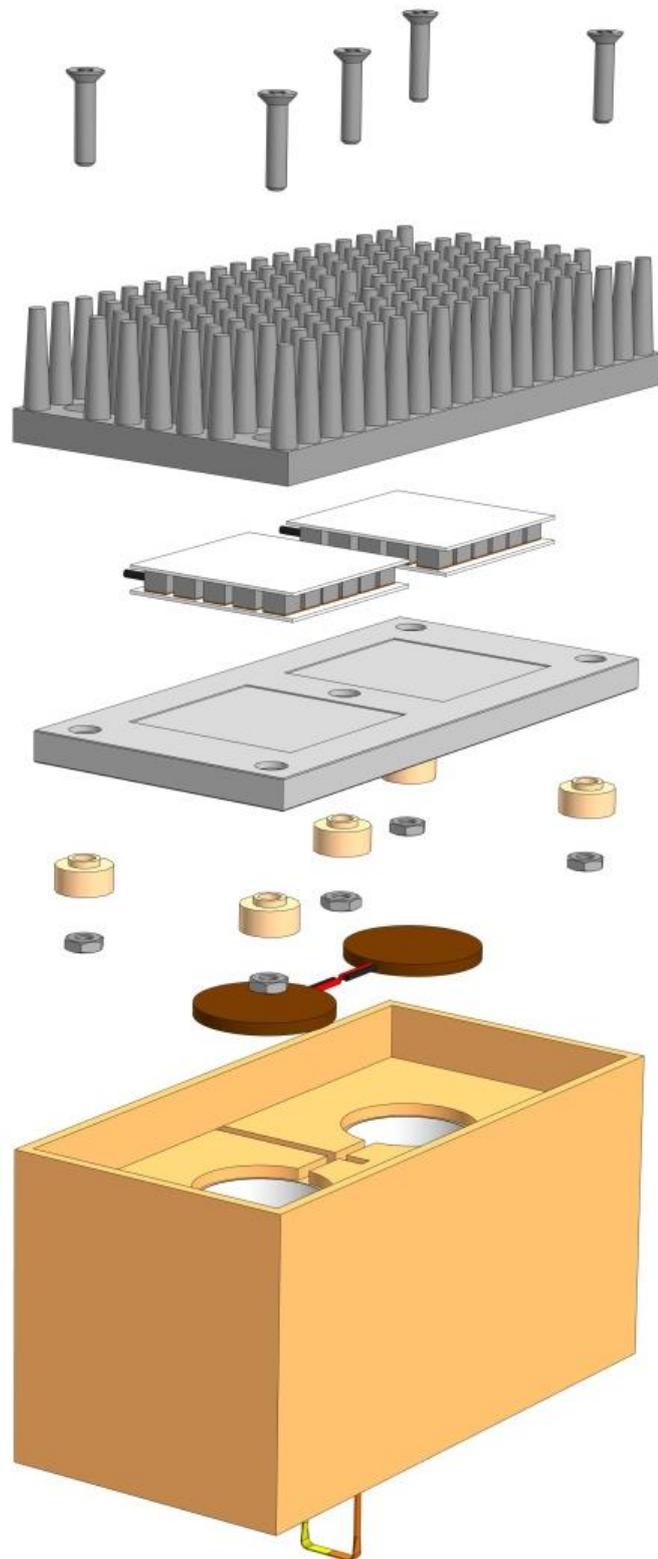


Рисунок 4.16 – Збиральна схема елементів теплового блоку [130, 131]

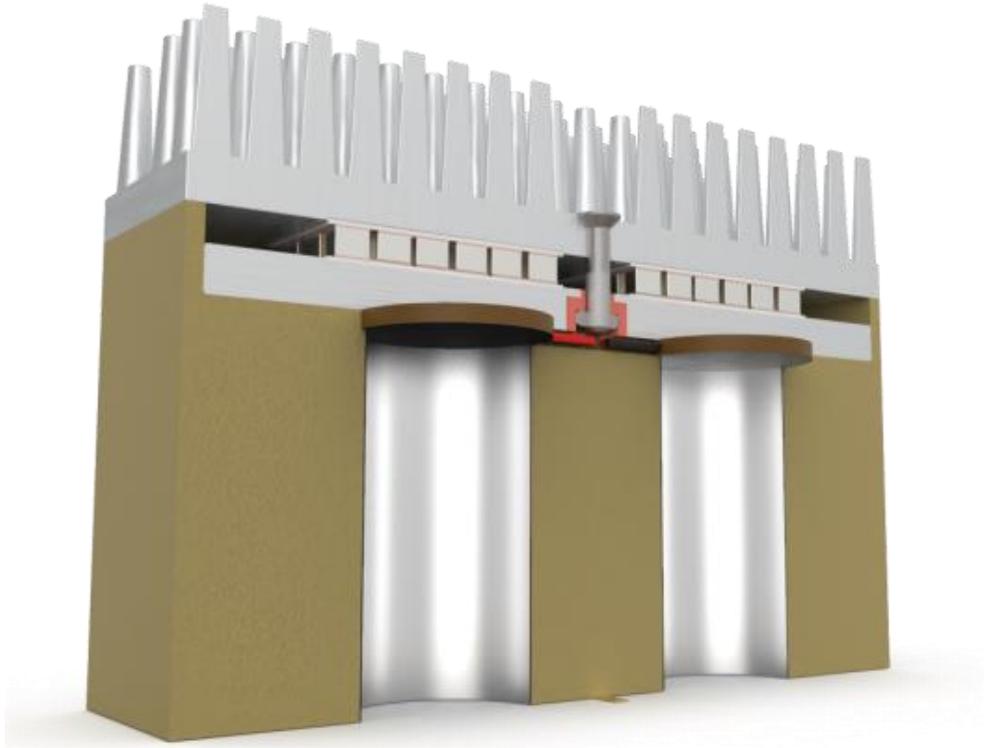


Рисунок 4.17 – Загальний вид перерізу блоку у зібраному вигляді [130, 131]

Розроблений блок містить тепловий колектор з батареєю елементів Пельт'є для задавання температури та корпус, виконаний з теплоізоляційного матеріалу, і має два світловодні канали з відбивним покриттям бокових стінок. У торцях каналів, що прилягають до теплового колектора встановлено перетворювачі теплового потоку, які мають покриття з різними значеннями коефіцієнту емісії. В прилад введені перетворювачі температури теплового колектора та досліджуваної поверхні з пружним притискачем [130, 131].

Другий варіант конструкції теплового блоку є більш технологічним. Тепловий блок має циліндричний корпус, а тепловий колектор для задання потрібної температури має плоский нагрівник. На рисунку 4.18 наведено збиральну схему елементів теплового блоку для другого варіанту конструкції, а на рисунку 4.19 – загальний вид перерізу блоку у зібраному вигляді [130, 131].

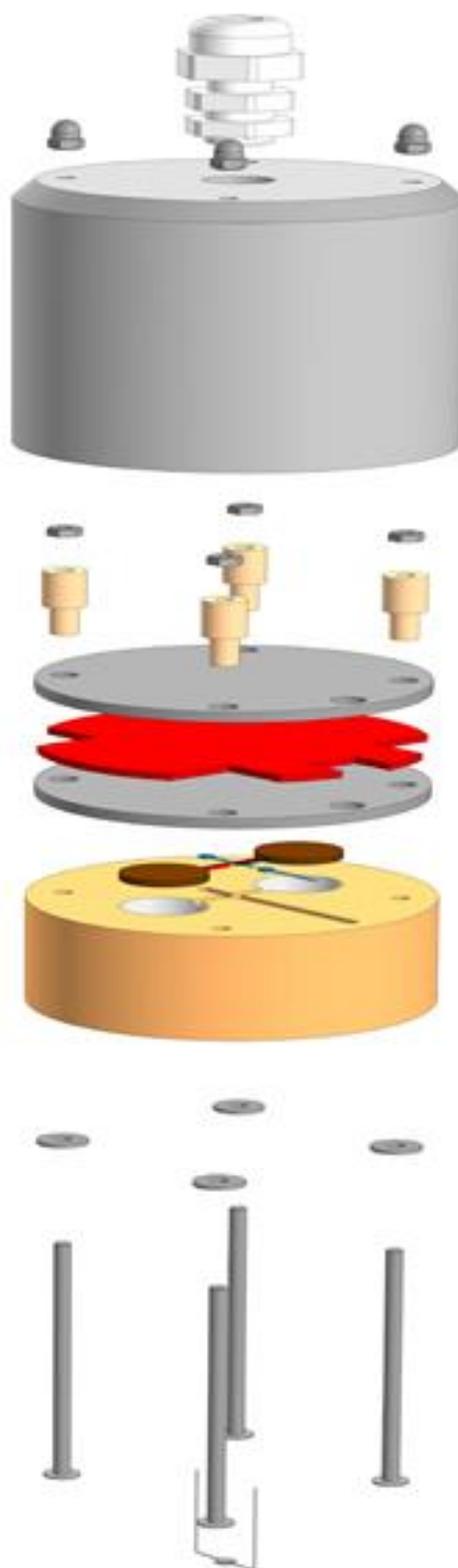


Рисунок 4.18 – Збиральна схема елементів теплового блоку для другого варіанту конструкції [130, 131]

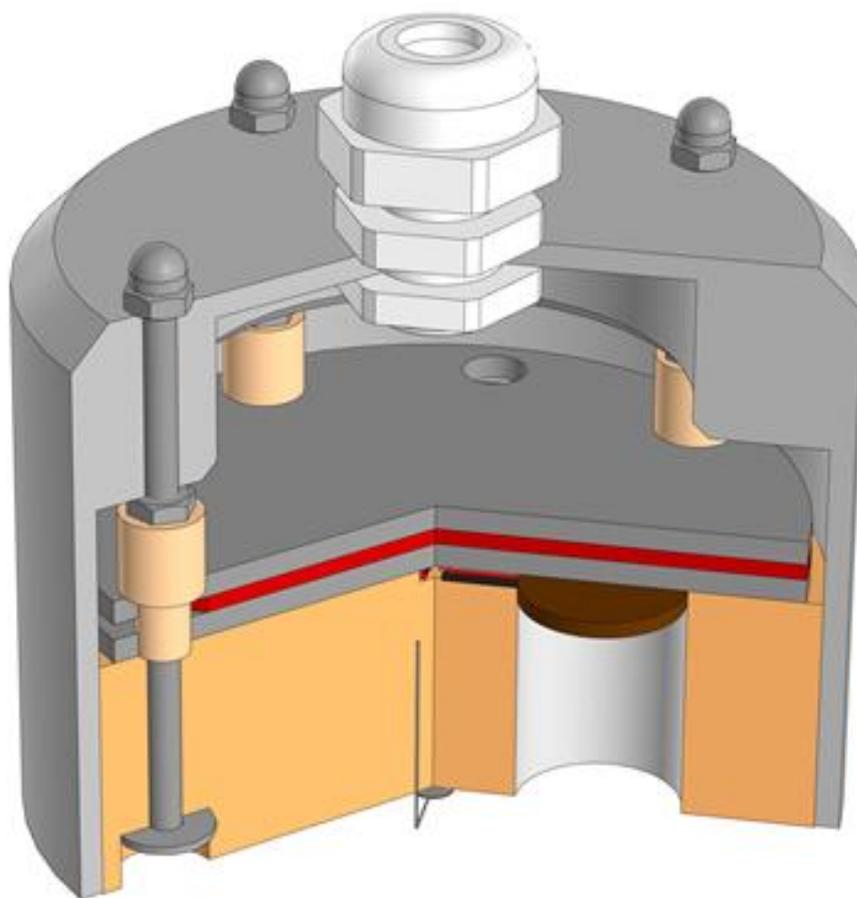
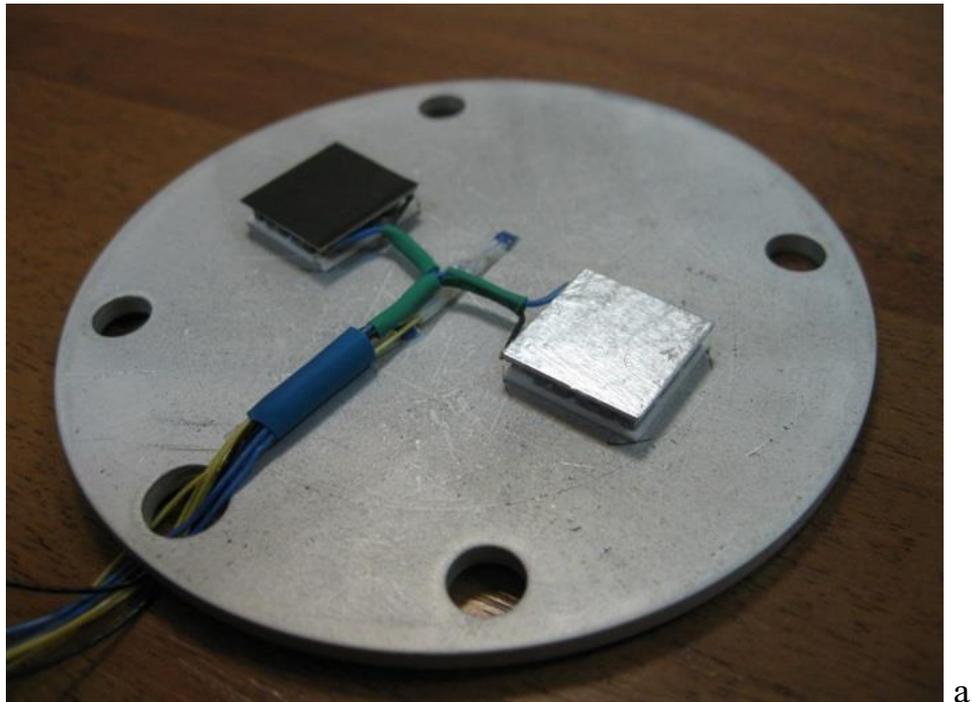


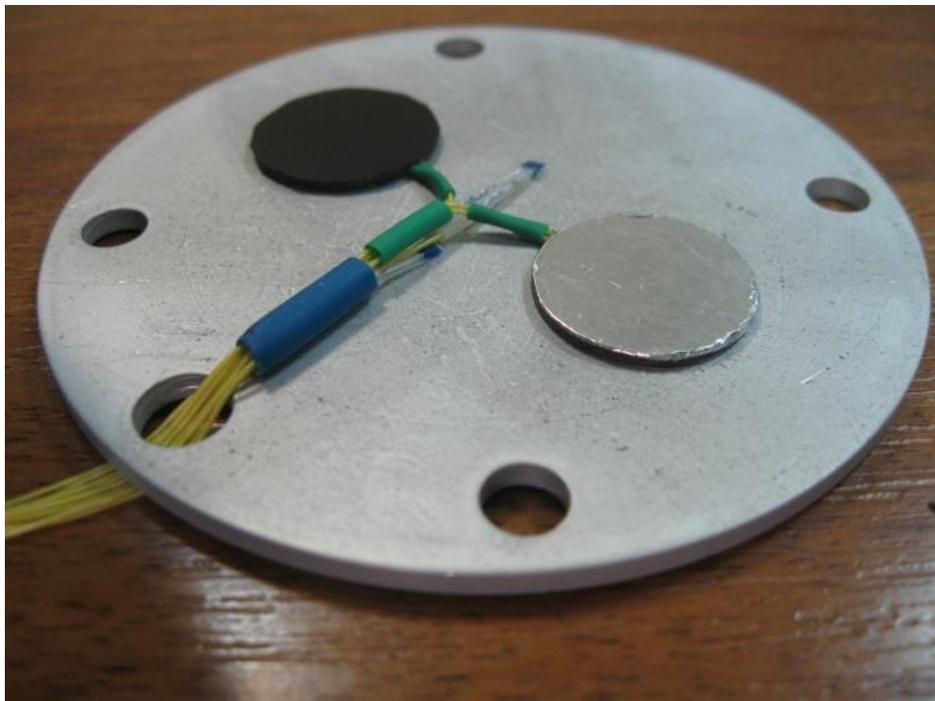
Рисунок 4.19 – Загальний вид перерізу блоку у зібраному вигляді для другого варіанту конструкції [130, 131]

Саме за другим варіантом конструкції виготовлено експериментальний зразок переносного приладу.

Процес виготовлення та збирання переносного приладу показано на декількох наступних фотографіях. На рис. 4.20 а та 4.21 б показано різні типи сенсорів теплового потоку (напівпровідникові та біметалічні), встановлені на температуровирівнювальну пластину. [130, 131]



а



б

Рисунок 4.20 – Сенсори теплового потоку, встановлені на температуровирівнювальну пластину: а – напівпровідникові, б – біметалічні

На рис. 4.21 показано тепловий блок приладу під час збирання, а на рис. 4.22 – внутрішній монтаж електронного блоку приладу. [130, 131]

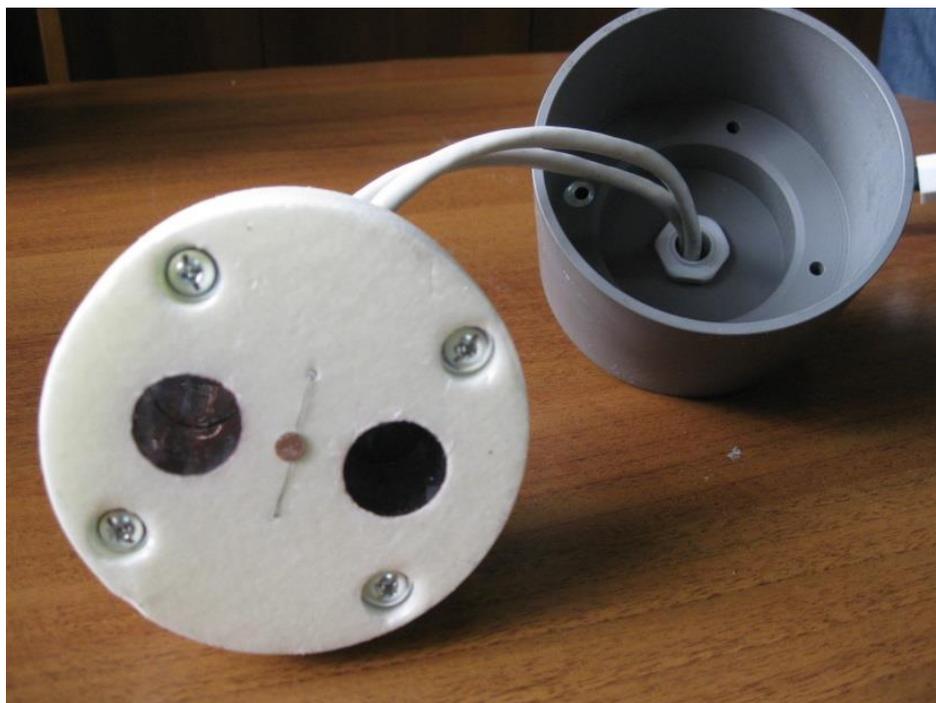


Рисунок 4.21 – Тепловий блок приладу під час збирання.

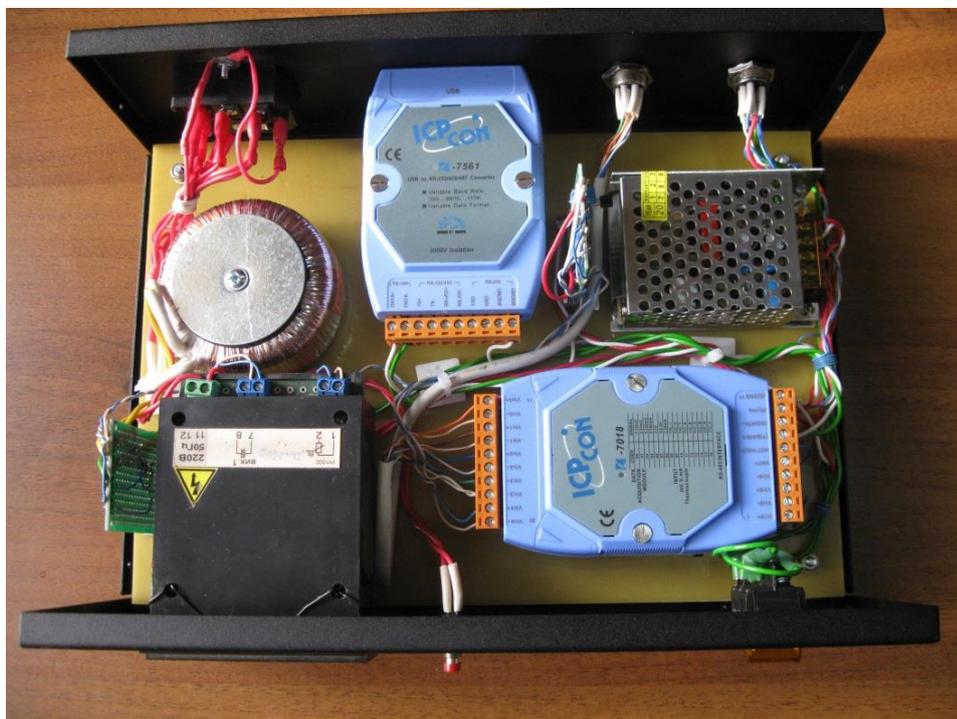


Рисунок 4.22 – Внутрішній монтаж електронного блоку приладу [130, 131]

Загальний вигляд переносного приладу для визначення коефіцієнту емісії в процесі проведення досліджень зразка оптичного скла представлений на рис. 4.23 [130, 131].



Рисунок 4.23 – Загальний вигляд переносного приладу для визначення коефіцієнту емісії в процесі проведення досліджень[130, 131].

4.4 Висновки до розділу

На основі концептуального підходу розроблено методику 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.

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.

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

5. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО ПОТОКУ ПРИ КОНТРОЛІ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ОБОЛОНКИ БУДІВЛІ

5.1 Система реалізуюча радіаційний метод калібровки сенсорів теплового потоку та визначення терморадіаційних характеристик

Можливою є побудова системи для калібровки сенсорів та визначення терморадіаційних характеристик в інфрачервоному спектрі з дзеркальними боковими стінками, що мають температуру тепловідводу. У такій системі випромінювач знаходиться від перетворювачів зі зразками на достатньо великій відстані, тому вплив кондуктивного теплопередавання значно зменшений [51, 58, 123, 126, 145]. Структура теплового блоку вимірювальної системи з дзеркальними боковими стінками, що мають температуру тепловідводу, представлена на рисунку 5.1, а фотографія блоку системи – на рисунку 5.2 [51, 58, 123, 126, 145].

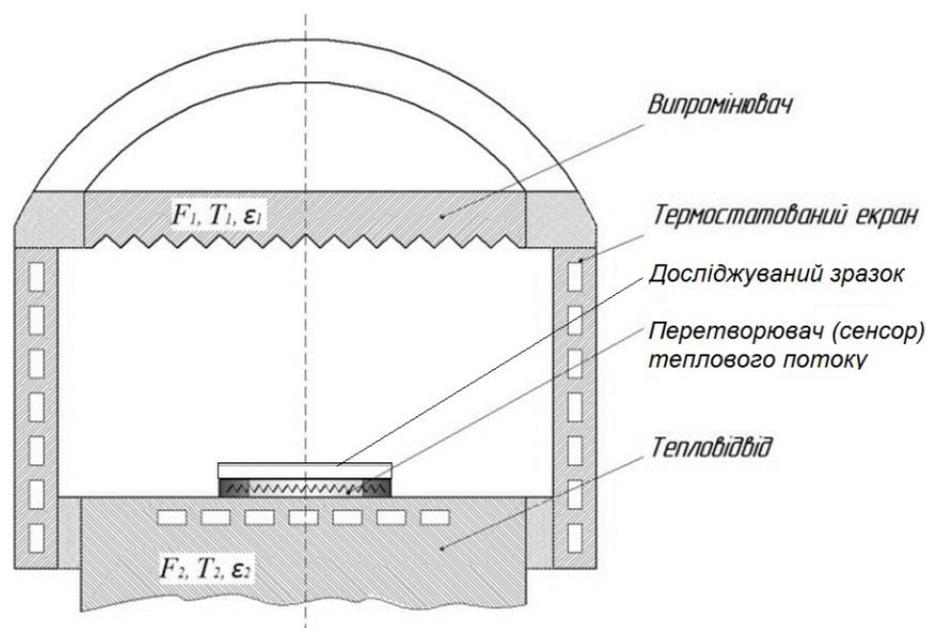


Рисунок 5.1 – Структура теплового блоку системи з дзеркальними боковими стінками, що мають температуру тепловідводу [51, 58, 123, 126, 145].



Рисунок 5.2 – Фотографія теплового блоку системи [[51, 58, 123, 126, 145].]

Плита тепловідводу та порожнистий циліндр, що утворює бокові стінки мають вбудовані канали, в яких циркулює вода від рідинного термостата, завдяки чому підтримується їх однакова температура.

Схема, що реалізує радіаційний спосіб підведення нормованого значення теплового потоку, передбачає наявність в пристрої замкненого простору, утвореного двома дифузно випромінювальними поверхнями. Рівняння вимірювання поверхневої густини теплового потоку при радіаційному способі підведення теплової енергії (5.1) записано на підставі закону Стефана-Больцмана [51, 58, 123, 126, 145]:

$$q = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \varphi_{1-2} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (5.1)$$

де φ_{1-2} – кутовий коефіцієнт випромінення, який враховує форму і розмір поверхонь, що беруть участь у теплообміні, їхнє взаємне розташування;

σ – стала Стефана-Больцмана;

T – температура, індексом «1» позначено поверхню джерела випромінювання, а індексом «2» – теплосприймальну поверхню тепловідводу; $\varepsilon_{пр}$ – приведений коефіцієнт емісії, який знаходиться як (5.2) [51, 58, 123, 126, 145].:

$$\varepsilon_{пр} = \left(\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{F_2}{F_1} \left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \right)^{-1} \quad (5.2)$$

З виразу (5.1) випливає, що формування теплового потоку відбувається за рахунок підтримання різниці температури джерела теплової енергії та тепловідводу з урахуванням енергії, що випромінюються поверхнями теплообміну, їх взаємним розташуванням та терморадіаційними характеристиками [51, 58, 123, 126, 145].

Рівняння (5.1) та (5.2) записані з припущенням про відсутність кондуктивно-конвективного теплообміну крізь повітря і можуть є коректними при вакуумуванні порожнини теплового блоку системи. Крім того вони не враховують крайових ефектів та спотворень теплового поля через них [51, 58, 123, 126, 145]. Для дослідження цих проблем, визначення зони рівномірності густини теплового потоку, впливу кондуктивно-конвективного теплообміну, впливу значення коефіцієнту відбиття бокових стінок проведено комп'ютерне моделювання теплообміну в порожнині теплового блоку [51, 58, 123, 126, 145].

5.2 Моделювання процесів теплообміну в системи для радіаційного калібрування сенсорів теплового потоку та визначення терморадіаційних характеристик

Схему дослідженого об'єкту показано на рисунку 5.3. Він представляє собою замкнену циліндричну порожнину, яка моделює радіаційну систему калібрування сенсорів теплового потоку [123, 145] калібрування сенсорів теплового потоку. Порожнина заповнена атмосферним повітрям.

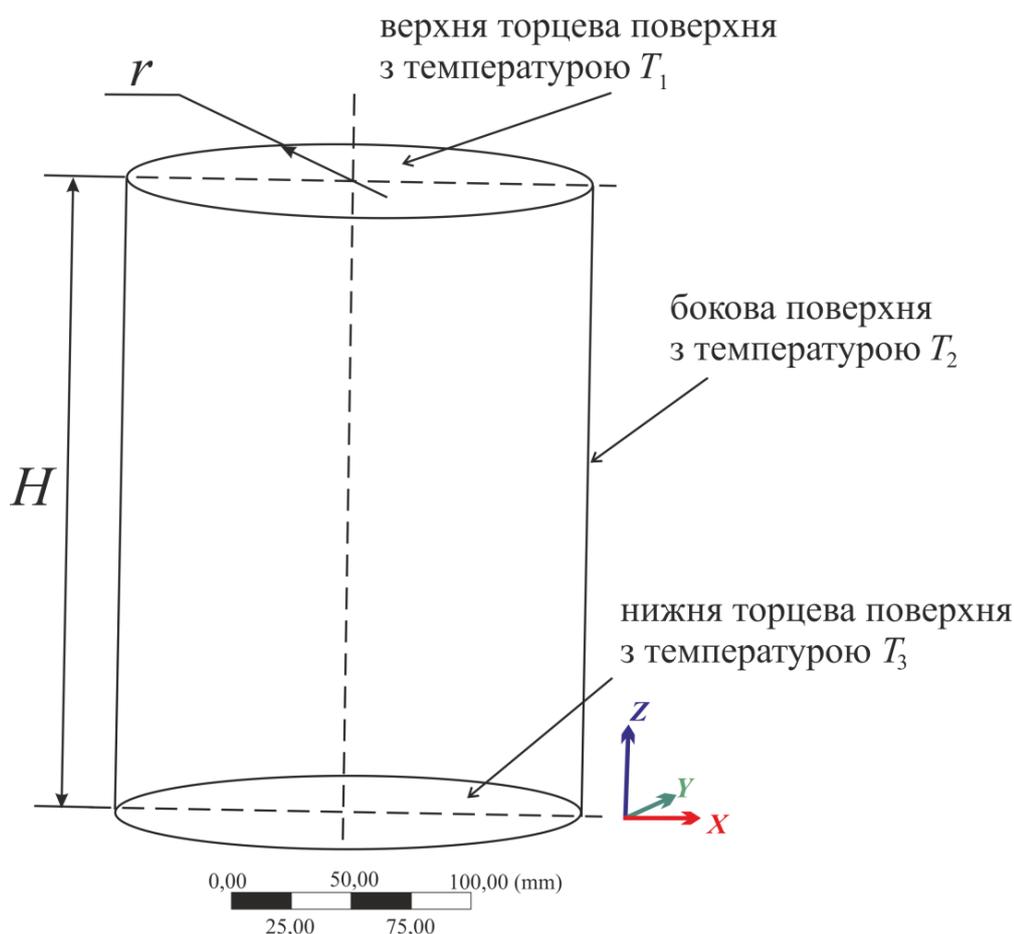


Рисунок 5.3 – Система реалізуюча радіаційний метод калібровки сенсорів теплового потоку [123, 145]

Радіус циліндру складає $r = 95$ мм, висота $H = 260$ мм. Верхня торцева поверхня нагрівалася, а нижня сприймала теплоту (радіаційну, кондуктивну та конвективну). Матеріал бокової поверхні – полірований алюміній.

Опис розрахункової моделі. Розрахунки проводились за допомогою програмного комплексу *ANSYS CFX*. Геометрію досліджуваного об'єкту побудовано за допомогою підпрограми *ANSYS Design Manager*. Загальний вигляд 3D-моделі показано на рис. 5.4.

Для виконання CFD-моделювання використано неструктуровану комбіновану розрахункову сітку, побудовану за допомогою сіткового генератора *ANSYS CFX Mesh* (рис. 5.5). Вона представляє собою комбінацію тетрадральних елементів в середині розрахункової області, з призматичними елементами в областях згущення розрахункової сітки біля твердих стінок.

Були проведені попередні дослідження щодо впливу на якість сітки способу задання згущення біля твердих стінок. В результаті проведеного аналізу виявлено, що найбільш оптимальним способом задання згущення є метод *Гладкого переходу шару* зі значенням співвідношення переходу 0,2. Параметри розрахункової сітки наведено в таблиці 5.1 [123, 145].

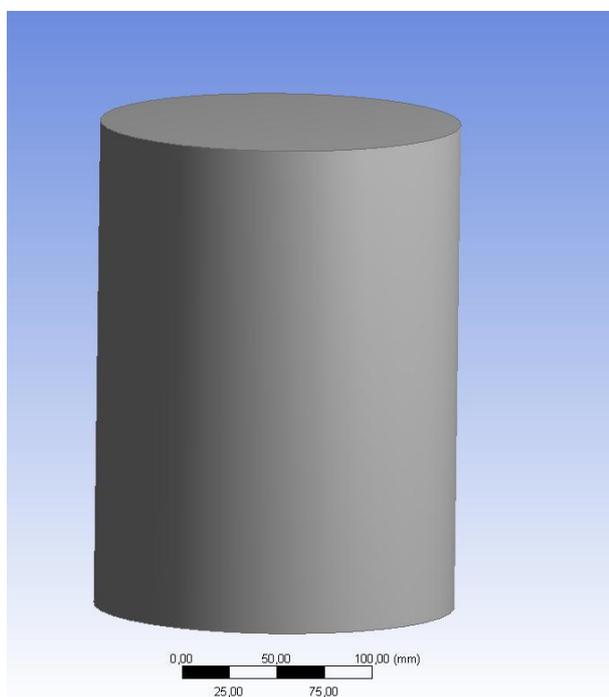
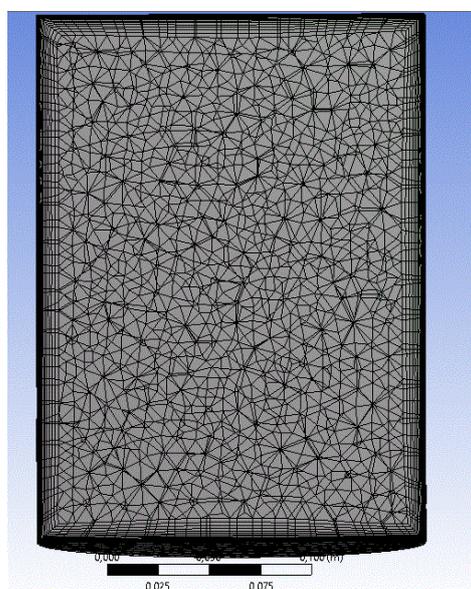
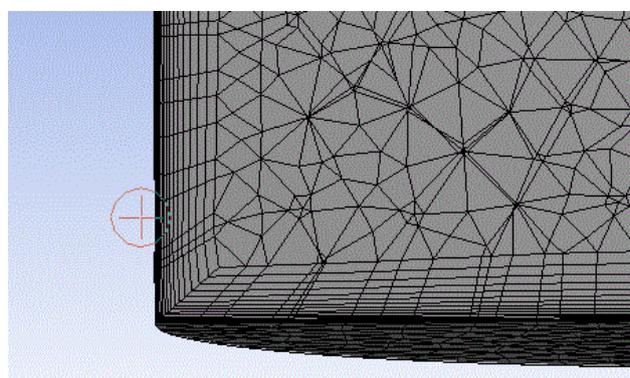


Рисунок 5.4 – Загальний вигляд 3D-моделі [123, 145]



Осьовий розріз



Пристінкова область

Рисунок 5.5 – Розрахункова сітка [123, 145]

Таблиця 5.1 – Параметри розрахункової сітки

Згущення	Метод	Гладкий перехід
	Співвідношення переходу	0,2
	Кількість шарів	15
	Фактор росту	1,2
Максимальний розмір комірки на поверхнях, м		1,0 E-2
Максимальний розмір комірки, м		1,0 E-2
Кількість елементів		47 тис.
Кількість вузлів		125 тис.

Для валідації були взяті результати експериментів.

Граничні умови наведено у таблиці 5.2

Таблиця 5.2 – Граничні умови моделі

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

Повітря вважалось ідеальним газом. Залежність ізобарної теплоємності від температури задавалась поліноміальною залежністю (5.3):

$$\frac{c_p}{R} = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2 + a_3 \cdot T^3 + a_4 \cdot T^4 \quad (5.3)$$

де R – газова стала;

$a_0 \dots a_4$ – коефіцієнти поліному.

Залежність коефіцієнта динамічної в'язкості та теплопровідності повітря від температури задавались формулами Сазерленда (5.4) та (5.5):

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \frac{T_0 + C_S}{T + C_S}, \quad (5.4)$$

$$\lambda = \lambda_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \frac{T_0 + C_{S1}}{T + C_{S1}}, \quad (5.5)$$

де μ_0, λ_0 – базові значення коефіцієнтів динамічної в'язкості і теплопровідності відповідно;

$T_0 = 273,15K$ – базове значення температури повітря.

Осереднені по Рейнольдсу рівняння Нав'є-Стокса вирішувались для в'язкого теплопровідного газу в стаціонарній постановці з використанням в якості моделі теплообміну повного рівняння збереження енергії.

Вплив гравітації враховано в напрямку осі Z. Радіаційний теплообмін моделювався за допомогою моделі Дискретного Переносу (Discrete Transfer).

Необхідна для розрахунку величина коефіцієнту дифузного віддзеркалення R_d для бокової поверхні (алюміній) приймалась рівною 0,1 згідно з даними роботи [123, 145].

Результати моделювання. На рис. 5.6 показано поле температури повітряного середовища у центральному перетині циліндричної порожнини при температурі верхньої торцевої поверхні $T_1 = 175^\circ\text{C}$. Як видно із рисунка, основний повздовжній градієнт температур має місце поблизу верхньої торцевої поверхні, а при віддаленні від неї температура повітря змінюється незначним чином [123, 145].

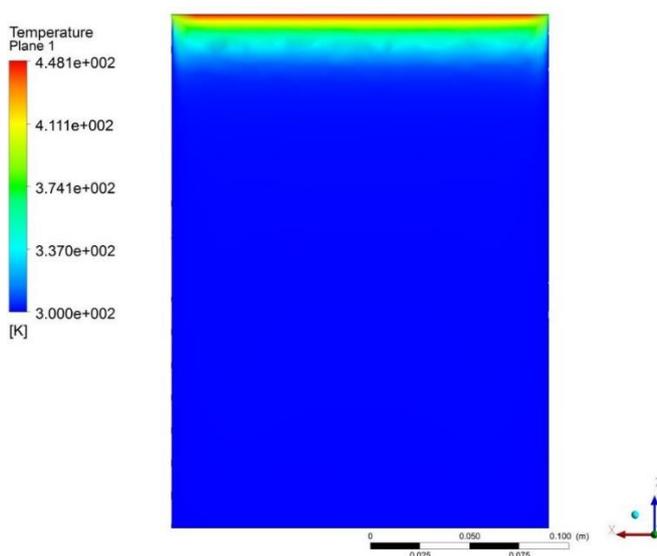


Рисунок 5.6 – Поле температур у порожнині циліндру (центральный перетин) [123, 145]

На рисунках 5.7 та 5.8 показані векторне поле та поле значень швидкості повітря у центральному перетині циліндру. Як видно із рисунку 5.7, у нижній кутовій зоні утворюється тороподібна вихрова структура. Поблизу бокової 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 w складає приблизно 1,5 мм/с. Необхідно відмітити, що вплив конвекції на загальний тепловий потік є досить незначним. Загалом сумарний внесок у загальний теплоперенос конвекції та теплопровідності не перевищує 0,1%, тобто можна вважати, що весь тепловий потік переноситься випромінюванням [123, 145].

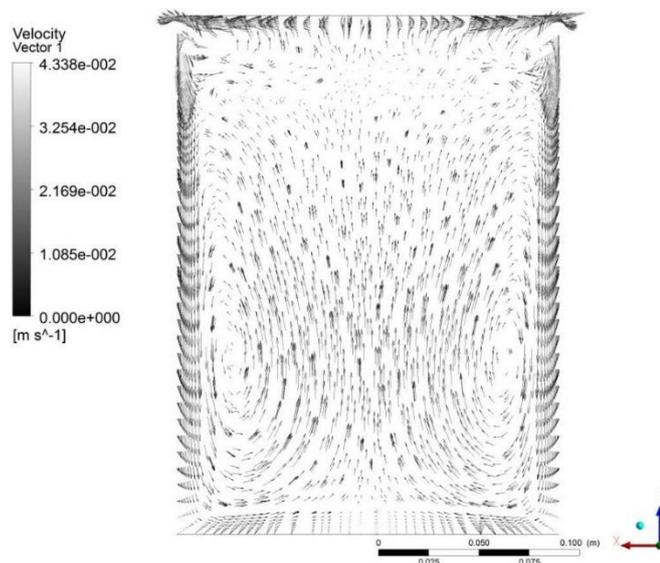


Рисунок 5.7 – Векторне поле швидкостей у центральному перетині циліндру [123, 145]

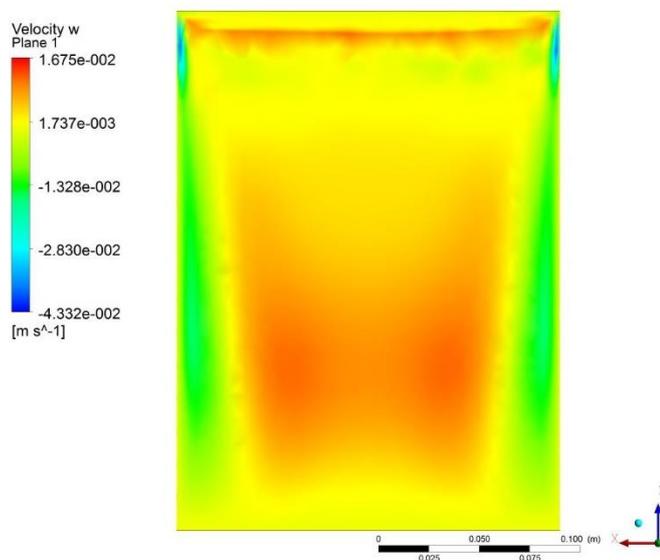


Рисунок 5.8 – Значення осьової швидкості у центральному перетині циліндру [123, 145]

Проведено дослідження впливу на результат розрахунку кількості променів у моделі дискретного переносу. Виявлено (рис. 5.9), що починаючи з $n \geq 32$, точність розрахунку теплового потоку не змінювалась. Тому у подальших розрахунках використовувалось значення кількості променів $n = 32$. [123, 145]

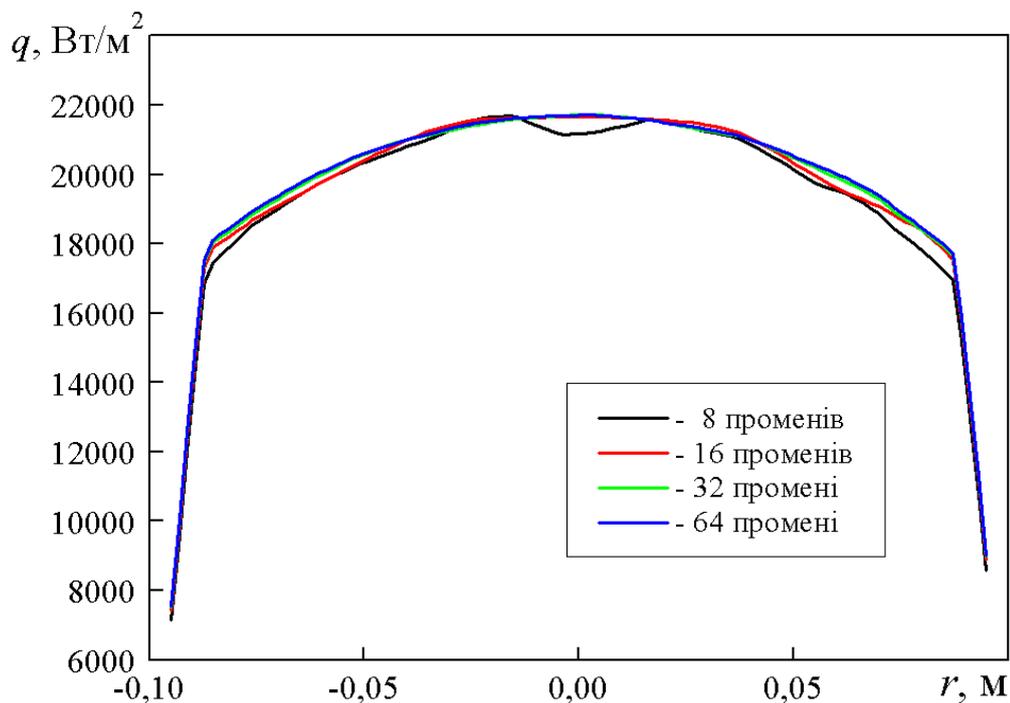


Рисунок 5.9 – Радіальне розподілення питомого теплового потоку на нижній торцевій поверхні циліндру при різних кількостях променів у застосованій при розрахунках моделі дискретного переносу [123, 145]

На другому етапі розрахунків проведено порівняння результатів експерименту та розрахунку при температурі верхньої торцевої поверхні 175°C та варіюванні у розрахунках коефіцієнт емісії бокової поверхні: задавались її значення 0,1 та 0,2. Результати наведено на рисунку 5.10. [123, 145]

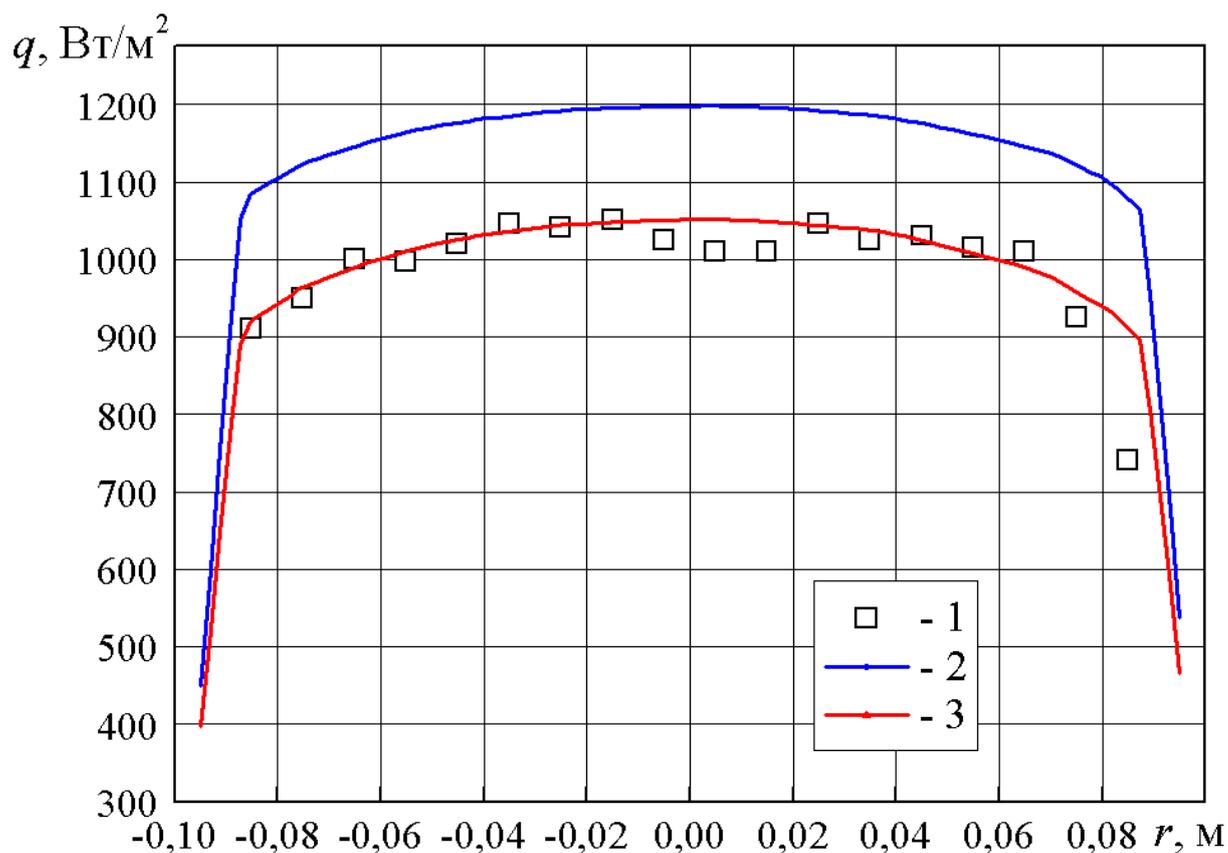


Рисунок 5.10 – Радіальний розподіл питомого теплового потоку на нижній торцевій поверхні циліндру при температурі верхньої торцевої поверхні $T_1 = 175^\circ\text{C}$ та коефіцієнті дифузного віддзеркалення $R_d = 0,1$: 1 – експеримент; 2, 3 – розрахунок при значенні коефіцієнту емісії бокової поверхні ε_2 відповідно 0,1 та 0,2 [123, 145]

Радіальний розподіл питомого теплового потоку є практично однаковим для експериментів та розрахунків. Виходячи з наведених даних на рисунку 5.8, кількісний збіг розрахункових та експериментальних результатів має місце при значенні коефіцієнту емісії бокової поверхні $\varepsilon_2 = 0,1$. Тому подальші розрахунки проводились при цьому значенні [123, 145].

Результати розрахунку при різних значеннях температури верхньої торцевої поверхні наведено на рис. 5.11.

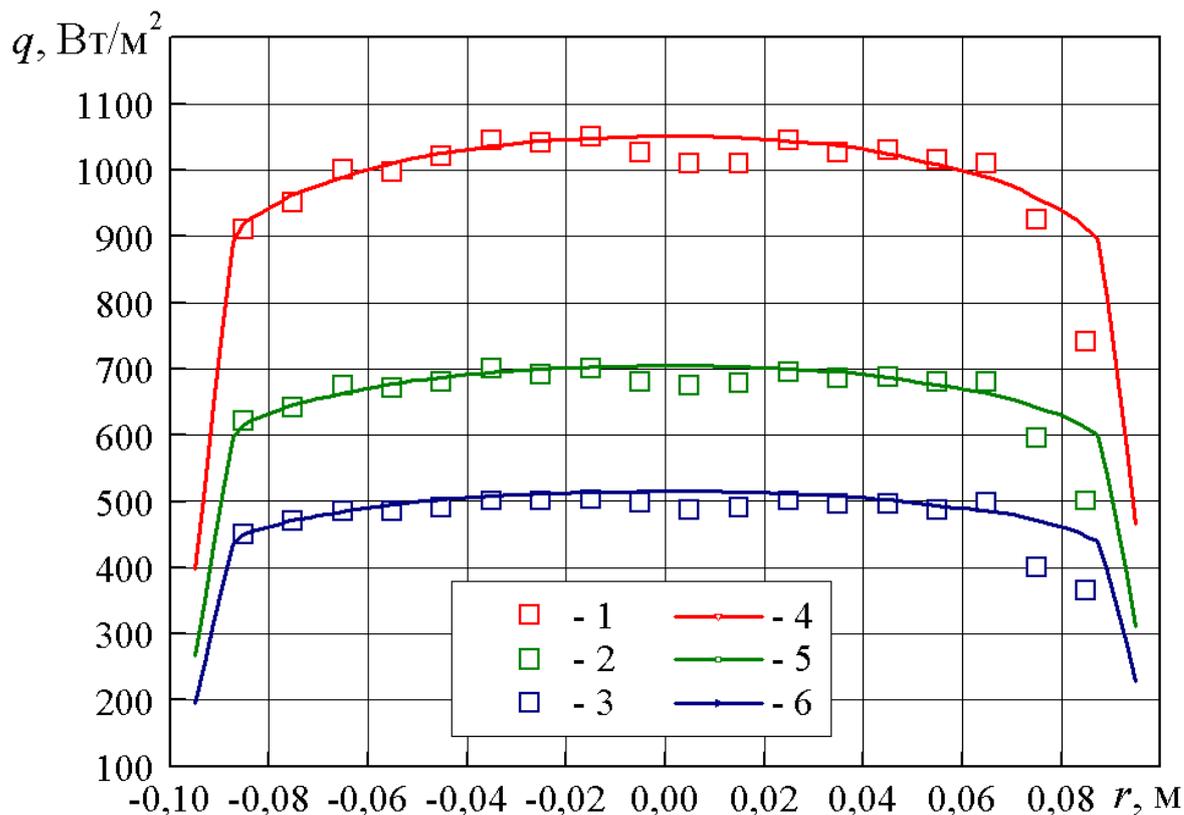


Рисунок 5.11 – Радіальне розподілення питомого теплового потоку на нижній торцевій поверхні циліндру. 1 – 3 – експеримент; 4 – 6 – розрахунок при значенні коефіцієнту емісії бокової поверхні $\varepsilon_2 = 0,2$ та коефіцієнту дифузного віддзеркалення $R_d = 0,1$. 1,4 – $T_1 = 175^\circ\text{C}$; 2,5 – $T_1 = 142^\circ\text{C}$; 3,6 – $T_1 = 120^\circ\text{C}$ [123, 145]

Як видно із рисунка, при трьох значеннях температури T_1 має місце добрий збіг результатів експериментів та розрахунків (розбіжність не перевищує 2%). Таким чином, можна зробити висновок, що дану математичну модель можна застосовувати для розрахунку даного фізичного об'єкту.

Вплив часткового перекриття нижньої торцевої поверхні. В реальних умовах тарування сенсору він лише частково перекриває нижню торцеву поверхню циліндру (рис. 5.12, зелений колір). При цьому, значення коефіцієнту емісії поверхонь суттєво різняться: для поверхні сенсора $\varepsilon = 0,95$, а решти поверхні $\varepsilon = 0,2$. Незважаючи на низьку температуру нижньої торцевої поверхні (300 К), ця різниця, тим не менш, може вплинути на

загальний променевий теплообмін у порожнині циліндру за рахунок перерозподілення теплових потоків. Для розрахунку цього випадку проведено модифікацію комп'ютерної моделі – з виділенням на нижній поверхні розрахункової області розмірами 0,19x0,03м [123, 145].

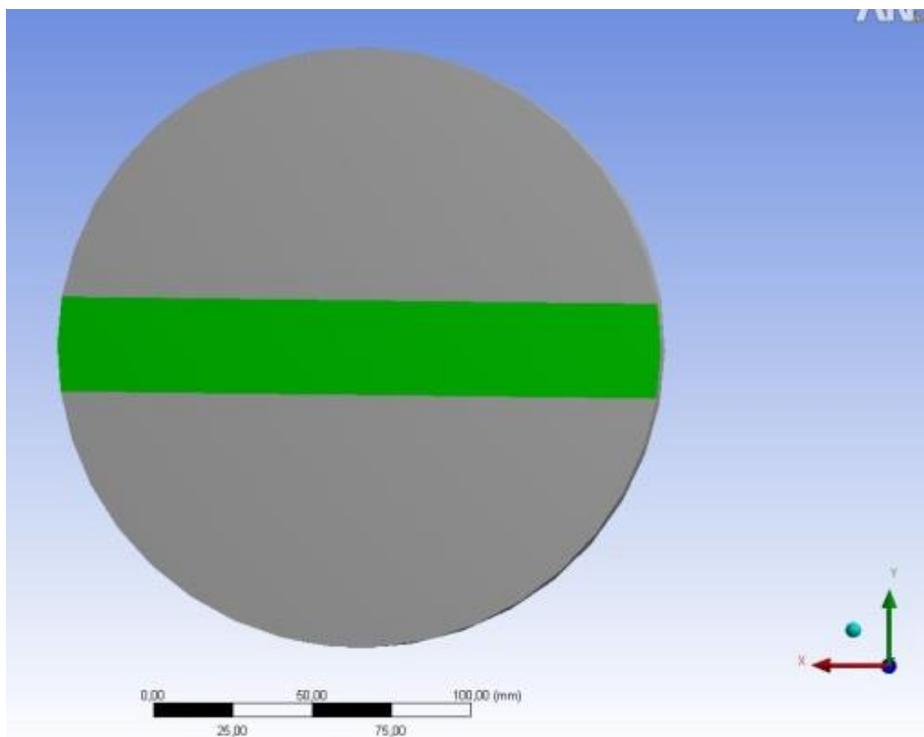


Рисунок 5.12 – Комп'ютерна модель для варіанта, коли сенсор частково перекриває нижню торцеву поверхню циліндру [123, 145]

Результати розрахунків та їх порівняння з результатами експериментів та попередніх розрахунків (для випадку коли модель сенсора займає всю нижню поверхню) для різних температур нагрівача, наведено на рис. 5.13.

З наведеного на рисунку графіку треба відзначити, що урахування різниці коефіцієнт емісії сенсора та решти нижньої поверхні циліндру призводить до підвищення теплового потоку, але це підвищення є незначним, і складає величину 3,8–3,9% (таблиця 5.3) [123, 145].

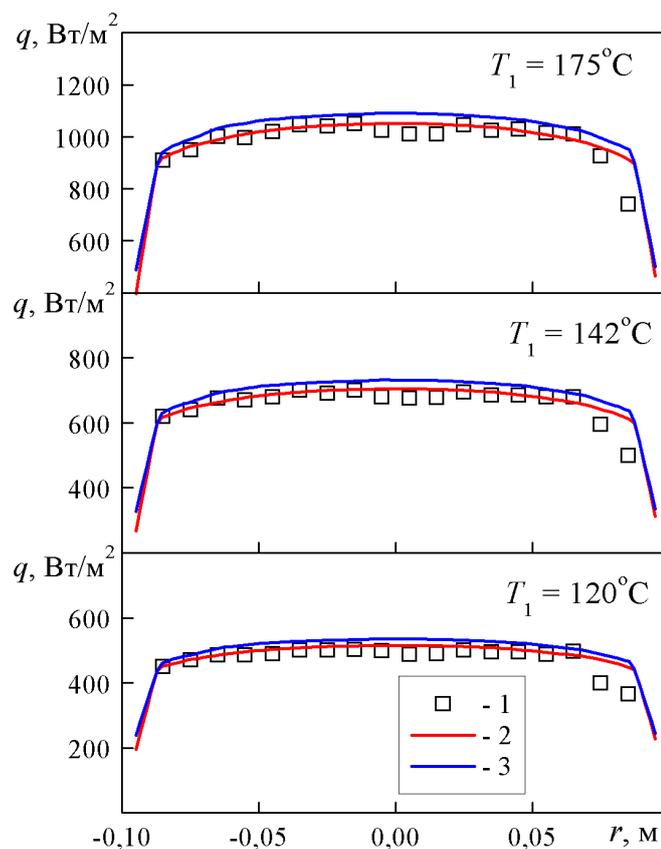


Рисунок 5.13 – Радіальне розподілення питомого теплового потоку на нижній торцевій поверхні циліндру при коефіцієнт емісії бокової поверхні $\varepsilon_2 = 0,2$ для різних значень температури верхньої торцевої поверхні T_1 . 1 – експеримент; 2 – розрахунок при значенні коефіцієнт емісії всієї нижньої поверхні $\varepsilon_3 = 0,95$; 3 – розрахунок для значення коефіцієнт емісії поверхні сенсора $\varepsilon = 0,95$, а решти поверхні $\varepsilon = 0,2$

Таблиця 5.3 – Максимальна розбіжність розрахунків при урахуванні та без урахування різниці у значеннях коефіцієнт емісії поверхні сенсора та решти торцевої поверхні циліндру

$T, ^\circ\text{C}$	Максимальна розбіжність %
175	3,9
142	3,8
120	3,88

5.3 Експериментальні дослідження різних типів сенсорів для використання при контролі теплового опору оболонки будівлі

Для вимірювання поверхневої густини теплового потоку за допомогою сенсорів теплового потоку необхідно визначити наступні метрологічні та експлуатаційні характеристики: коефіцієнт перетворення, залежність коефіцієнта перетворення від температури, інерційність сенсора, коефіцієнт емісії сенсора. [51,58, 123, 126, 145].

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 [51, 121, 123, 146, 147].

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

Досліджено напівпровідникові сенсори в режимі сенсорів теплового потоку та біметалічні сенсори :

а) термоелектричний напівпровідниковий генераторний модуль PGM-15-250, який має стандартні розміри 40x40x3,4 мм і містить 200 термоелементів [121];

б) модуль охолодження TEC1-12703, який має стандартні розміри 30x30x3,5 мм і містить 127 термоелементів [148];

в) модулі охолодження термоелектричних напівпровідників Пельтьє TEC1-12706 стандартних розмірів 40x40x3,8 мм, які містять 127 термоелементів [148];

г) сенсори теплового потоку термоелектричні біметалічні, діаметром 30 мм і товщиною 2 мм [51,58];

д) термоелектричний сенсор теплового потоку діаметром 50 мм і товщиною 3 мм серії PU 22 [149].

На рис. 5.12 наведено фотографії досліджуваних сенсорів. Усі напівпровідникові сенсори мають керамічні корпуси (Al_2O_3), біметалічні сенсори залиті компаундом епоксидної смоли УП-610. Діапазон робочих температур для сенсорів «а» до 230°C, для сенсорів «б» і «с» до 138°C, для сенсорів «д» до 200 ° С, для сенсора «е» до 90°C [121]; .

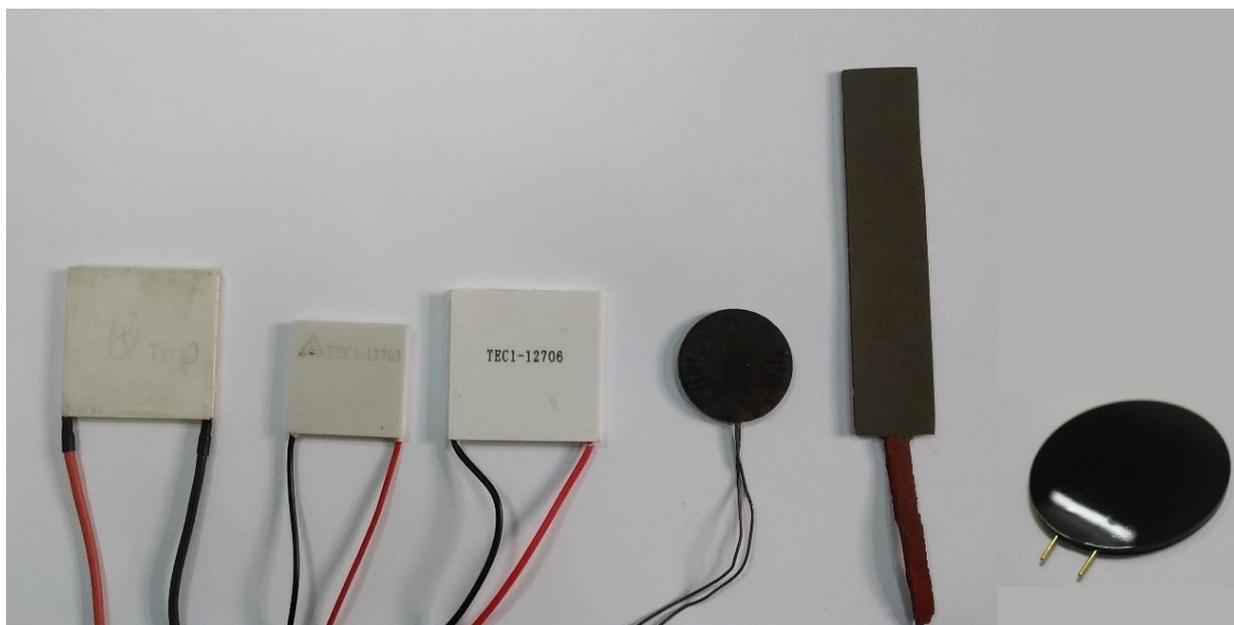


Рисунок 5.12 – Фотографії досліджуваних сенсорів: «а», «б», «с» — напівпровідникові сенсори та «д», «е», «ф» — біметалічні сенсори [121];

Технічні характеристики сенсорів наведено в таблиці 5.4. [121]

Таблиця 5.4 – Технічні характеристики сенсорів [121]

Модель сенсора	PGM-15-250 “a”	TES1-12703 “b”	TES1-12706 “c”	Біметалічний сенсор “d”	Біметалічний сенсор “e”	PU 22 “f”
Термоелемент	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

Для проведення досліджень у системі реалізуючої радіаційний метод калібрування сенсорів теплового потоку, необхідно забезпечити однакову випромінювальну здатність теплочутливих поверхонь досліджуваного та еталонного сенсорів, наприклад, шляхом нанесення на їх поверхні однакового покриття [51, 58, 145, 146, 147]. Після цього сенсори розміщувались на радіаторі з термостатичним керуванням, як показано на рисунку 5.13. Результати були отримані шляхом порівняння вихідних сигналів досліджуваних сенсорів із сигналом еталонного сенсору [121]. Дискіподібний термоелектричний біметалічний сенсор теплового потоку діаметром 27 мм і товщиною 1,5 мм із котушкою з постійною коміркою з дроту з покриттям Ni-Const використовувався як еталонний сенсор [121]. Його метрологічні характеристики визначали в ДП «Укрметртестстандарт». Невизначеність сенсора не перевищувала ±1,5% [121], з допустимою ймовірністю 0,95. В

експериментах постійна температура радіатора установки була встановлена на рівні 120°C , а температура водоохолоджуваної холодильної плити змінювалася в діапазоні від кімнатної температури до 50°C . Тепловий потік випромінювання становив від 420 до 530 Вт/м^2 [121].



Рисунок 5.13 – Сенсори теплового потоку, встановлені на радіаторі радіаційного компаратора: а) напівпровідниковий сенсор PGM-15-250 («а»), еталонний сенсор («ref»), напівпровідниковий сенсор TEC1-12703 («b»); б) еталонний сенсор («ref»), біметалічний сенсор серії PU 22 («f») [121]

У кондуктивному методі сенсор встановлюється на поверхні радіатора, як показано на Рисунку 5.14, зверху встановлюється нагрівач, поєднаний із тепловим екраном [51, 58, 146, 147]. Для поліпшення теплового контакту між робочими поверхнями системи і досліджуваним сенсором використовується затискний пристрій. Вимірювання вихідних сигналів сенсора проводили після настання стаціонарного теплового режиму. Для визначення коефіцієнта перетворення з високою точністю контактні поверхні провідної системи та досліджуваного сенсора повинні мати однаковий діаметр. Результатом вимірювання є середнє значення вихідного сигналу (напруги) сенсору теплового потоку, отримане в результаті обробки показань, знятих протягом 20 хвилин [51, 58, 146, 147].

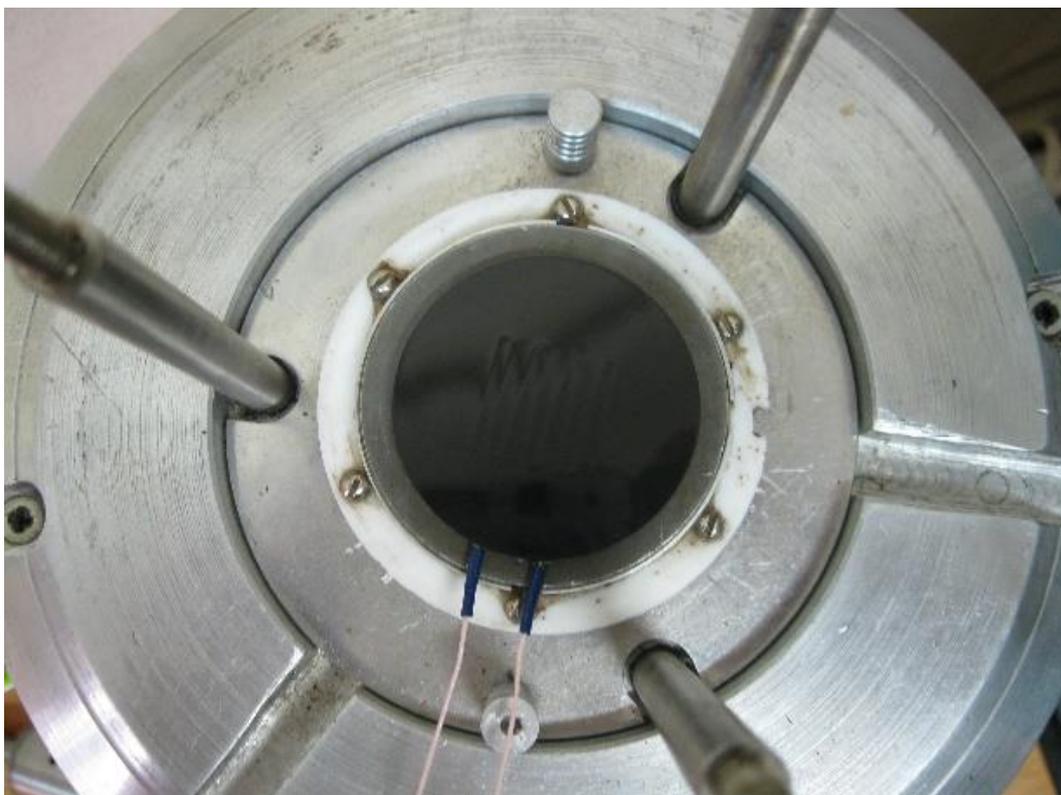


Рисунок 5.14 – Біметалічний сенсор серії PU 22, позначений літерою «f», встановлений на охолоджувальній пластині провідної системи [121]

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 5.5 [121, 146, 147].

Таблиця 5.5 – Експериментальні результати коефіцієнта емісії поверхні сенсора ε та динамічні характеристики сенсорів [121]

	PGM-15-250 «a»	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 5.15 результати тестування чутливості сенсорів теплового потоку PGM-15-250 «a», TES1-12703 «b» і TES1-12706 «c» (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 середнім результатом серії вимірювань при даній температурі. Невизначеність визначення коефіцієнтів перетворення сенсорів з не перевищує $\pm 3\%$. Результати випробувань біметалічних сенсорів «d» і «e» представлені на рисунку 5.16. [121]

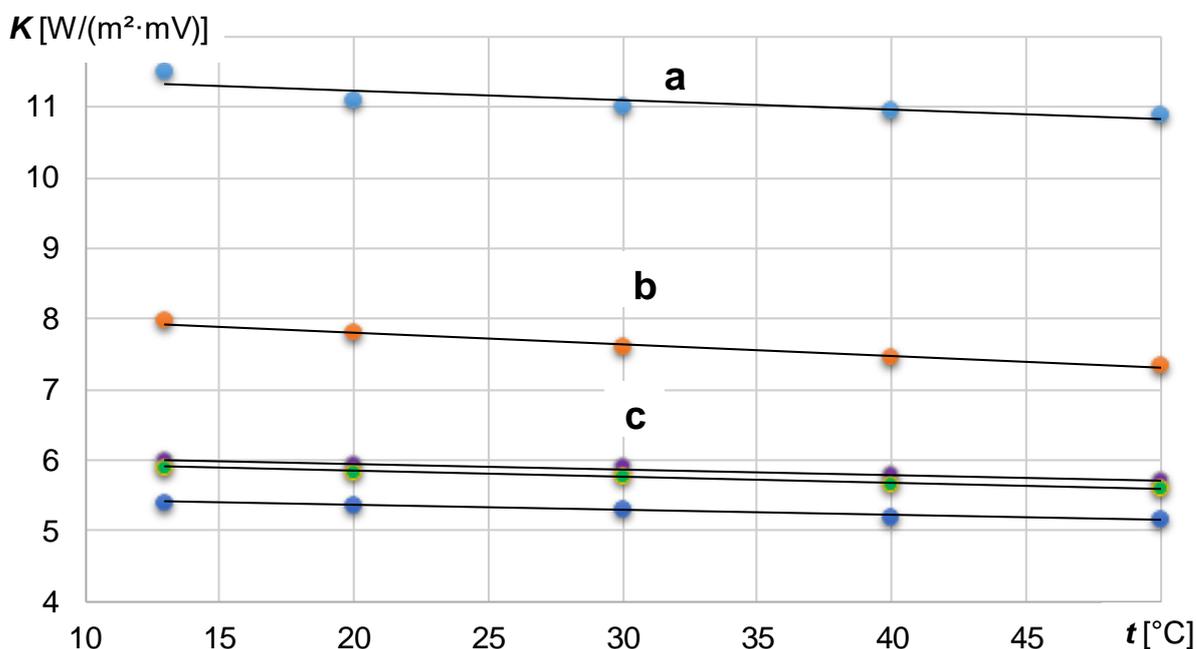


Рисунок 5.15 – Температурні залежності коефіцієнта перетворення напівпровідникових сенсорів: «a» – PGM-15-250, «b» – TEC1-12703, «c» – TEC1-12706 [121]

Аналіз отриманих характеристик сенсорів показує, що кожен з них має свої переваги та недоліки. Наприклад, перевагами модуля TEC1-12706 «с» є низька вартість і висока чутливість (найнижче значення коефіцієнта перетворення), а біметалічних сенсорів «d» і «e» — їх відносно малі постійна часу, найменша товщина і термостійкість, а також можливість виготовлення потрібної форми і розміру [121].

З метою проведення порівняльного аналізу для визначення коефіцієнта перетворення сенсора залежно від способу подачі теплової енергії після дослідження в радіаційному компараторі були проведені дослідження в провідній системі. У зв'язку з тим, що при кондуктивному підведенні тепла,

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 [121].

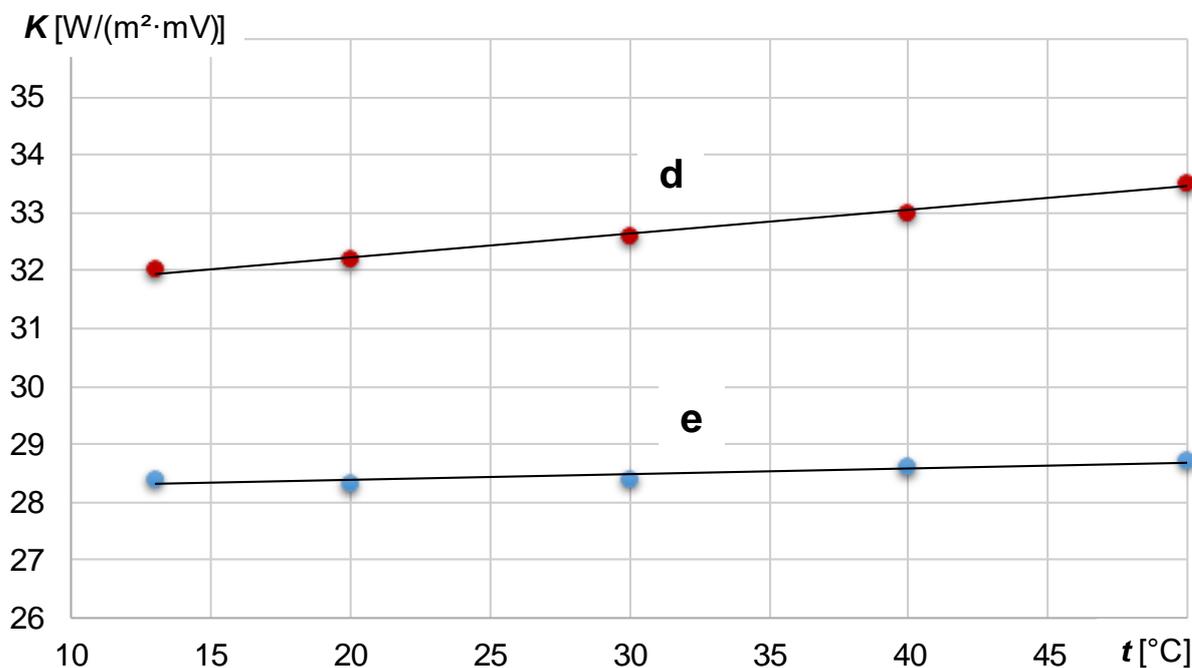


Рисунок 5.16 – Температурні залежності коефіцієнта перетворення сенсорів d і e [121]

На рис. 5.17 наведено результати дослідження коефіцієнта перетворення сенсорів PU 22 «f» при підведенні теплової енергії кондуктивним та радіаційним методом. Розходження температурних залежностей коефіцієнта перетворення для сенсора PU 22 «f» обумовлена неоднородним тепловим опором сенсора по площині. Зона розташування чутливого елемента сенсора PU 22 «f» має менший тепловий опір ніж інші зони сенсора. При радіаційному підводі енергії на поверхні сенсора задаються умови близькі до граничних умов другого роду, а при кондуктивному підводі енергії граничні умови близькі до граничних умов першого роду, що сприяє перетоку енергії від зон з більшим тепловим опором до зон з меншим тепловим опором. [121]

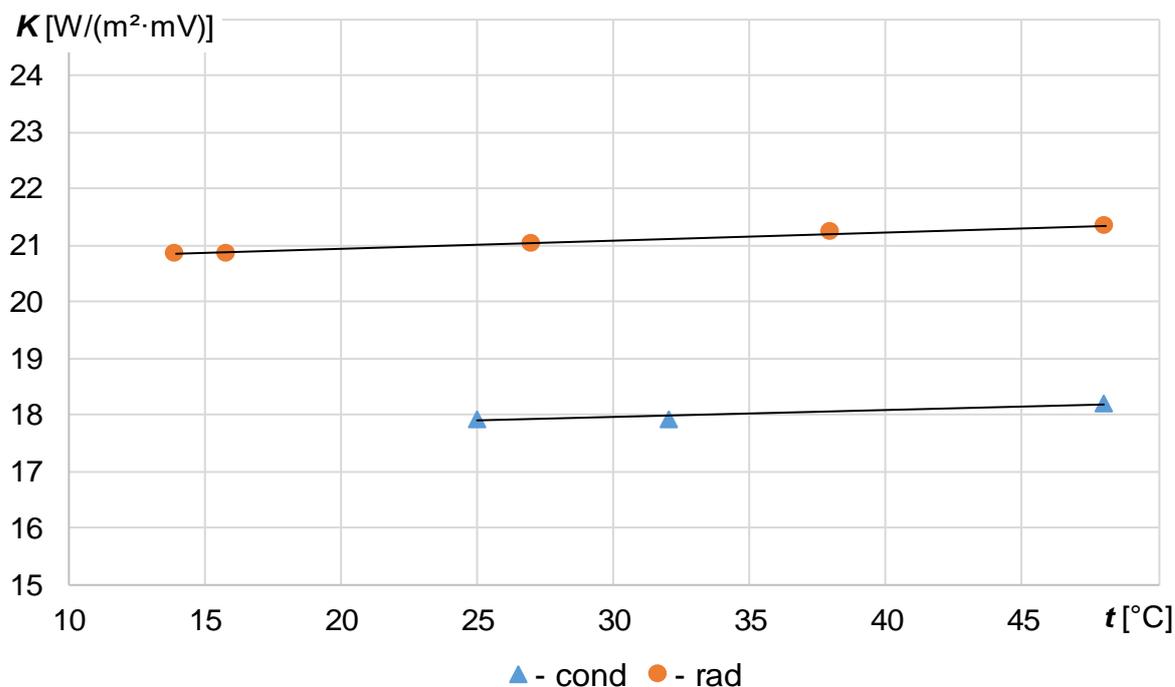


Рисунок 5.17 – Температурні залежності коефіцієнта перетворення для сенсорів PU 22 «f» [121]

5.4 Дослідження метрологічних характеристик системи контролю теплового опору оболонки будівлі

Проведено перевірку багатоканального вимірювального комплексу моделі «Система контролю теплового опору огорожувальних конструкцій» в складі 8 сенсорів та 22 термоелектричних сенсорів (перетворювачів) температури [121]. Перевірка проведена ДП «Укрметртестстандарт» .

- робочий еталон – термоперетворювач опору Pt-100 №1332 з межами основної абсолютної похибки в діапазоні від 0°C до 156°C - $\pm (0,02 + 0,00012t)$, де t – значення температури, °C. [121]

- вольтметр цифровий двоканальний ШЦ1526, клас точності 0,01/0,005 на межі 500 мВ.

- мультиметр цифровий Fluke 8846A з межами допустимої абсолютної похибки $\pm 0,08$ К в режимі вимірювання температури платиновим термоперетворювачем опору в діапазоні температури від 0°C до 100°C;

Допоміжне обладнання:

- радіаційна калібрувальна система; [121]

- ультратермостат U2C з похибкою стабілізації температури в заданій точці $\pm 0,2\text{K}$.

Для контролю умов проведення повірки використані:

- термометр лабораторний типу ТЛ-4 з межами допустимої похибки $\pm 0,4^\circ\text{C}$;

- психрометр аспіраційний типу М-34 з межами допустимої похибки $\pm 5\%$;

- барограф метеорологічний з межами абсолютної похибки не більше 110 Па.

При проведенні повірки проведені такі операції та дослідження:

- зовнішній огляд комплексу;

- визначення невизначеності вимірювання теплового потоку відповідними каналами комплексу шляхом звірення з робочим еталоном в радіаційній системі калібрування сенсорів теплового потоку. Визначення відносної похибки вимірювання теплового потоку проведено при двох значеннях нормованої поверхневої густини теплового потоку: $(250 \pm 10) \text{ Вт/м}^2$ і $(500 \pm 20) \text{ Вт/м}^2$ [121];

- визначення похибки вимірювання температури відповідними каналами комплексу шляхом звірення з робочим еталоном - термоперетворювачем опору Pt-100 – в ультратермостаті U2C. Визначення абсолютної похибки вимірювання температури проведено при двох значеннях температури: $(3 \pm 3)^\circ\text{C}$ і $(47 \pm 3)^\circ\text{C}$ [121].

Експериментально визначена відносна похибка вимірювання густини теплового потоку. Максимальні значення похибок вимірювання густини теплового потоку представлені в таблицях 5.6 і 5.7. Значення зазначеної невизначеності по кожному з каналів не перевищують межі $\pm 3\%$ [121].

Експериментально визначена абсолютна похибка вимірювання температури по 22 каналам комплексу. Значення невизначеності вимірювання температури представлені в таблицях 5.8 і 5.9. Значення зазначеної невизначеності по кожному з каналів не перевищують межі $\pm 0,5^\circ\text{C}$, зазначених в паспорті комплексу.

Таблиця 5.6 – Результати експериментальних досліджень метрологічних характеристик комплексу «Система контролю теплового опору огорожувальних конструкцій» в режимі вимірювання теплового потоку при $q \approx 250 \text{ Вт/м}^2$ [121]

Канал, номер, позначення	Коефіцієнт перетво- рення K_{sens} , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})$	Значення густини теплового потoku, виміряне еталонним сенсором $q_{\text{ет}}$, $\text{Вт}/\text{м}^2$	Значення густини теплового потoku, виміряне сенсором, що повіряють $q_{\text{пов}}$, $\text{Вт}/\text{м}^2$	Невизначе ність вимірювань густини теплового потoku, δ , %
25, № 16793, q1	1,60	249,7	246,2	-1,40
26, № 16794, q2	1,78	249,5	251,6	0,84
27, №16795, q3	1,58	249,6	251,8	0,88
28, №16796, q4	1,52	249,8	247,5	-0,92
29, №16797, q5	1,59	249,4	246,9	-1,00
30, №16798, q6	1,99	249,3	246,1	-1,28
31, №16799, q7	1,66	249,6	247,2	-0,96
32, №16800, q8	1,73	249,7	247,1	-0,99

Таблиця 5.7 – Результати експериментальних досліджень метрологічних характеристик комплексу «Система контролю теплового опору огорожувальних конструкцій» в режимі вимірювання теплового потоку при $q \approx 500 \text{ Вт/м}^2$ [121]

Канал, номер, позначення	Коефіцієнт перетворення К, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})$	Значення густини теплового потоку, виміряне еталонним сеносром $q_{\text{ет}}, \text{Вт}/\text{м}^2$	Значення густини теплового потоку, виміряне сенсором, що повіряють $q_{\text{пов}}, \text{Вт}/\text{м}^2$	Невизначеність вимірювання густини теплового потоку, $\delta, \%$
25, № 16793, q1	1,60	495,7	493,1	-0,56
26, № 16794, q2	1,78	496	493,2	-0,56
27, №16795, q3	1,58	495,8	497,1	0,26
28, №16796, q4	1,52	495,7	497,8	0,42
29, №16797, q5	1,59	495,6	497,5	0,38
30, №16798, q6	1,99	495,7	495,2	-0,11
31, №16799, q7	1,66	495,6	493,1	-0,50
32, №16800, q8	1,73	495,5	495,8	0,06

Таблиця 5.8 Результати експериментальних досліджень метрологічних характеристик комплексу «Система контролю теплового опору огорожувальних конструкцій» в режимі вимірювання температури за $t \approx 0^\circ\text{C}$

Канал, номер сенсору, позначення	Температура за показами робочого еталону – термоперетворювача опору Pt-100 №1332, $^\circ\text{C}$	Температура за показами каналу ПТ, що повіряють $^\circ\text{C}$	Абсолютна похибка вимірювання температури, $^\circ\text{C}$
1, №2893, T1	0,5	0,8	-0,3
2, №2894, T2	0,5	0,37	0,13
3, №2895, T3	0,5	0,58	-0,08
4, №2896, T4	0,5	0,65	-0,15
5, №2897, T5	0,5	0,91	-0,41
6, №2898, T6	0,5	0,82	-0,32
7, №2899, T7	0,5	0,74	-0,24
8, №2900, T8	0,5	0,7	-0,2
9, №2901, T9	0,5	0,47	0,03
10, №2902, T10	0,5	0,67	-0,17
11, №2903, T11	0,5	0,83	-0,33
12, №2904, T12	0,5	0,63	-0,13
13, №2905, T13	0,5	0,36	0,14
14, №2906, T14	0,5	0,72	-0,22
15, №2907, T15	0,5	0,45	0,05
16, №2908, T16	0,5	0,63	-0,13
17, №2909, T17	0,5	0,77	-0,27
18, №2910, T19	0,5	0,56	-0,06
19, №2911, T19	0,5	0,43	0,07
20, №2912, T20	0,5	0,59	-0,09
21, №2913, T21	0,5	0,83	-0,33
22, №2914, T22	0,5	0,8	-0,3

Таблиця 5.9 Результати експериментальних досліджень метрологічних характеристик комплексу «Система контролю теплового опору огорожувальних конструкцій» в режимі вимірювання температури при $t \approx 50^\circ\text{C}$ [121]

Канал, номер сенсору, позначення	Температура за показами робочого еталону – термоперетворювача опору Pt-100 №1332, $^\circ\text{C}$	Температура за показами конала ПТ, що повіряють $^\circ\text{C}$	Абсолютна похибка вимірювання температури, $^\circ\text{C}$
1, №2893, T1	49,92	49,72	0,2
2, №2894, T2	49,92	50,14	-0,22
3, №2895, T3	49,92	49,62	0,3
4, №2896, T4	49,92	49,55	0,37
5, №2897, T5	49,92	50,06	-0,14
6, №2898, T6	49,92	49,82	0,1
7, №2899, T7	49,92	50,11	-0,19
8, №2900, T8	49,92	49,74	0,18
9, №2901, T9	49,92	50,03	-0,11
10, №2902, T10	49,92	49,81	0,11
11, №2903, T11	49,92	50,05	-0,13
12, №2904, T12	49,92	49,79	0,13
13, №2905, T13	49,92	49,99	-0,07
14, №2906, T14	49,92	50,02	-0,1
15, №2907, T15	49,92	49,83	0,09
16, №2908, T16	49,92	50,1	-0,18
17, №2909, T17	49,92	49,68	0,24
18, №2910, T19	49,92	49,82	0,1
19, №2911, T19	49,92	50,01	-0,09
20, №2912, T20	49,92	49,62	0,3
21, №2913, T21	49,92	49,72	0,2
22, №2914, T22	49,92	50,14	-0,22

Багатоканальний вимірювальний комплекс «Система контролю теплового опору огорожувальних конструкцій» допускається до застосування згідно з призначенням в якості робочого засобу вимірювання поверхневої густини теплового потоку в діапазоні від 1 до 500 Вт/м² і температури в діапазоні від мінус 40 до плюс 50°C [121] (Додаток Б).

5.5 Висновки до розділу

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 та розширити нижню межу діапазону вимірювання густини теплового потоку.

Запроваджено комплексний підхід до визначення характеристик біметалевих та напівпровідникових сенсорів теплового потоку, які використовуються для контролю теплового опору огорожувальних конструкцій. При натурних вимірюваннях враховано вплив умов їх подальшого використання. Застосування радіаційного методу дає можливість досліджувати коефіцієнт емісії сенсорів. Це дуже важливо у випадках, коли сенсор і елементи оболонки мають різні значення випромінювальної здатності. Кондуктивний метод важливий через можливість подачі теплового потоку низької щільності, починаючи від 1 Вт/м². Це вирішальний момент у разі вимірювання на місці елементів оболонки з високим тепловим опором або у випадку низької різниці температур.

Визначено такі характеристики: коефіцієнт перетворення (чутливість до теплового потоку), залежність коефіцієнта перетворення від температури, час відгуку сенсора, коефіцієнт емісії поверхні сенсора. В результаті проведених досліджень встановлено, що напівпровідниковий сенсор ТЕС1-12706 має найменше значення коефіцієнта перетворення, що дозволяє використовувати

їх в умовах низьких теплових потоків. Визначення коефіцієнта перетворення сенсора, проведене при кондуктивному та радіаційному підведенні теплової енергії, дозволило виявити вплив умов теплообміну на характеристики сенсорів. Так, при радіаційному теплообміні коефіцієнт перетворення сенсора збільшується на 14% порівняно з кондуктивним теплообміном, що призводить до зниження чутливості вимірювальної системи та вносить додаткову похибку в результат вимірювання. Біметалічний сенсор теплового потоку (Ni-Const) і сенсор серії PU 22 мають відносно малу постійну часу ($\tau_{0,63} = 8$ с), що разом з малою товщиною є визначальним фактором при вимірюванні теплового потоку в умовах нестационарного теплообміну.

Для перевірки отриманих результатів були проведені дослідження метрологічних характеристик багатоканальної системи контролю теплового опору огорожувальних конструкцій на обладнанні лабораторії ДП „УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ”, атестованого за ISO 17025. Система включала біметалічні сенсори теплового потоку (Ni-Const) і сенсори температури. У результаті порівняльних випробувань встановлено, що невизначеність вимірювання температури не перевищувала $\pm 0,5$ °С, а максимальне абсолютне відхилення вимірювання густини теплового потоку становила $\pm 0,75$ Вт/м². Отримані результати дозволяють рекомендувати біметалічні сенсори теплового потоку як чутливий елемент системи визначення теплового опору оболонки будівлі.

6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТЕПЛООВОГО ОПОРУ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ БУДІВЕЛЬ ТА ПРИЛАДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ЕМІСІЇ

6.1 Лабораторні випробування системи контролю теплового опору

Для оцінки експлуатаційних характеристик було проведено порівняльні випробування огороджувальних конструкцій системою контролю теплового опору та системою, що впроваджена у ДП „УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ”. При цьому була використана кліматична камера для забезпечення стабільних умов проведення експерименту [121, 143].

Випробування проводились на фрагменті конструкції з тришарових стінових панелей з утеплювачем із пінополіуретану з зазначенням однорідних зон та віконному блоці з полівінілхлоридних профілів з заповненням світлопрозорої частини двокамерними склопакетами варіантом скління СПД 4i-14Ar-4M₁-12Ar-4i [121, 143].

На рисунку 6.1 представлена схема розміщення однорідних температурних зон фрагменту конструкції з тришарових стінових панелей з утеплювачем із пінополіуретану з зазначенням однорідних зон.

Розрахунки проведено згідно з ДСТУ Б В.2.6-101 «Конструкції будинків і споруд. Метод визначення опору теплопередачі огороджувальних конструкцій»[1]; ДБН В.2.6-31[14] 6 розділу 2 «Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель».

Випробування проводились при температурі повітряного середовища в холодній та теплій камерах на відстані 0,15 м від поверхонь зразка відповідно в межах мінус 22,79°C...мінус 21,75°C; 22,42°C...24,21°C, середнє значення температури внутрішнього повітря 23,60°C.

Результати, що отримані з використанням системи ДП „УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ” та системи контролю теплового опору, представлено у таблицях 6.1 та 6.2.

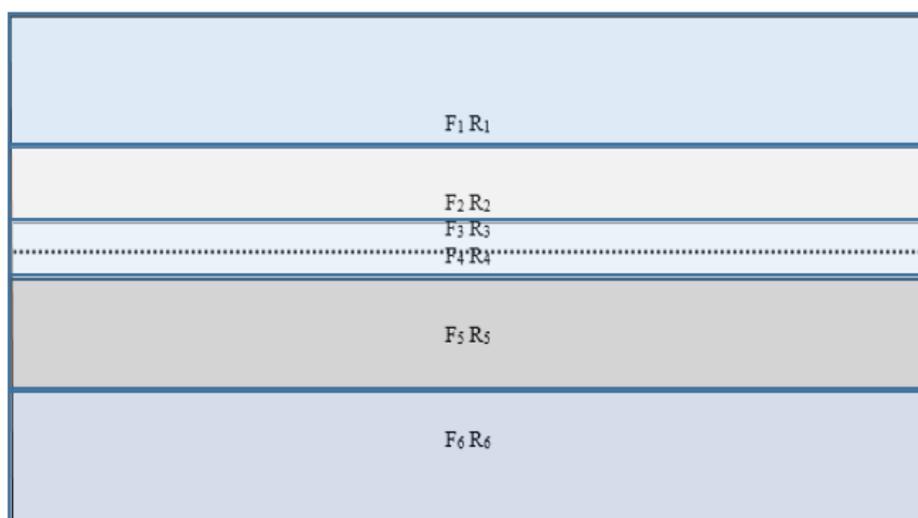


Рисунок 6.1 – Схема розміщення однорідних температурних зон фрагменту конструкції: $R_0^1 = 5,07 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; $R_0^2 = 4,77 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; $R_0^3 = 2,24 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; $R_0^4 = 2,20 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; $R_0^5 = 4,23 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; $R_0^6 = 4,62 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; $R_0^{\text{пр}} = 4,45 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; $R_k^1 - R_k^6$ – розрахунковий опір теплопередачі однорідних зон панелі, $\text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; $R_0^{\text{пр}}$ – розрахунковий приведений опір теплопередачі панелей з врахуванням площі однорідних зон ($F_1 \dots F_6$), $\text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ [143].

Таблиця 6.1 – Результати теплотехнічних випробувань отриманих на комплексі обладнання для визначення теплофізичних параметрів будівельних огорожувальних конструкцій та матеріалів [143].

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	-
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 6.2 – Результати теплотехнічних випробувань отриманих з використанням системи контролю теплового опору огорожувальних конструкцій будівель [143].

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} , °C	21,01	21,26	20,34	19,43	20,95	21,01
Середня температура зовнішньої поверхні однорідних зон t _з , °C	-22,01	-21,30	-21,65	-21,62	-21,65	-21,20
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

На рисунку 6.2 представлено схему розміщення однорідних температурних зон на віконному блоці з полівінілхлоридних профілів з заповненням світлопрозорої частини двокамерними склопакетами варіантом скління СПД 4i-14Ar-4M₁-12Ar-4i [121].

Температура повітряного середовища в холодній та теплій камерах на відстані 0,15 м від поверхонь зразка становила відповідно в межах мінус 20,74...мінус 18,98°C, 24,26.. 26,48°C.

Розрахунки проведено згідно діючими стандартами [1-5]. Результати, що отримані з використанням системи ДП „УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ” та системи контролю теплового опору, представлено у таблицях 6.3 та 6.4. [121].

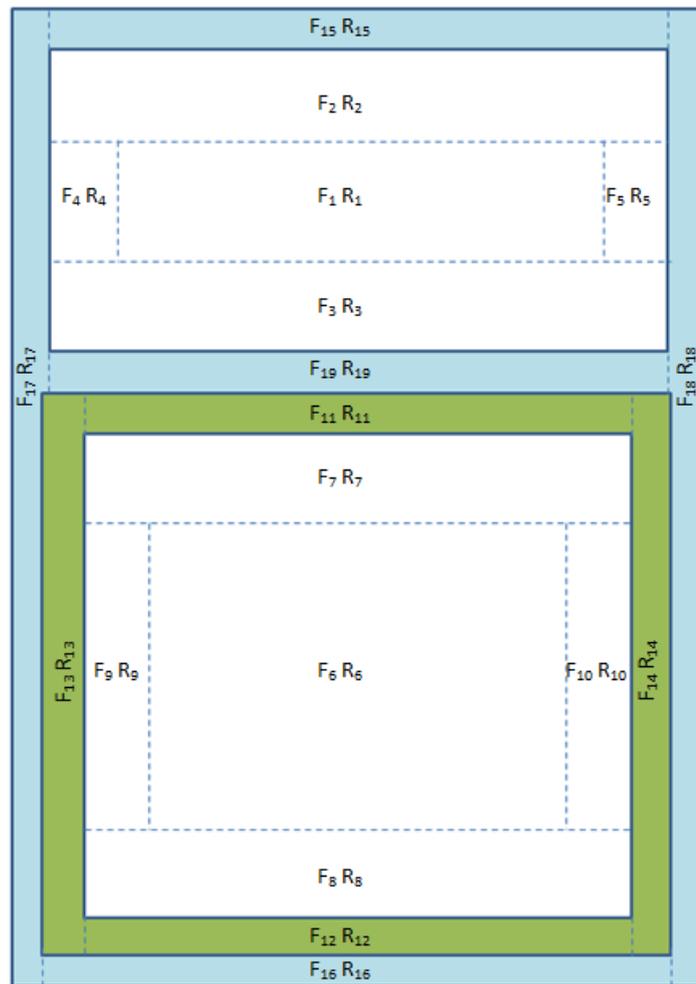


Рисунок 6.2 – Схема розміщення однорідних температурних зон на віконному блоці з полівінілхлоридних профілів з заповненням світлопрозорої частини двокамерними склопакетами варіантом скління 4i-14Ar-4M₁-12Ar-4i, де: $R_{к}^{ст}=0,76 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; $R_{к}^p = 0,68 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; $R_{к}^{np} = 0,73 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; $R_0^{np} = 0,90 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; $R_{к}^{ст}$ – розрахунковий приведений термічний опір світлопрозорої частини віконного блоку з врахуванням однорідних зон ($F_1 \dots F_{10}$), $\text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; $R_{к}^p$ – розрахунковий приведений термічний опір непрозорої частини віконного блоку з врахуванням однорідних зон ($F_{11} \dots F_{19}$), $\text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; $R_{к}^{np}$ – розрахунковий приведений термічний опір віконного блоку, $\text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$; R_0^{np} – розрахунковий приведений опір теплопередачі віконного блоку, $\text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ [121]

Таблиця 6.3 – Результати теплотехнічних випробувань отриманих на комплексі обладнання для визначення теплофізичних параметрів будівельних огорожувальних конструкцій та матеріалів [121]

Найменування однорідних зон	Світлопрозора частина	Непрозора частина (стулка)	Непрозора частина (коробка)
Загальна площа виробу F , м ²	2,332		
Загальна площа вимірювальних однорідних зон F , м ²	1,669	0,324	0,339
Середня температура внутрішньої поверхні однорідних зон $t_{вн}$, °С	20,22	20,05	17,97
Середня температура зовнішньої поверхні однорідних зон t_z , °С	-14,89	-12,51	-15,80
Середня щільність теплового потоку однорідних зон q , Вт/м ²	45,85	40,90	57,00
Термічний опір однорідних зон, $R_k^{o.z.}$; м ² ·К/Вт	0,76	0,80	0,59

Таблиця 6.4 – Результати теплотехнічних випробувань отриманих на системі контролю теплового опору огорожувальних конструкцій оболонки будівлі [121]

Найменування однорідних зон	Світлопрозора частина	Непрозора частина (стулка)	Непрозора частина (коробка)
Загальна площа виробу F , м ²	2,332		
Загальна площа вимірювальних однорідних зон F , м ²	1,669	0,324	0,339
Середня температура внутрішньої поверхні однорідних зон $t_{вн}$, °С	19,8	20,35	18,35
Середня температура зовнішньої поверхні однорідних зон t_z , °С	-15,2	-12,91	-15,3
Середня щільність теплового потоку однорідних зон q , Вт/м ²	46,6	41,3	56,5
Термічний опір однорідних зон, $R_k^{o.z.}$; м ² ·К/Вт	0,75	0,81	0,6

Виходячи з отриманих даних комплексу обладнання для визначення теплофізичних параметрів будівельних огорожувальних конструкцій та матеріалів та системи контролю теплового опору огорожувальних конструкцій будівель визначено, що розбіжність у результатах вимірювання температури не перевищила $\pm 0,5$ К, а вимірювання густини теплового потоку – $\pm 0,75$ Вт/м² [121].

6.2 Натурні випробування оболонки будівлі з використанням створеної системи контролю та розробленої методики

Двоповерховий житловий будинок, побудований на бетонному фундаменті; перекриття – залізобетонні пустотні плити; покрівля – скатна з

шиферу; стіни – з силікатної цегли з утепленням: на першому поверсі – мінеральна вата товщиною 50 мм та гіпсокартон (внутрішня сторона стіни), на другому поверсі – пінопласт ППС товщиною 50 мм (зовнішня сторона стіни).

На термограмі, знятій з зовнішнього боку будинку (рис. 6.3 а) видно, що найбільші тепловтрати крізь оболонку будинку спостерігаються на ділянках стін, які знаходяться за радіаторами опалювальних систем. Суттєвої різниці значень температури на характерних ділянках зовнішнього боку стін першого та другого поверхів не виявлено [137].

На термограмі внутрішньої сторони стіни першого поверху (рис. 6.3 б) видно містки холоду, що утворені металевим профілем, який проходить крізь шар мінеральної вати і на якому закріплені листи гіпсокартону [137].

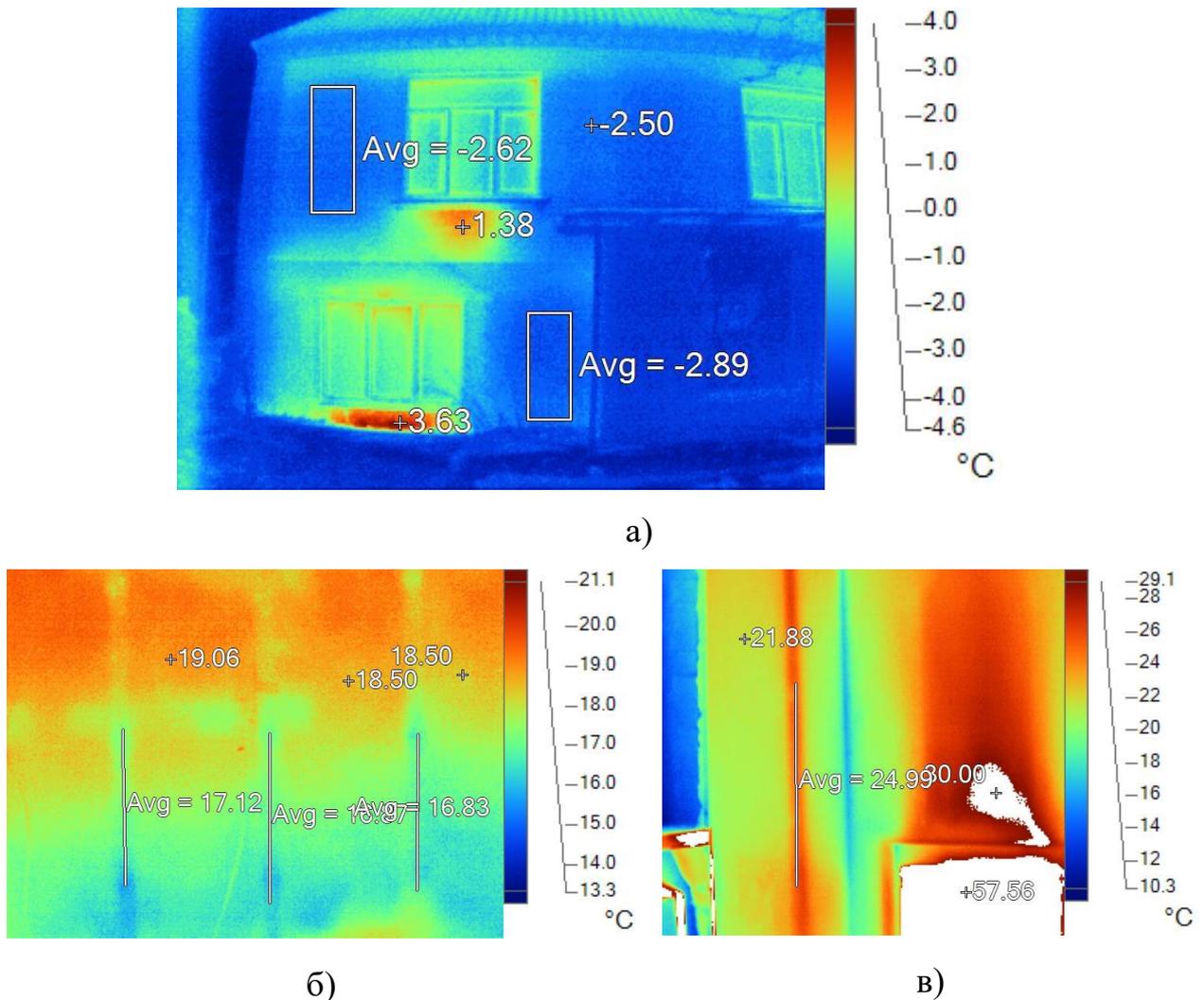


Рисунок 6.3 – Термограма обстеження огорожувальної конструкції будівлі [137].

На рис. 6.3 в наведено зони сильного перегріву поверхні стіни над утепленою у шар утеплювача батареєю (енергія від нагрівального приладу втрачається крізь неутеплену ділянку стіни, а від нагрітого повітря швидко віддається поверхні стіни над батареєю). Необхідно також звернути увагу на перегрів поверхні гіпсокартону у зоні, де розташована труба системи опалення, а поряд з нею – холодний, погано утеплений кут приміщення [137].

Розміщення сенсорів теплового потоку та температури системи контролю теплового опору при проведенні експериментів наведено на рис. 6.4. [137]

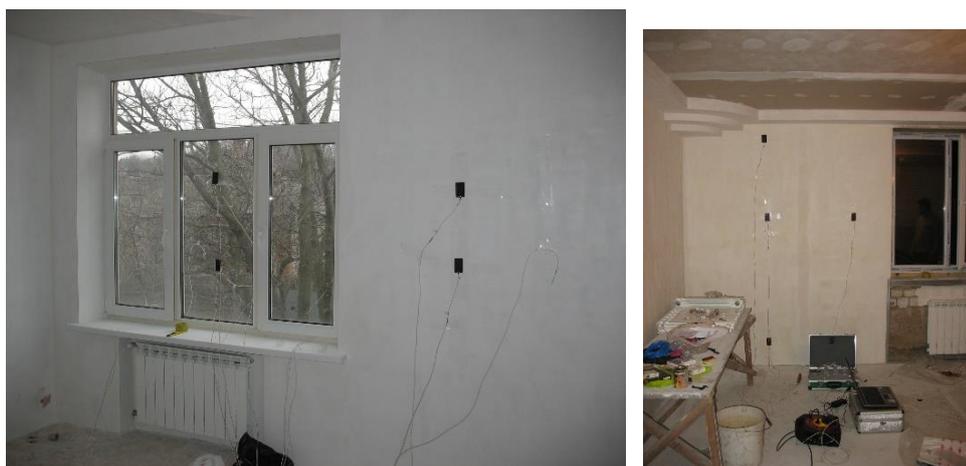


Рисунок 6.4 –Вигляд приміщень будинку під час контактних вимірювань [137]

В таблиці 6.5 наведені усереднені результати контактних вимірювань на характерних ділянках стін обстежуваної будівлі.

Таблиця 6.5 – Усереднені результати контактних вимірювань на характерних ділянках [137]

Найменування огорожувальної конструкції	$\bar{T}_{НС.ВН}$, °C	$\bar{T}_{П.ВН}$, °C	$\bar{T}_{П.ЗОВ}$, °C	$\bar{T}_{НС.ЗОВ}$, °C	\bar{q} , Вт/м ²	$\bar{w}_{ВН}$, %	$\bar{V}_{ЗОВ}$, м/с
Стіна зовнішня 1-й поверх	18,58	18,37	1,9	1,25	12,17	80	1–2
Стіна зовнішня 2-й поверх	21,9	20,2	4,04	3,95	9,64	75	1–2

За результатами контактних вимірювань визначено фактичні значення опору теплопередаванню крізь характерні зони огорожувальної конструкції з утеплювачем, які становлять:

- на стіні 1-го поверху з утеплювачем із мінеральної вати – $1,52 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;
- на стіні 2-го поверху з утеплювачем із пінопласту – $1,85 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$. [137]

Необхідно відзначити, що утеплення першого поверху виконано невірно – утеплювач розташований з внутрішньої сторони цегляної стіни. При такій конструкції зона з температурою точки роси розташована всередині волокнистого паропроникного утеплювача, внаслідок чого з вологого повітря приміщення в цій зоні буде конденсуватися волога, яка призведе до погіршення теплоізоляційних властивостей огорожувальної конструкції.

Висновки та рекомендації за результатами обстеження двоповерхового житлового будинку:

- встановлено, що хоча попередньо проведене утеплення стін значно покращило їх теплозахисні властивості, однак досягнуті значення опору теплопередаванню менші за сучасні встановлені норми для будівництва [1];
- рекомендовано провести додаткове утеплення окремих ділянок стін;
- утеплення стін потрібно проводити з зовнішньої сторони огорожувальної конструкції.

П'ятиповерховий житловий будинок, що має габаритні розміри $15,2 \times 60,2 \times 12,5 \text{ м}^3$, побудований на фундаменті з залізобетонних плит. При цьому в обстежуваному будинку перекриття – залізобетонні пустотні плити товщиною 220 мм; покрівля – пласка з утепленням; стіни – з залізобетонних блоків товщиною 400 мм, покриті шаром утеплювача з пінополіуретану товщиною 30 мм; система опалення – централізована [116, 150].

Тепловізійне обстеження показало, що максимальна різниця значень температури на стіні складає 2 К і підтвердило якість виконаних робіт з утеплення. Найбільша температура на поверхні стіни, мінус 6°C ,

спостерігалася у зонах розташування надвіконних залізобетонних балок. На рисунку 6.5 для порівняння наведено термограму стіни з вікнами в обстеженому утепленому домі (рис. 6.7, а) та термограму такої ж ділянки стіни розташованого поруч дома, збудованого по тому ж проекту, але не утепленого (рис. 6.7, б). Термограми зроблено з проміжком часу у декілька хвилин. На термограмах видно, що температура зовнішньої поверхні стін у зонах розташування надвіконних балок утепленого та неутепленого домів різниться на 4 К, тобто при значенні коефіцієнту теплообміну близько $12 \text{ Вт}/(\text{К}\cdot\text{м}^2)$, який в умовах відсутності вітру спостерігався при термографуванні, різниця в питомих тепловтратах з цих ділянок складає $48 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

За результатами контактних вимірювань визначено фактичне значення опору теплопередаванню крізь характерну зони стіни з утеплювачем, яке становило $1,68 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$.

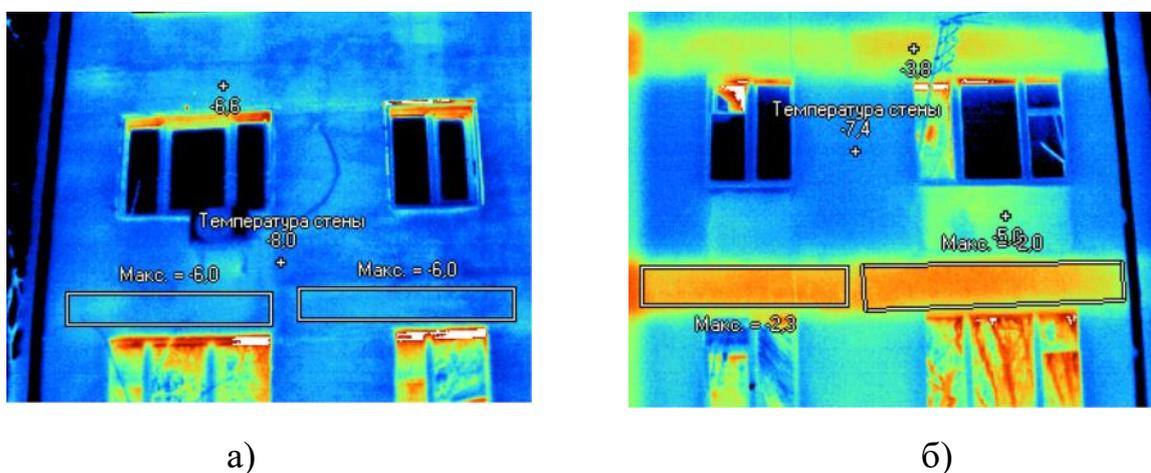


Рисунок 6.5 – Термограми ділянки стіни утепленого дому (а) та такої ж ділянки подібного за початковим проектом неутепленого дому (б) [116, 150]

Як додатковий метод аналізу було використано знешумлення сигналів сенсорів теплового потоку за допомогою вейвлет-перетворення. Було обрано вейвлет Добеші з рівнем декомпозиції 4, який є оптимальним для всіх сигналів сенсорів теплового потоку [151]. Результати опрацювання сигналів сенсорів теплового потоку q_9 , q_{11} , q_{12} та оцінка СКО наведені в таблиці 6.6 [150]

Теплові зображення зовнішньої сторони будівлі та внутрішньої зони, де були розміщені сенсори, наведено на рисунку 6.6.

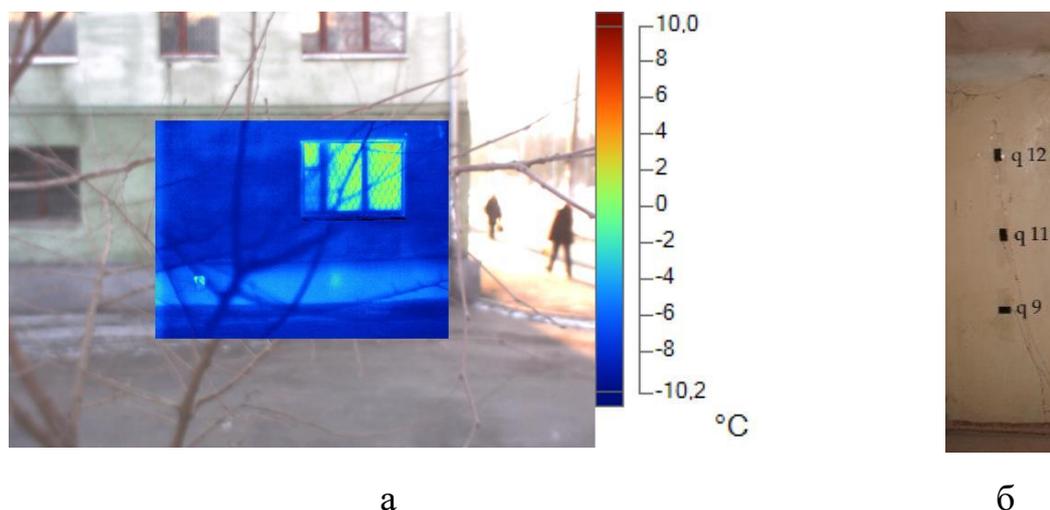


Рисунок 6.6 – Термограма зовнішньої оболонки (а) та місця встановлення сенсорів на внутрішній поверхні стіни будівлі (б) [116, 150]

Для проведення валідації моделі запропонованої в розділі 3 обрано величини температури та теплового потоку виміряні сенсорами в характерних зонах при проведенні експерименту з визначення теплового опору, які наведено в таблиці 6.6.

Таблиця 6.6 – Порівняння результатів експериментальних досліджень та CFD моделі характерної зони теплозахисної оболонки [116, 150]

	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
СКО	0,4434	0,0441	0,264	0,413	0,044	0,291	0,3295	0,0442	0,2665
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
Експеримент, знешумлення сигналів	8,92	17,4	2,87	9,77	17,57	2,71	9,76	17,79	2,88
СКО, знешумлення сигналів	0,09	0,0441	0,264	0,19	0,044	0,291	0,11	0,0442	0,2665

З аналізу таблиці 6.6 встановлено, що відхилення між результатами CFD моделювання та експериментальними даними не перевищує 5,92% для значень

температури та 3,75% для теплового потоку, що свідчить про прийнятну збіжність отриманих результатів та адекватність створеної CFD моделі [116, 150].

Також показано, що використання знешумлення сигналів сенсорів теплового потоку за допомогою вейвлет-перетворення дозволило суттєво знизити СКО [150].

Проведено оцінку невизначеності результатів вимірювання теплового опору оболонки будівлі (таблиця 6.7) для даного експерименту, за методикою заборонованою в розділі 4 за формулами (4.24) – (4.34).

Таблиця 6.7 – 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 $u_B(q_T)$	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 елемента, 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 [18], відповідно до якого розширена невизначеність лежить в межах від 14% до 28% (розділ 1), шляхом оцінки достовірності за формулою (4.34). При цьому встановлено підвищення достовірності для даного експерименту 2,67%, порівняно з нижньою межею, та 18,32%, при порівнянні з верхньою межею.

Окремо розташований житловий 16-ти поверховий односекційний будинок, збудований за типовим проектом серії Т6 [121].

Конструктивна схема будинку – збірний залізобетонний каркас зі збірними перекриттями та збірною фундаментною плитою. Зовнішні стіни будинку виконані з залізобетону завтовшки 100 мм, керамзитобетону завтовшки 200 мм та шару штукатурки товщиною 100 мм.

Горище та технічний поверх холодні. Горище з розводкою трубопроводів.

Світлопрозорі конструкції (вікна, балконні двері) виконані з подвійного склопакету в дерев'яних роздільних рамах. [121].

У будинку передбачене водяне опалення, гаряче водопостачання, що підключено до системи централізованого теплопостачання. Система опалення одноконтурна, вертикальна, з верхнім розведенням. [121].

Загальна кількість квартир – 112. Загальна висота будинку 52,605 м, висота підвалу 2,7 м. У будинку передбачено одну сходову клітку та два підйомні ліфти. Для дослідження будівель такої висоти доцільно використовувати БПЛА з встановленою тепловізійною камерою і проводити дослідження згідно рекомендацій [138, 139]

Опалювана площа будівлі – 9021 м². Опалюваний об'єм будівлі – 27064 м³. Загальна площа зовнішніх огорожувальних конструкцій – 7065 м².

Проведено телевізійну зйомку та визначення опору теплопередаванню огорожувальних конструкцій. Тепловізійна зйомка виконана з метою визначення теплотехнічного стану огорожувальної конструкції і виявлення місць, що вимагають особливої уваги при проведенні термомодернізації будівлі. [121].

Далі представлено фотографії та характерні термограми огорожувальної конструкції будинку, на яких маркерами у вигляді ліній і точок представлені зони з більш високою температурою в порівнянні з усією стінкою. Дані зони є місцями теплових втрат, що вимагають особливої уваги. Також точковим маркером показано зону з нормальною температурою поверхні. [121].

На рисунку 6.7 маркерами показано зони суттєвої термічної неоднорідності плит на торцевій стіні.

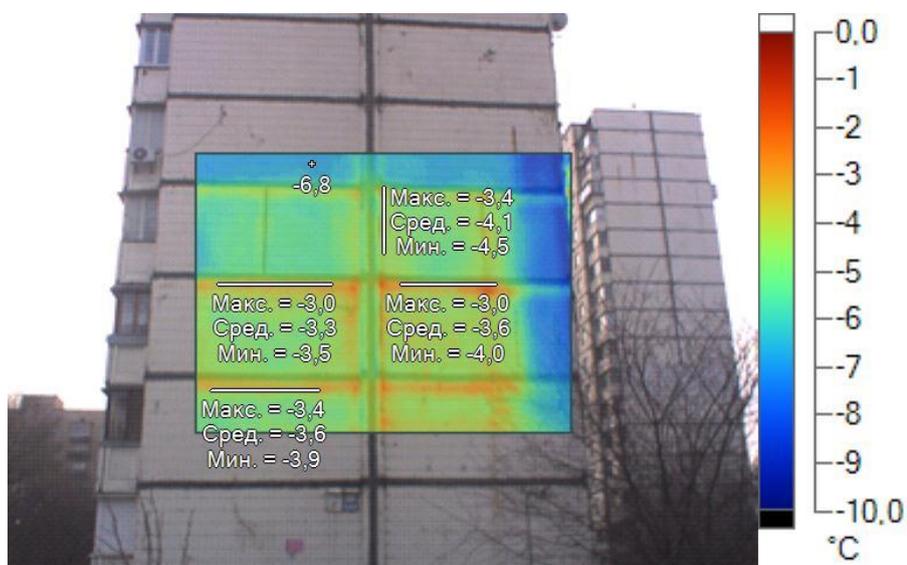


Рисунок 6.7 – Термограма ділянки стіни 16-поверхового будинку [121].

На рис. 6.8 маркерами показано стики міжповерхових перекриттів і стінових плит, а також можна побачити збільшені тепловтрати у зоні панелі, перпендикулярної до фасаду [121].

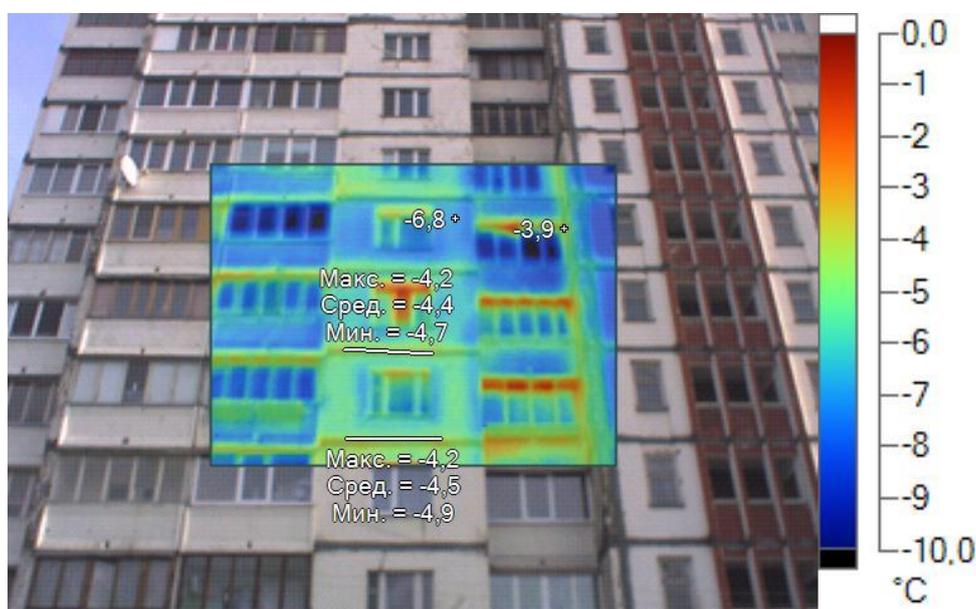


Рисунок 6.8 – Термограма стиків міжповерхових перекриттів 16-поверхового будинку [121].

На рисунку 6.9 можна побачити, що огорожувальна панель, яка перпендикулярна фасаду будинку, є містком холоду і потребує утеплення.

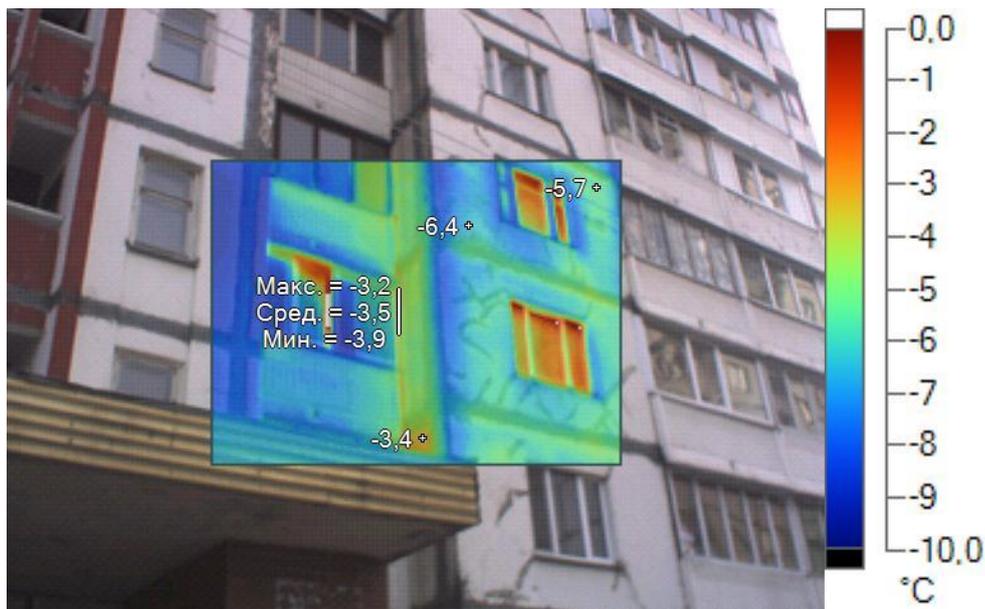


Рисунок 6.9 – Термограма огорожувальної панелі фасаду 16-поверхового будинку [121].

На термограмі рисунку 6.10 маркерами відмічено зони з високими тепловими втратами на вході в будинок, що показує необхідність утеплення вхідних дверей і балок, які огорожують дверний отвір [121].



Рисунок 6.10 – Термограма входу в будинок [121].

На термограмі, наведеній на рис. 6.11, маркерами показано зони, де розташовані опалювальні прилади (батареї системи опалення). Як видно з показів температури, у цих зонах відсутнє утеплення, що призводить до збільшення трансмісійних тепловтрат [121].

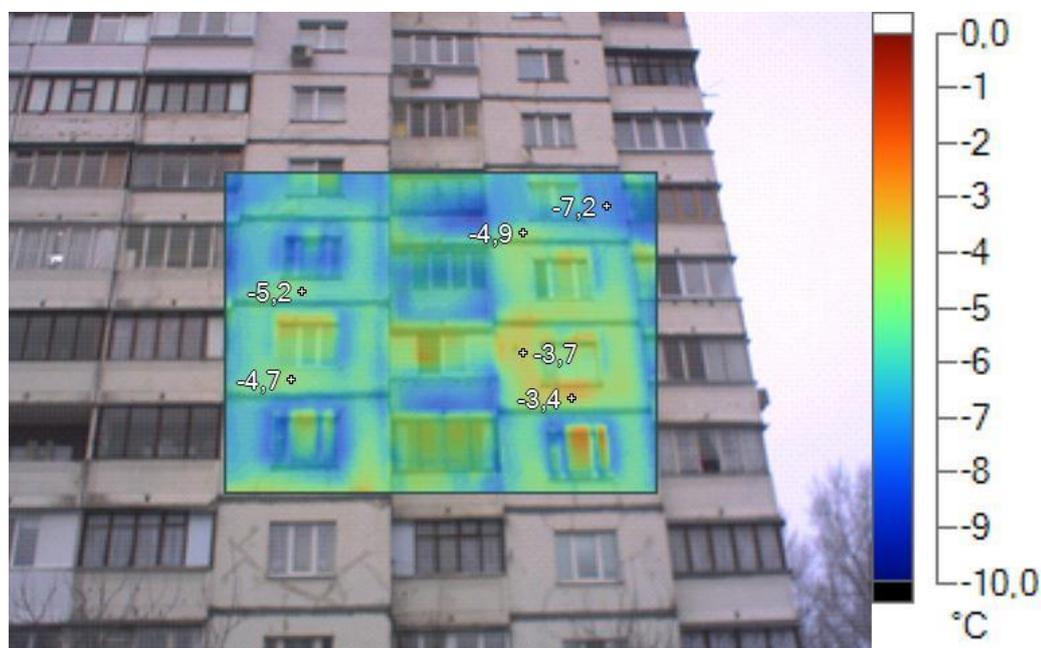


Рисунок 6.11 – Термограма фасаду будівлі [121].

При проведенні випробувань визначено значення опору теплопередаванню різнотипних огорожувальних конструкцій будівлі та визначений трансмісійний коефіцієнт теплопередавання будинку, розраховані також інфільтраційний коефіцієнт теплопередавання, загальний коефіцієнт теплопередавання будівлі та енергетичні характеристики будівлі.

Всі розрахунки виконано у відповідності до рекомендацій [18].

Результати визначення геометричних та теплотехнічних показників огорожувальної конструкції згідно з [14] наведено в таблиці 6.8, а результати розрахунків енергетичних характеристик будівлі для різних варіантів утеплення будівлі наведено у таблиці 6.8.

Таблиця 6.8 – Геометричні та теплотехнічні показники елементів конструкції 16-ти поверхової будівлі для фактичного стану та для чотирьох варіантів утеплення [121]..

Назва елементу огорожувальної конструкції будівлі	Площа елементів огорожувальної конструкції, м ²	Фактичний стан до утеплення ($R_{\Phi AK}$)
Зовнішні стіни	2699	0,81
Вікна	303	0,3
Лоджії, в тому числі:		
– зовнішня панель	1106	0,24
– скління лоджії	1567	0,18
– внутрішня стіна	1792	0,81
– внутрішнє скління	883	0,42
Технічний поверх:		
– зовнішні стіни	325,9	0,81
– дахове перекриття	648	0,26
– перекриття 16-го поверху	648	0,44
Техпідпілля:		
– зовнішні стіни	139,7	0,81
– цокольне перекриття	648	0,4
– ОК на ґрунті	784,7	4,2

Таблиця 6.9 – Енергетичні показники згідно з [14] 16-ти поверхової будівлі для фактичного стану та різних варіантів утеплення[121].

Назва енергетичного показника	Фактичний стан
Приведений трансмісійний коефіцієнт теплопередавання оболонки будинку $K_{пр}$, Вт/(м ² ·К)	1,71
Коефіцієнт теплопередавання оболонки будинку за рахунок інфільтрації та вентиляції $K_{інф}$, Вт/(м ² ·К)	1,09
Загальний коефіцієнт теплопередавання будинку $K_{буд}$, Вт/(м ² ·К)	2,80
Розрахункові річні витрати теплової енергії	
$Q_{рч}$, кВт·год	1792986
ГДж	6455
Гкал	1542
Розрахункове значення питомих тепловитрат на $q_{буд}$, кВт·год/м ² опалення	198,8
Відносна різниця розрахункового значення питомих тепловитрат на опалення від максимально допустимого $100 \cdot (q_{буд} - E_{max}^*) / E_{max} \%$	+172 %
Клас енергетичної ефективності	F
$*E_{max} = 73 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$	

Житлові п'ятиповерхові шестисекційні будинки. Загальна кількість квартир у будинку – 120. Загальна висота будинку 14,6 м, висота підвалу 2,38 м. У будинку передбачено одну сходову клітину на одну секцію.

Конструктивна схема будинку – збірний залізобетонний каркас зі збірними перекриттями та збірною фундаментною плитою. Зовнішні стіни будинку виконані з залізобетону завтовшки 40 мм, керамзитобетону завтовшки 200 мм та шару штукатурки товщиною 50 мм. Горище холодне. Технічний поверх теплий з розводкою трубопроводів опалення та гарячого

водопостачання. Світлопрозорі конструкції (вікна, балконні двері) виконані з подвійного склопакету в дерев'яних роздільних рамах [137].

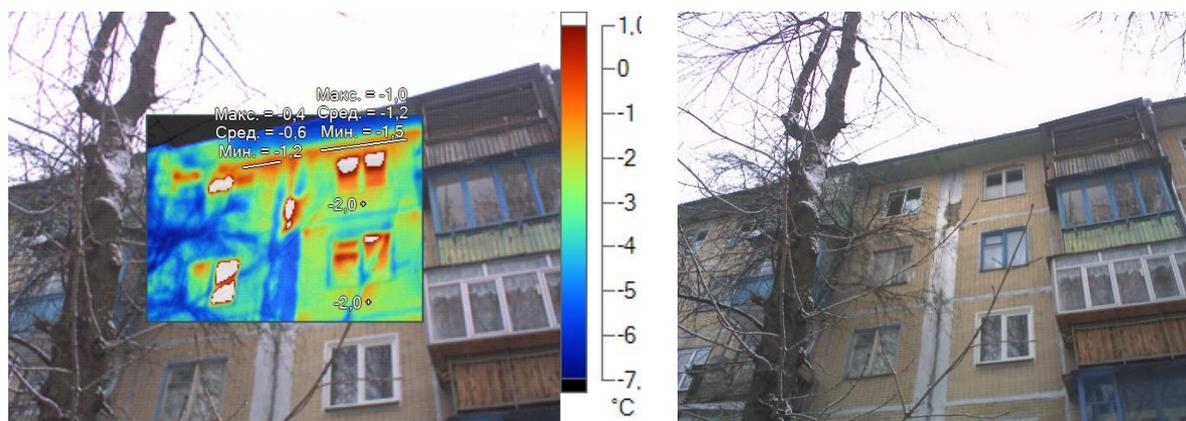
У будинку передбачене водяне опалення, гаряче водопостачання, підключення до системи централізованого теплопостачання. Система опалення – однотрубна вертикальна з нижнім розведенням [137].

На підставі виконаного обстеження встановлено, що огорожувальна конструкція будинків має не тільки малі значення опору теплопередаванню, але і значно менші ніж потрібні за сучасними нормами теплоізоляції [137]. Крім того, виявлено ряд характерних дефектів, а саме:

- часткове руйнування стиків стінових панелей та істотна інфільтрація повітря крізь них;
- суттєва термічна неоднорідність стінових панелей;
- наявність погано ізольованих конструкційних містків холоду;
- недостатнє утеплення горищного перекриття;
- значні тепловтрати в зоні встановлення опалювальних радіаторів.

Далі представлено фотографії та характерні термограми огорожувальної конструкції будинку, на яких маркерами у вигляді ліній і точок вказано зони з більш високою температурою в порівнянні з усією стіною. Дані зони є місцями теплових втрат, що вимагають особливої уваги. Також точковим маркером показано зону з нормальною температурою поверхні [137].

На термограмі, представлений на рисунку 6.12, є ділянка, яка свідчить про розгерметизацію стику панелей, а також маркерами відмічено зони високих тепловтрат перекриттів останнього поверху будинку.

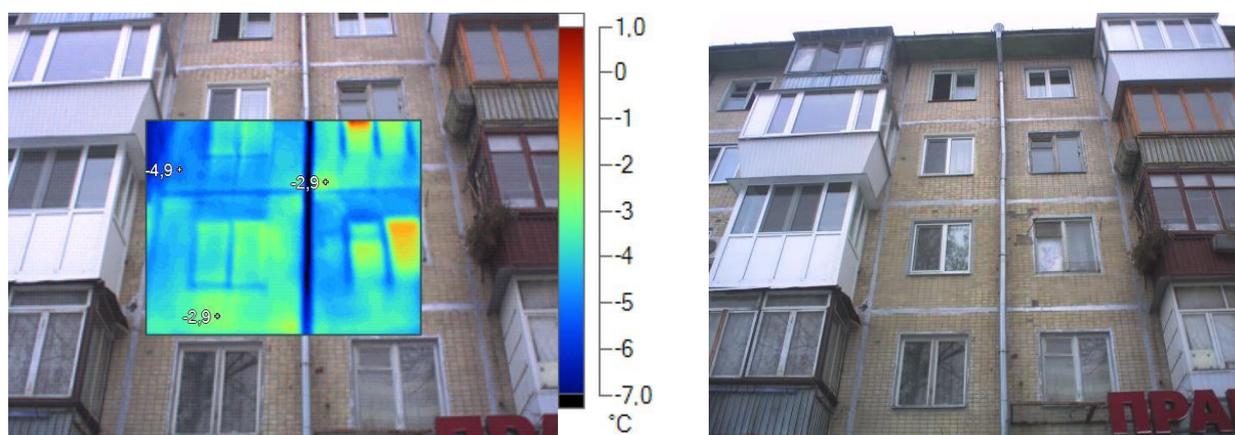


а

б

Рисунок 6.12 – Термограма (а) та фотографія (б) розгерметизації стику панелей огороджувальної конструкції [137].

На термограмі, представлений на рисунку 6.13, маркерами показано зони стику плит на стіні, а також місця тепловтрат у зоні розташування опалювальних приладів.



а

б

Рисунок 6.13 – Термограма (а) та фотографія (б) зони стику плит огороджувальної конструкції [137].

На рисунках 6.14 і 6.15 наведено приклади, на яких точковими маркерами позначено зони з більш високою температурою, що може бути спричинено порушенням конструкції огороджувальної конструкції.

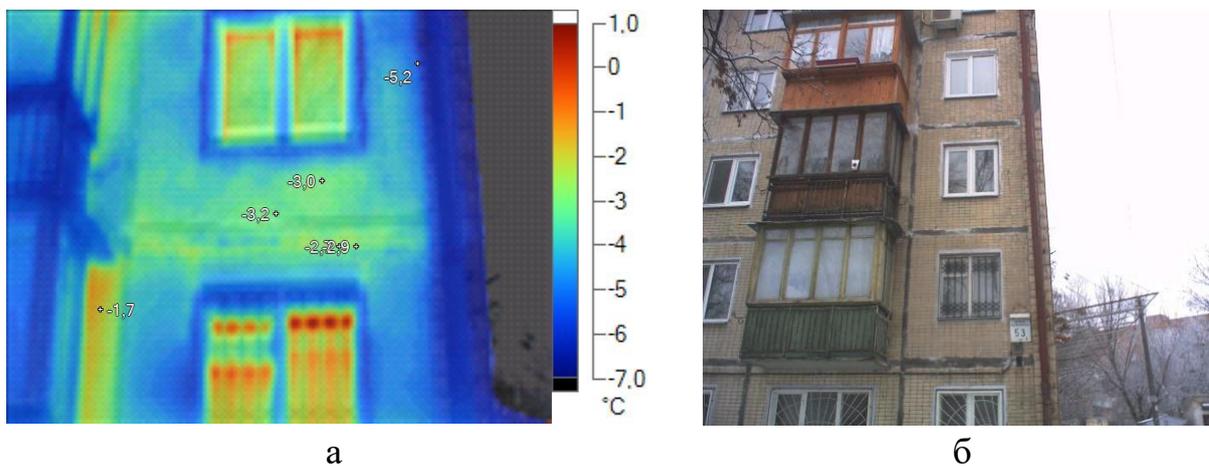


Рисунок 6.14 – Термограма (а) та фотографія (б) зон з підвищеними тепловтратами огорожувальної конструкції [137].

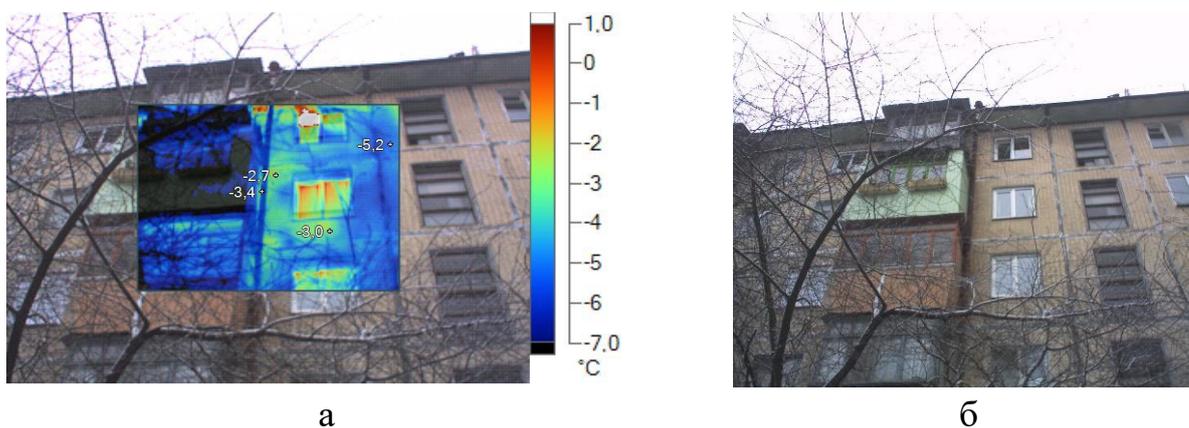


Рисунок 6.15 – Термограма (а) та фотографія (б) зон з підвищеними тепловтратами огорожувальної конструкції [137].

На рисунках 6.16 та 6.17 показано термограми входів у під'їзди будинку та відзначені зони великих тепловтрат.

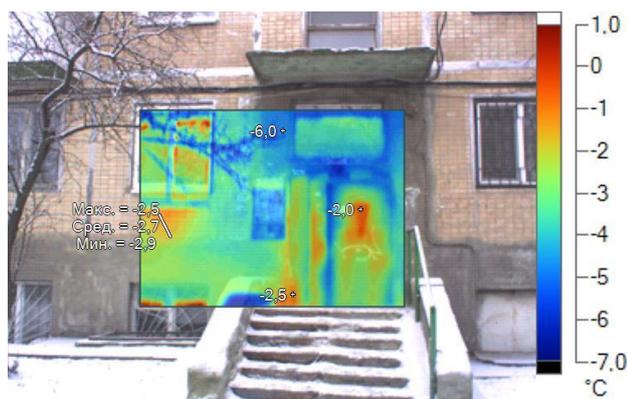


Рисунок 6.16 – Термограма зони входу в під'їзд [137].

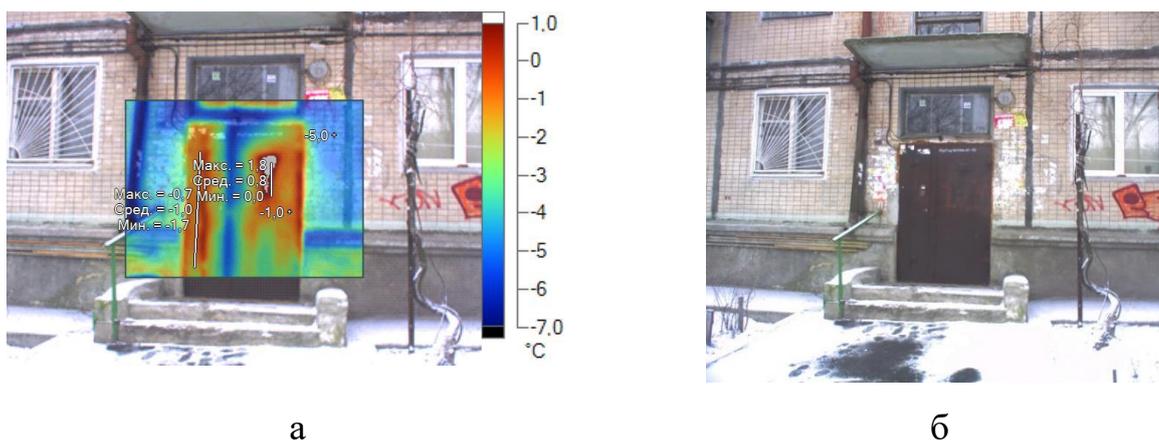


Рисунок 6.17 – Зона входу в під'їзд: а – термограма, б – фотографія [137].

Визначено значення опору теплопередаванню різнотипних огорожувальних конструкцій будинку та визначено трансмісійний коефіцієнт теплопередавання, обчислено також інфільтраційний і загальний коефіцієнти теплопередавання будівлі та її енергетичні характеристики. Оскільки обстеження будівлі проведено у зв'язку із запланованою термомодернізацією, виконані також розрахунки теплотехнічних та енергетичних характеристик будівлі [14, 108].

Результати визначення геометричних та теплотехнічних показників огорожувальної конструкції наведені в таблиці 6.10, а результати розрахунків енергетичних характеристик будівлі наведені у таблиці 6.11.

Таблиця 6.10 – Геометричні та теплотехнічні показники елементів конструкції 5-ти поверхової будівлі для фактичного стану та для 4 варіантів утеплення [137].

Назва елемента будівлі	Площа елементів, м ²	Фактичний стан ($R_{ФАК}$)
Зовнішні стіни	2717	0,81
Вікна та балконні двері	806,5	0,3
Дахове перекриття	1164	0,8
Підвал:	202	0,81
– зовнішні стіни	1164	0,35
– цокольне перекриття	1680	4,7

Таблиця 6.11 – Енергетичні показники 5-ти поверхової будівлі для фактичного стану та різних варіантів утеплення [137].

Назва енергетичного показника	Фактичний стан
Приведений трансмісійний коефіцієнт теплопередавання оболонки будинку K_{PR} , Вт/(м ² ·К)	1,89
Коефіцієнт теплопередавання оболонки будинку шляхом інфільтрації та вентиляції K_{IHF} , Вт/(м ² ·К)	0,86
Загальний коефіцієнт теплопередавання будинку $K_{БУД}$, Вт/(м ² ·К)	2,75
Розрахункові річні витрати теплової енергії $Q_{РІЧ}$, кВт·год	1501590
ГДж	5406
Гкал	1291
Розрахункове значення питомих тепловитрат на опалення $q_{БУД}$, кВт·год/м ²	263,4
Відносна різниця розрахункового значення питомих тепловитрат на опалення від максимально допустимого $100 \cdot (q_{БУД} - E_{max}^*) / E_{max} \%$	196 %
Клас енергетичної ефективності	F
*) ($E_{max} = 89$ кВт·год/м ²)	

6.3. Експериментальні дослідження терморадіаційних характеристик покриттів та матеріалів для віконних конструкцій.

Енергозберігаюче віконне скло повинне, з одного боку, мати високий коефіцієнт пропускання у видимій частині спектру, а з іншого боку, мати мінімальне значення 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. Для проведення досліджень використано калориметричну методику визначення коефіцієнта емісії енергозберігаючого скла та покриттів, яка реалізована в системі «Інформаційно-вимірювальна система теплофізичних характеристик матеріалів та виробів» [119], а також методами наведеними в публікаціях [51, 58, 152, 153], та приладом для експрес контролю коефіцієнту емісії [130].

Калориметрична методика, передбачає, що два однакові зразки скла або матеріалу з покриттям збирають у пакет, який має прошарок повітря відомої товщини між двома досліджуваними поверхнями (рис 6.20).

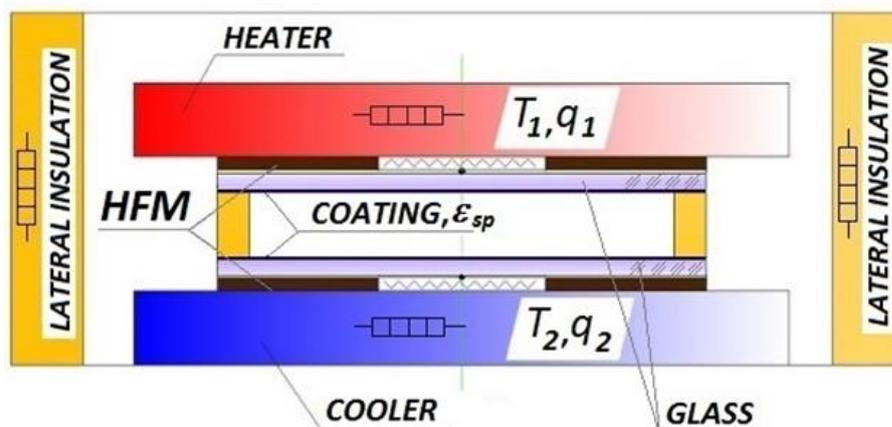


Рисунок 6.20 – Схема калориметричної методики визначення коефіцієнта емісії енергозберігаючого скла та покриттів [119]

Цей пакет розміщують у вимірювальній комірці системи та визначають його тепловий опір за формулою (6.1):

$$R = \Delta T / \bar{q} \quad (6.1)$$

На підставі отриманих результатів розрахунковим шляхом (формули 6.2 та 6.3) визначають коефіцієнт емісії покриття [119]:

$$R_{rad} = \frac{1}{R-2R_{gl}} - R_{air} \quad (6.2)$$

$$\varepsilon_{sp} = R_{rad}/4\sigma\bar{T}^3 \quad (6.3)$$

Проведено дослідження терморадіаційних характеристик матеріалів, з використанням наведених методів та приладів, результати яких наведені у таблиці 6.12.

Таблиця 6.12 – Результати вимірювань терморадіаційних характеристик матеріалів для віконних конструкцій

Матеріал	Коефіцієнт емісії ε (прилад для експрес контролю коефіцієнту емісії)	Коефіцієнт емісії ε (калориметричний метод)
Скло віконне	0,90	0,89
Скло матове	0,93	0,92
k - скло	0,23	0,22
i - скло	0,11	0,10
Плівка “Solis-85”	0,38	0,37
Плівка “Solar-guard 35”	0,31	0,30
Плівка “Solar-guard 50”	0,35	0,33
Плівка “Heat mirror 77”	0,071	0,069
Плівка “HPR”	0,045	0,043

Виходячи з отриманих результатів встановлено, що відхилення між двома методами не перевищує 0,02 одиниці.

Додатково були проведені дослідження з порівняння результатів пірометричним методом та приладом для експрес контролю коефіцієнту емісії

Зразок алюмініду титану у вигляді пластини, товщиною 0,9 мм, має дві сторони з різними терморадіаційними властивостями. Одна зі сторін зразка має темно-сірий колір, а інша – світло-сірий. Для кожної сторони зразка

вимірювався полусферичний коефіцієнт емісії ϵ за температури зразка $30 \pm 1^\circ\text{C}$ приладом для експрес контролю коефіцієнту емісії [130] та пірометричним способом за температури зразка від 70 до 250°C [51, 58, 152, 153].

Результати вимірювань напівсферичного коефіцієнту емісії для двох сторін зразка алюмініду титану, а також для поверхонь зразків з відомими характеристиками представлено на рисунку 6.21.

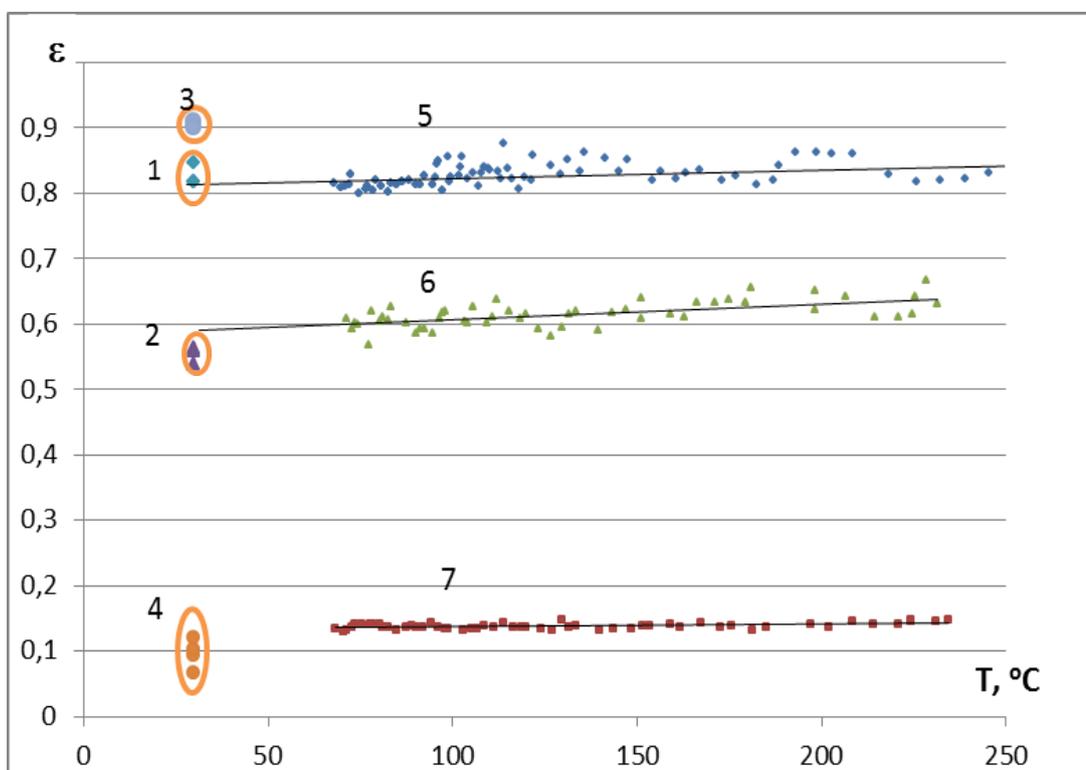


Рисунок 6.21 – Результати вимірювань напівсферичного коефіцієнту емісії: з використанням приладу для експрес контролю коефіцієнту емісії за температури 30°C , де 1 – темна сторона зразка Al-Ti, 2 – світла сторона зразка Al-Ti, 3 – Oracal 641, 4 – алюмінієва фольга; з використанням пірометричного методу у діапазоні $70 \dots 250^\circ\text{C}$, де 5 – темна сторона зразка Al-Ti, 6 – світла сторона зразка Al-Ti, 7 – шліфувана поверхня нержавіючої сталі [152, 153]

Значення коефіцієнту емісії для наданого зразка алюмініду титану (Al-Ti) різні для двох сторін зразка: для темно-сірої сторони – $0,81$, для світло-сірої сторони – $0,56$ за температури 30°C . При збільшенні температури зразка значення коефіцієнту емісії поступово збільшується [152, 153]:

- апроксимаційна залежність для темно-сірої сторони:

$$\varepsilon = 1,281E-04 \times t + 0,81;$$

- апроксимаційна залежність для світло-сірої сторони:

$$\varepsilon = 2,452E-04 \times t + 0,58;$$

де t – температура зразка, °C ($70^\circ\text{C} < t < 250^\circ\text{C}$).

Порівняння отриманих результатів зі значеннями коефіцієнту емісії зразків з відомими характеристиками підтверджує достовірність застосованих методів та результатів вимірювань [51, 58, 152, 153].

6.5 Висновки до розділу

Для перевірки отриманих результатів були проведені дослідження метрологічних характеристик багатоканальної системи контролю теплового опору огорожувальних конструкцій на обладнанні лабораторії ДП «Укрметртестстандарт». У результаті порівняльних випробувань встановлено, що абсолютна похибка вимірювання температури не перевищувала $\pm 0,5^\circ\text{C}$, а максимальна абсолютна похибка вимірювання густини теплового потоку становила $\pm 0,75 \text{ Вт/м}^2$. Отримані результати дозволяють рекомендувати біметалічні сенсори теплового потоку як чутливий елемент системи визначення теплового опору огорожувальних конструкцій натурним методом. Однак під час порівняння розрахункових і вимірних значень відповідно до ISO 9869 хороший збіг знайдено лише для системи заскління (різниця між розрахунковим значенням і вимірюванням становила 1,3%). Для непрозорої частини (рами) різниця між розрахунковим значенням і виміром становила 11,7%, а для непрозорої частини (стулки) дорівнювала 19,1%, що знаходиться на межі допустимої різниці. Цей факт можна пояснити наявністю конвективних потоків повітря в стулці, які впливають на вимірювання R- або U-величини, але не були враховані при розрахунку теоретичного значення теплового опору.

Проведено апробацію методики, яка базується на поєднанні тепловізійного зображення температури поверхні для якісного аналізу та кількісних контактних вимірювань температури поверхні та теплового потоку.

Переваги даної методики:

- зменшення впливу суб'єктивного фактору на процес контролю;
- здатність виявляти локальні дефекти теплоізоляції;
- здійснення контролю теплового опору теплозахисної оболонки будівель, які мають складну конструкцію.

На прикладі шістнадцятиповерхового житлового будинку показано, що модульна побудова системи дає можливість здійснювати контроль теплозахисної оболонки будівлі, яка має складну конструкцію.

Експериментально досліджено терморадіаційні характеристики перспективного матеріалу алюмініду титану різних видів скла та покриттів.

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 методику 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.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ Б В.2.6-101:2010 Конструкції будинків і споруд. Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій. Київ Мінрегіонбуд України. 2010. 90с.
2. ДСТУ Б В.2.2-39:2016 Методи та етапи проведення енергетичного аудиту будівель Київ Мінрегіон України 2016. 50 с.
3. Маляренко В.А. Основи теплофізики будівель та енергозбереження. Харків: «САГА», 2006. 484 с.
4. Фаренюк Г.Г. Основи забезпечення енергоефективності будинків та теплової надійності огорожувальних конструкцій. К.: Гама-Принт. 2009. 216 с.
5. ДСТУ 9190:2022 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. К. ДП «УкрНДНЦ», 2022.156с.
6. Методика визначення енергетичної ефективності будівель. Затверджена Наказом Наказом Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури № 486 від 11.06.2023.
7. ДСТУ 4035-2001 Енергозбереження. Будівлі та споруди. Методи вимірювання поверхневої густини теплових потоків та визначення коефіцієнтів теплообміну між огорожувальними конструкціями. Київ. ДЕРЖСТАНДАРТ УКРАЇНИ. 2001. 61с.
8. ДСТУ Б В.2.6-17-2000 Конструкції будинків і споруд. Блоки віконні та дверні. Методи визначення опору теплопередачі. Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України. 28 с.
9. ДСТУ Б В.2.6-20-2000 Блоки віконні та дверні. Метод визначення загального коефіцієнту пропускання світла. Державний комітет будівництва, архітектури і житлової політики України. 14с.

10. ДСТУ Б В.2.7-40-95 Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності циліндричним зондом. 16с.
11. ДСТУ Б В.2.7-41-95 Будівельні матеріали. Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності поверхневим перетворювачем. 15с.
12. ДСТУ БВ.2.7-105-2000 Будівельні матеріали. Матеріали і вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності і термічного опору при стаціонарному тепловому режимі. 25с.
13. Фаренюк, Є., & Фаренюк, Г. (2023). Методичні основи нового покоління будівельних норм з енергоефективності будівель. *Наука та будівництво*, 33(3-4). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-34-2022-2>
14. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Видання офіційне. Київ. Мінірегіон України. 2022. 27 с.
15. Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A32002L0091>
16. ДСТУ ISO 8301:2006 Теплоізоляція. Визначення теплового опору та пов'язаних з ним властивостей в детальному режимі. Прилад із вимірювачем теплового потоку (ISO 8301:1991, IDI).
17. ДСТУ ISO 8302:2008 Теплоізоляція. Визначення теплового опору та пов'язаних із ним характеристик в усталеному режимі. Прилад із захищеної гарячою пластиною (ISO 8302:1994, IDT).
18. ДСТУ ISO 9869:2006 Теплоізоляція. Будівельні елементи. Натурні вимірювання теплового опору та коефіцієнта теплопередавання (ISO 9869:1994, IDT).
19. ДСТУ ISO 6946:2007 Будівельні конструкції та елементи. Тепловий опір і коефіцієнт теплопередавання. Методика обчислення (ISO 6946:1996, IDT).

20. ДСТУ ISO 10051:2006 Теплоізоляція. Вплив вологи на теплообмін. Визначення коефіцієнт теплової проникності вологого матеріалу. (ISO 10051:1996, IDT)
21. ДСТУ ISO 14683:2007 Теплопровідні включення в будівельних конструкціях. Лінійний коефіцієнт теплопередавання. Спрощені методики обчислення та стандартні значення (ISO 14683:1999, IDT)
22. ДСТУ ISO 10211-1:2005 Теплопровідні включення в будівельних конструкціях. Обчислення теплового потоку й поверхневої температури. Частина 1. Загальні методи. (ISO 10211-1:1995, IDT).
23. ДСТУ ISO 10211-2:2005 Теплопровідні включення в будівельних конструкціях. Обчислення теплового потоку і поверхневої температури. Частина 2. Лінійні теплопровідні включення (ISO 10211-2:1995, IDT).
24. ДСТУ ISO 10291:2009 Скло будівельне. Визначення в усталеному режимі U - характеристик (теплопровідності) багат шарового скла. Метод із використанням захищеної гарячої пластини (ISO 10291:1994, IDT).
25. ДСТУ EN 673:2009 Скло будівельне. Визначення в усталеному режимі U – характеристик (теплопровідності) багат шарового скла. Метод обчислення (Pr EN 673:1997, IDT).
26. ASTM C1363-19 Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus. URL: <https://www.astm.org/c1363-19.html>
27. Bertil Jonsson Transmittance Measurements of Windows by Hot Box Method. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962065/FULLTEXT01.pdf>
28. ДСТУ Б EN 13187:2011 ТЕПЛОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ БУДІВЕЛЬ Якісне виявлення теплових відмов в огорожувальних конструкціях Інфрачервоний метод (EN 13187:1998, IDT). Київ Мінрегіон України 2012. 37с.
29. ISO 6781-2023 Thermal insulation – Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes – Infrared method

30. Декуша Л. В. Многослойные гальванические преобразователи теплового потока / Л. В. Декуша, Т. Г. Грищенко, Л. И. Воробьев // Міжвідомчий наук.-техн. збірник : Вимірювальна техніка та метрологія. – Вип. 64. – Львів : «Львівська політехніка», 2003. – С. 48-52. – ISSN 0368- 6418.
31. Matthew Fox, David Coley, Steve Goodhew, Pieter de Wilde. Thermography methodologies for detecting energy related building defects. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 40. 2014. Pages 296-310. ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.188>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114006406>
32. Angeliki Kylili, Paris A. Fokaides, Petros Christou, Soteris A. Kalogirou. Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review, Applied Energy. Volume 134. 2014. Pages 531-549. ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.005>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914008083>
33. Paris A. Fokaides, Soteris A. Kalogirou. Application of infrared thermography for the determination of the overall heat transfer coefficient (U-Value) in building envelopes. Applied Energy. Volume 88. Issue 12. 2011. Pages 4358-4365. ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.05.014>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261911003059>
34. B. Lehmann, K. Ghazi Wakili, Th. Frank, B. Vera Collado, Ch. Tanner. Effects of individual climatic parameters on the infrared thermography of buildings. Applied Energy. Volume 110. 2013. Pages 29-43. ISSN 0306-2619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.066>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913002626>
35. Francesco Asdrubali, Giorgio Baldinelli, Francesco Bianchi. A quantitative methodology to evaluate thermal bridges in buildings. Applied Energy. Volume 97. 2012. Pages 365-373. ISSN 0306-2619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.054>.

36. Małgorzata O'Grady, Agnieszka A. Lechowska, Annette M. Harte. Infrared thermography technique as an in-situ method of assessing heat loss through thermal bridging. *Energy and Buildings*. Volume 135. 2017. Pages 20-32, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.039>. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816315882>

37. ДСТУ 3756-98 Енергозбереження. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови

38. Elena Lucchi Thermal transmittance of historical brick masonries: A comparison among standard data, analytical calculation procedures, and in situ heat flow meter measurements. *Energy and Buildings*. Volume 134. 2017. Pages 171-184. ISSN 0378-7788. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.045>. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881631338X>

39. Giuseppe Desogus, Salvatore Mura, Roberto Ricciu. Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance. *Energy and Buildings*. Volume 43. Issue 10. 2011. Pages 2613-2620. ISSN 0378-7788. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.025>. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811002398>

40. Xi Meng, Biao Yan, Yanna Gao, Jun Wang, Wei Zhang, Enshen . Factors affecting the in situ measurement accuracy of the wall heat transfer coefficient using the heat flow meter method. *Energy and Buildings*. Volume 86. 2015. Pages 754-765. ISSN 0378-7788. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.005>. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881400930X>

41. Katia Gaspar, Miquel Casals, Marta Gangoells. A comparison of standardized calculation methods for in situ measurements of façades U-value. *Energy and Buildings*. Volume 130. 2016. Pages 592-599. ISSN 0378-7788. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.072>. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778816307824>

42. Iole Nardi, Stefano Perilli, Tullio de Rubeis, Stefano Sfarra, Dario Ambrosini. Influence of insulation defects on the thermal performance of walls. An experimental and numerical investigation. *Journal of Building Engineering*. Volume

21. 2019. Pages 355-365. ISSN 2352-7102.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.029>. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710218306272>

43. Yingying Yang, Zhoulin Chen, Tingting Vogt Wu, Alain Sempey, Jean-Christophe Batsale. In situ methodology for thermal performance evaluation of building wall: A review. International Journal of Thermal Sciences. Volume 181. 2022. 107687. ISSN 1290-0729.

<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107687>. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S129007292200223X>

44. Yasser El Masri, Tarek Rakha A scoping review of non-destructive testing (NDT) techniques in building performance diagnostic inspections. Construction and Building Materials. Volume 265. 2020. 120542. ISSN 0950-0618.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120542>. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061820325472>

45. Fenghao Wang, Dongyang Wang, Xinke Wang, Jianbo Yao A data analysis method for detecting wall thermal resistance considering wind velocity in situ. Energy and Buildings. Volume 42. Issue 10. 2010. Pages 1647-1653. ISSN 0378-7788 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.04.007>. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778810001362>

46. CITB Construction Industry Training Board; English Heritage; Stba Sustainable Traditional Buildings Alliance. Performance and Energy Efficiency of Traditional Buildings. 2012. Available online: [http://www.sdfoundation.org.uk/downloads/STBA-Gap-Analysis-Study-Performance-and-Energy-Efficiency-of-Traditional-Buildings-Final-Version-\(2\).pdf](http://www.sdfoundation.org.uk/downloads/STBA-Gap-Analysis-Study-Performance-and-Energy-Efficiency-of-Traditional-Buildings-Final-Version-(2).pdf)

47. Разработка в интересах теплосбережения элементной базы теплотетрии, включая новые типы первичных преобразователей и теплотетрических устройств и средства их метрологического обеспечения / Отчет о НИР, N ГР UA01013901P. Киев: ИПЭ НАН Украины, 1993. 168 с.

48. Декуша О. Прибор для экспресс-измерения коэффициента теплопроводности строительных материалов // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. Киев, 2004. Т. 26, № 6 С. 212-216. ISSN 0204-3602.

49. Serhiienko R. Methods of Quality Control of Energy Efficient Characteristics of Biofuels and its Combustion / R. Serhiienko, S. Ivanov, A. Zaporozhets // International Journal “NDT Days”. 2018. Vol. 1. №2. P. 222-227.

50. Приборы для теплофизических измерений: Каталог [Электронный ресурс]. Киев : ИТТФ НАН Украины, 19 февр. 2016 г. URL: http://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2016/02/catalog_priborov_sensorov.pdf

51. Грищенко Т. Г., Декуша Л. В., Воробьев Л. И. и др. ТЕПЛОМЕТРИЯ: теория, метрология, практика: книга 1. Методы и средства измерения теплового потока. Киев: Ин-т технической теплофизики НАН Украины, 2017. 439 с.

52. Декуша Л. В. Средства теплотетрии на базе термоэлектрических преобразователей теплового потока: дис. ... докт. техн. наук: 05.11.04 / ИТТФ НАН Украины. Киев, 2015. 497 с.

53. Бурова З. А., Декуша О. Л. Теплотетричні прилади для контролю якості теплоізоляційних матеріалів. Научный взгляд в будущее. 2016. Вып. 4, Т. 9. С. 83–86. DOI: 10.21893/2415-7538-2016-04-9-194.

54. Воробйов Л. Й. Методи та засоби квазидиференціальної калориметрії. Метрологія та прилади. Харків, 2018. № 1. С. 17–25.

55. Воробьев Л. И., Декуша Л. В., Назаренко О. А., Грищенко Т. Г. Применение метода квазидиференциальной калориметрии при реализации прибора для измерения теплоты сгорания. Промышленная теплотехника. 2017. Т. 39. № 1. С. 71–75. DOI: <https://doi.org/10.31472/ihe.1.2017.11>.

56. Басок Б. І., Воробйов Л. Й., Гончарук С. М., Декуша Л. В., Чорна Н. О. Прилад для дослідження надходження сонячної енергії на похилий геліоколектор. Промышленная теплотехника. Киев, 2013. Т. 35, № 5. С. 78–87.

57. Ковтун С. І., Іванов С. О., Декуша Л. В., Декуша О. Л., Воробйов Л. Й. Засоби вимірювання радіаційного теплообміну та інсоляції. WORLD

SCIENCE. 2018. Vol. 5. № 7 (35). С. 31–38.
DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/12072018/6038

58. Теплометрия: теория, метрология, практика. Кн. 3
Теплометрическая аппаратура для решения прикладных задач. : в 2 томах. Том 1 Монография / Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша, Л.И. Воробьев, З.А. Бурова, С.І. Ковтун, О.Л. Декуша; под ред. Т.Г. Грищенко). – К.: Ін-т технічної теплофізики НАН України, 2018. - 432 с.

59. Blanca Tejedor, Miquel Casals, Marta Gangolells, Xavier Roca
Quantitative internal infrared thermography for determining in-situ thermal behaviour of façades.

Energy and Buildings. Volume 151. 2017. Pages 187-197. ISSN 0378-7788
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.040>. URL:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817301305>

60. David Bienvenido-Huertas, Javier Bermúdez, Juan J. Moyano, David Marín
Influence of ICHTC correlations on the thermal characterization of façades using the quantitative internal infrared thermography method. Building and Environment. Volume 149. 2019. Pages 512-525/ ISSN 0360-1323.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.056>.

URL:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132318308114>

61. ТОВ "Альтавір" - Кліматичні камери Прилади КВП, лабораторне, електровимірювальне обладнання <https://altavir.uaprom.net/ua/g3951975-klimaticheskie-kamery>

62. Декуша Л.В., Воробьев Л.И., Грищенко Т.Г. и др.
Компьютеризированный испытательно-измерительный комплекс для определения термического сопротивления стеклопакетов (Комп'ютеризований випробувально-вимірювальний комплекс для визначення теплового опору склопакетів)// Пром. теплотехніка 2003. Т. 25. №2.– С. 67-73.

63. ДСТУ-Н Б В.1.2-18:2016 Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінки їх технічного стану. Київ. ДП «УкрНДНЦ». 2017. 47 с.
64. Практичний посібник з енергетичного аудиту промислових підприємств. Київ. Проект «Консультавання підприємств щодо енергоефективності». 141 с. URL: https://sae.gov.ua/sites/default/files/2021_04_02_Practical_Energy_Audit_Guide_book.pdf
65. ДСТУ 3170-95 Пірометри. Загальні технічні вимоги (ДСТУ 3170-95 Пірометри. Загальні технічні вимоги
66. Ketui Daniel, Chi Feng, Shan Gao, Application of multispectral radiation thermometry in temperature measurement of thermal barrier coated surfaces, Measurement, Volume 92, 2016, Pages 218-223, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.06.023>.
67. Richard Slávik, Miroslav Čekon, Study of Surface Temperature Monitoring in the Field of Buildings, Procedia Engineering, Volume 161, 2016, Pages 1135-1143, ISSN 1877-7058, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.526>.
68. Fluke TiX580 Infrared Camera [Електронний ресурс]: <https://www.fluke.com/en-gb/product/thermal-imaging-cameras/tix580>
69. TRSYS20 thermal resistance measuring system [Електронний ресурс]: <https://www.hukseflux.com/products/heat-flux-sensors/heat-flux-measuring-systems/trsys20-thermal-resistance-measuring-system>
70. FluxDAQ [Електронний ресурс]: FluxTeq. URL: <http://www.fluxteq.com/heat-flux-thermocouple-data-logger>
71. UVAL Wired System [Електронний ресурс]: <https://shop.greenteg.com/u-value/>
72. Zhang, L., & Chen, R. TiO₂-Siloxane Thermal Control Coatings for Protection of Spacecraft Polymers. Chinese Journal of Aeronautics, vol.17, is. 1, pp. 53-59, 2004. doi:10.1016/S1000-9361(11)60203-3

73. Finckenor, M., & Dooling, D. NASA/TP-1999-209263. Multilayer Insulation. Material Guidelines. Alabama: Marshall Space Flight Center 1999. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19990047691.pdf>
74. Gilmore, D. Spacecraft Thermal Control Handbook. The Aerospace Press. 836p., 2002. Retrieved from: <https://www.amazon.com/Spacecraft-Thermal-Control-Handbook-Technologies/dp/188498911X#reader>
75. Freeland, R., Bilyeu G., & Veal G. Development of flight hardware for a large, inflatable-deployable antenna experiment. Acta Astronautica. vol .38. is. 4 - 8. pp. 251-260, 1996. Retrieved from: [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(96\)00030-6](https://doi.org/10.1016/0094-5765(96)00030-6)
76. Dinzhos, R., Fialko N., Lysenkov E. Features of thermal conductivity of composites based on thermoplastic polymers and aluminum particles, Journal of nano-and electronic physics. vol.7 No 3, 03022 pp. 5, 2015.
77. Zaporozhets, A., Artemchuk, V. Prospects for the development of energy in the world and ukraine: A novel view Studies in Systems, Decision and Control, 2021, 346, pp. v–xviii
78. ASTM E408-13 Standard Test Methods for Total Normal Emittance of Surfaces Using Inspection-Meter Techniques.
79. Dekusha, O., Kovtun, S., Burova, Z. Overview of materials and coatings emission coefficient control methods. System Research in Energy, 2(71) 53-63. 2022 <https://doi.org/10.15407/srenergy2022.02.053> ISSN 2786-7102.
80. Nelson, K. E., Leudke, E. E., and Bevans, J. T. A device for the rapid measurement of total emittance, Journal of Spacecraft and Rockets, Vol 3, No. 5, 1966, p. 758. <https://doi.org/10.2514/3.25051>
81. Gaumer, R. E., Hohnstreiter, G. F., and Vanderschmidt, G. F., Measurement of Thermal Radiation Properties of Solids, NASA SP-31, 1963, p. 117.
82. Nicodemus, F., Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface, Applied Optics, Vol. 4, No. 7, July 1965.

83. Brandenberg, W. M., Focusing Properties of Hemispherical and Ellipsoidal Mirror Reflectometer, General Dynamics Astronautics Report, Number DGA63-1111, ERR-AN-352, November 1963.
84. Neu, J. T., Dummer, R. S and Myers, O. E., Hemispherical Directional Ellipsoidal Infrared Spectro Reflectometer , Proc. SPIE 0807, Passive Infrared Systems and Technology, 165, September 10, 1987, <http://dx.doi.org/10.1117/12.941453>.
85. ISO 9050:2003 Glass in building. Determination of light transmittance, solar direct transmittance, total solar energy transmittance, ultraviolet transmittance and related glazing factors.
86. ASTM C835 – 06 Standard Test Method for Total Hemispherical Emittance of Surfaces up to 1400°C.
87. Energy Control Products Projects 3M-SCS-2200 Experimental Solar Absorber Coating; St. Paul, MN 55144
88. PTI PT 404A Hi-Heat Coating (1100°C), Product Techniques, Inc., 1153 N. Stanford Avenue, Los Angeles, CA.
89. ASTM Subcommittee E20.04, Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurements, MNL 12.
90. Burns, G.W., Scroger, M. G., Strouse, G. F., Croarkin, M. C., Guthrie, W. F., Temperature-Electromotive Force Reference Function and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90, NIST Monograph 175.
91. Richmond, J. C., and Harrison, W. N., Equipment and Procedures for Evaluation of Total Hemispherical Emittance, American Ceramic Society Bulletin, Vol 39, No. 11, Nov. 5, 1960.
92. Askwyth, W. H., et al., Interim Final Report, Determination of the Emissivity of Materials, Vol 1, available from National Technical Information Service (NTIS), Springfield, VA as CR56-496, 1959.
93. Measurement of Thermal Radiation Properties of Solids, NASA SP-31, available from NTIS as N64-10937, 1963.

94. Wilkes, K.E., Strizak, J.P., Weaver, F.J., Besser, J.E., and Smith, D.L., Thermophysical Properties of Stainless Steel Foils, Thermal Conductivity 24/Thermal Expansion 12, Eds. Peter S. Gaal and Daniela E. Apostolescu, Technomic Publishing Co., Inc., Lancaster PA 17604, 1999 , pp. 460–471.
95. Schenck, H., Jr., Theories of Engineering Experimentation, McGraw-Hill Book Company, New York, NY, 1961, pp. 40–59.
96. ASTM C1371-15 Standard Test Method for Determination of Emittance of Materials Near Room Temperature Using Portable Emissometers.
97. Emissometer Model AE1 .
<http://www.devicesandservices.com/AE1%20Spec%20Sheet.pdf>.
98. Portable Emissometer/Reflectometer TESA 2000.
<http://www.aztechnology.com/optical-instruments-tesa2000.html>
99. ET-100 Thermal Handheld Emissometer.
<https://surfaceoptics.com/products/reflectometers-emissometers/et100-thermal-hand-held-emissometer/>
100. Králík, T., Musilová, V., Hanzelka, P., & Frolec, J. (2016). Method for measurement of emissivity and absorptivity of highly reflective surfaces from 20 K to room temperatures, Metrologia. 53, 743–753. Retrieved from: doi:10.1088/0026-1394/53/2/743
101. Computerized Emissivity Measurement Apparatus [Electronic resource]. – Mode of access: <https://sunlabtech.com/computerized-emissivity-measurement-apparatus/>
102. E. Sassine, Y. Cherif, E. Antczak, Parametric identification of thermophysical properties in masonry walls of buildings, J. Build. Eng. 25, 2019
103. De Wilde, P. The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation. Autom. Constr., 41, 40–49. 2014
104. Peter V. Nielsen Fifty years of CFD for room air distribution Building and Environment Volume 91, Pages 78-90 doi:10.1016/j.buildenv.2015.02.035

105. B. Yang, A.K. Melikov, A. Kabanshi, C. Zhang, F.S. Bauman, G. Cao, H. Awbi, H. Wigö, J. Niu, K.W.D. Cheong, K.W. Tham, M. Sandberg, P.V. Nielsen, R. Kosonen, R. Yao, S. Kato, S.C. Sekhar, S. Schiavon, T. Karimipannah, X. Li, Z. Lin, A review of advanced air distribution methods - theory, practice, limitations and solutions, *Energy and Buildings*, Volume 202, 2019, 109359, ISSN 0378-7788, doi:10.1016/j.enbuild.2019.109359.

106. Meng, X.; Yan, B.; Gao, Y.; Wang, J.; Zhang, W.; Long, E. Factors affecting the in situ measurement accuracy of the wall heat transfer coefficient using the heat flow meter method. *Energy Build.* 2015, 86, pp. 754–765. doi:10.1016/j.enbuild.2014.11.005

107. Evangelisti, L.; Guattari, C.; Asdrubali, F. Comparison between heat-flow meter and Air-Surface Temperature Ratio techniques for assembled panels thermal characterization. *Energy and Buildings*. 2019, Vol. 203, 109441. doi:10.1016/j.enbuild.2019.109441

108. Gaspar, K.; Casals, M.; Gangoellis, M. Review of criteria for determining HFM minimum test duration. *Energy Build.* 2018, 176, 360–370. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.07.049>.

109. Cucumo, M.; Ferraro, V.; Kaliakatsos, D.; Mele, M. On the distortion of thermal flux and of surface temperature induced by heat flux sensors positioned on the inner surface of buildings. *Energy Build.* 2018, 158, pp. 677–683. doi:10.1016/j.enbuild.2017.10.034

110. Evangelisti L, Guattari C, Asdrubali F. Influence of heating systems on thermal transmittance evaluations: simulations, experimental measurements and data postprocessing. *Energy Build*, 2018; 168: 180–90. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.032>

111. Gori, V.; Elwell, C.A. Estimation of thermophysical properties from in-situ measurements in all seasons: quantifying and reducing errors using dynamic grey-box methods. *Energy Build.* 2018, 167, 290–300 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.048>.

112. Soares, N.; Martins, C.; Goncalves, M.; Santos, P.; da Silva, L.S.; Costa, J.J. Laboratory and in-situ non-destructive methods to evaluate the thermal transmittance and behavior of walls, windows, and construction elements with innovative materials: a review. *Energy Build.* 2019, 182, 88–110. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.021>
113. M. Hurnik, M. Blaszcok, Z. Popiolek, Air distribution measurement in a room with a sidewall jet: A 3D benchmark test for CFD validation, *Building and Environment*, Volume 93, Part 2, 2015, doi:10.1016/j.buildenv.2015.07.004.
114. Yang Wang, Fu-Yun Zhao, Jens Kuckelkorn, Di Liu, Jun Liu, Jun-Liang Zhang, Classroom energy efficiency and air environment with displacement natural ventilation in a passive public school building, *Energy and Buildings*, Volume 70, 2014, pp. 258-270, doi:10.1016/j.enbuild.2013.11.071.
115. Babak V., Dekusha O., Kovtun S., Burova Z., Parkhomenko G. Computational Fluid Dynamics Model of the Heat Transfer at Thermal Resistance control of Building envelope CEUR Workshop Proceedings, 3513, pp. 363 - 373, 2023 <https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper30.pdf>
116. Babak, V., Dekusha, O., Kovtun, S., Shcherbak, L., Kobzar, S.. Computer Model of the Building Envelope the Thermophysical Characteristics Determining Process. CEUR Workshop Proceedings, 3628, 236-251 2023 . <https://ceur-ws.org/Vol-3628/paper24.pdf>
117. 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).
118. 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 ISSN 21984182)

119. 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).
120. Ricciu, R., Galatioto, A., Besalduch, L. A., Desogus, G., Di Pilla, L. Building Wall Heat Capacity Measurement Through Flux Sensors. Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems 2019, 7 (1), 44-56. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d6.0234>.
121. Hotra, O.; Kovtun, S.; Dekusha, O. Analysis of the characteristics of bimetallic and semiconductor heat flux sensors for in-situ measurements of envelope element thermal resistance. Measurement. 2021, 182, 109713. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109713>
122. 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).
123. Dekusha, O., Babak, V., Vorobiov, L., Dekusha, L., Kobzar, S. & Ivanov, S. The heat exchange simulation in the device for measuring the emissivity of coatings and material surfaces. IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology “ELNANO-2019”. pp. 301-304, 2019. Retrieved from: DOI: 10.1109/ELNANO.2019.8783537
124. Di Pasquale, Davide Rona, Aldo Garrett, S. A selective review of CFD transition models. 39th AIAA Fluid Dynamics Conference. 2009
125. 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.
126. Грищенко, Т.Г., Декуша, Л.В., Воробйов, Л.Й., Декуша, О.Л., Бурова, З.А., Ковтун, С.І.. 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).

127. 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, 2019 ISBN 978-1-7281-3882-4.

128. Декуша, Л.В., Воробьев, Л.И., Грищенко, Т.Г., Декуша, О.Л., Пархоменко, Г.А. (2008). Особенности проектирования преобразователей теплового потока для исследования нестационарного теплообмена. Промышленная теплотехника. 30(2), 99-104.
<http://dspace.nbuu.gov.ua/handle/123456789/61117>

129. Декуша, О.Л., Иванов, 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/>

130. Воробйов, Л. Й., Декуша, Л. В., Декуша О. Л., Ковтун, С. І., Иванов, С. О.. Диференціальний прилад для вимірювання коефіцієнту емісії поверхні. Український метрологічний журнал, № 3А, 153-159. ISSN (Online) 2522-1345, 2020

131. 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., 2020, ISBN 978-172819713-5
<https://doi.org/10.1109/ELNANO50318.2020.9088837>

132. Minerva Vargas M., Sierra F.Z., E. Ramos E., Avramenko A.A. Steady natural convection in a cylindrical cavity // Int. Comm. Heat Mass Transfer. – 2002. – V.29, No 2, p. 213–221

133. Nunez J., Lopez-Caballero M., Ramos E., Guillermo Hernandez-Cruz G., Vargas M., Sergio Cuevas S. Verification and experimental validation of a numerical simulation of natural convection in a slender cylinder // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2012. V.38. p.118–125
134. Marotta E., Arora S., Sanchez M.A. Natural Convection Within an Elongated Vertical Cylinder: Heat Loss From Bore of Oil Well Christmas Tree // *Journal of Thermal Science and Engineering Applications* . – 2014. – V. 6. – p. 031005-1–8.
135. Методика М000013184.5.023-01 Визначення теплових потоків крізь огорожувальні конструкції // Нормативний документ Державного комітету України з енергозбереження та Державного комітету України з будівництва та архітектури. – Київ: Логос, 2002. – 131 с.
136. 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.
137. Babak, V., Dekusha, O., Dekusha, L., Vorobiov, L., Ivanov, S. System for Monitoring Thermal Resistance of Building Constructions. *International Journal “NDT Days”*, 1(2), 178-185. 2018 ISSN 2603-4018.
138. Zaporozhets, A., Dekusha O., Kovtun, S.. System for monitoring the technical state of heating networks based on UAVs. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, 1080, AISC, 935-950 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_61
139. Babak, V., Dekusha, O., Zaporozhets, A., Vorobiov, L., Kovtun. S. Methods for Diagnosing the Technical Condition of Heating Networks Pipelines. *Studies in Systems, Decision and Control*, 454, 267-277. 2023 DOI: 10.1007/978-3-031-22464-5_15 ISSN: 21984182
140. Бабак В. П., Берегун В. С., Бурова З. А., Воробйов Л. Й. та ін. Апаратно-програмне забезпечення моніторингу об’єктів генерування, транспортування та споживання теплової енергії: монографія / за ред. чл.-кор.

НАН України В. П. Бабака. Київ: Ін-т технічної теплофізики НАН України, 2016. 298 с.

141. Бабак, В.П., Бабак, С.В., Єременко, В.С. (2017). *Теоретичні основи інформаційно-вимірювальних систем: Підручник* (В.П. Бабак, ред.). К.: УН-Т новітніх технологій; НАУ, 496 с.

142. Babak, V.P., Scherbak, L.M., Kuts, Y.V., Zaporozhets, A.O. Information and measurement technologies for solving problems of energy informatics. CEUR Workshop Proceedings, 3039, 2021, pp. 24–31. <http://ceur-ws.org/Vol-3039/short20.pdf>

143. Babak, V., Dekusha, O., Kovtun, S., Ivanov, S. Information-measuring system for monitoring thermal resistance. *CEUR Workshop Proceedings*, 2387, 102-110. 2019 <https://ceur-ws.org/Vol-2387/20190102.pdf> ISSN 16130073.

144. 8-channel Analog Input Module using the DCON Protocol. [Електронний ресурс]: https://www.icpdas.com/schp/schp/detail.php?module_no=I-7018

145. 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-Białej, 3(05) 47-58.

146. Babak, V., Kovtun, S., Dekusha, O.. Information-measuring technologies in the metrological support of heat flux measurements. *CEUR Workshop Proceedings*, 2608, 379-393. 2020 <https://ceur-ws.org/Vol-2608/paper29.pdf> ISSN 16130073

147. 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>

148. Peltier Module TES1-12703. Available online: <https://www.electron.com/media/783/datasheet-000-044.pdf?&key=ZGpmIyQwNUZfNzgz>

149. Heat flux sensors PU SERIES. Available online: <http://www.muroz.co.jp/wp-content/uploads/2015/05/PUseries.pdf>

150. Hotra, O., Kovtun, S., Dekusha, O., Grądz, Ż., Babak, V., Styczeń, J.. Analysis of Low-Density Heat Flux Data by the Wavelet Method. *Energies*, 16 (1), 430. 2023 <https://doi.org/10.3390/en16010430>

151. Hotra, O., Kovtun, S., Dekusha, O., Grądz, Ż. Prospects for the Application of Wavelet Analysis to the Results of Thermal Conductivity Express Control of Thermal Insulation Materials. *Energies*, 14(17), 5223, 2021 <https://doi.org/10.3390/en14175223>

152. Бабак, В., Воробйов, Л., Декуша, Л., Волков, В., Бурова, З., Декуша, О., Ковтун, С. (2018). Вимірювання терморадіаційних характеристик спектрально-селективних матеріалів для космічних конструкцій. *Траекторія Науки*, 4(6), 1009-1019. doi: 10.22178/pos.35-2. ISSN 2413-9009.

153. Ковтун, С.И., Воробъёв, 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 ISSN 2413-1032

ДОДАТОК А

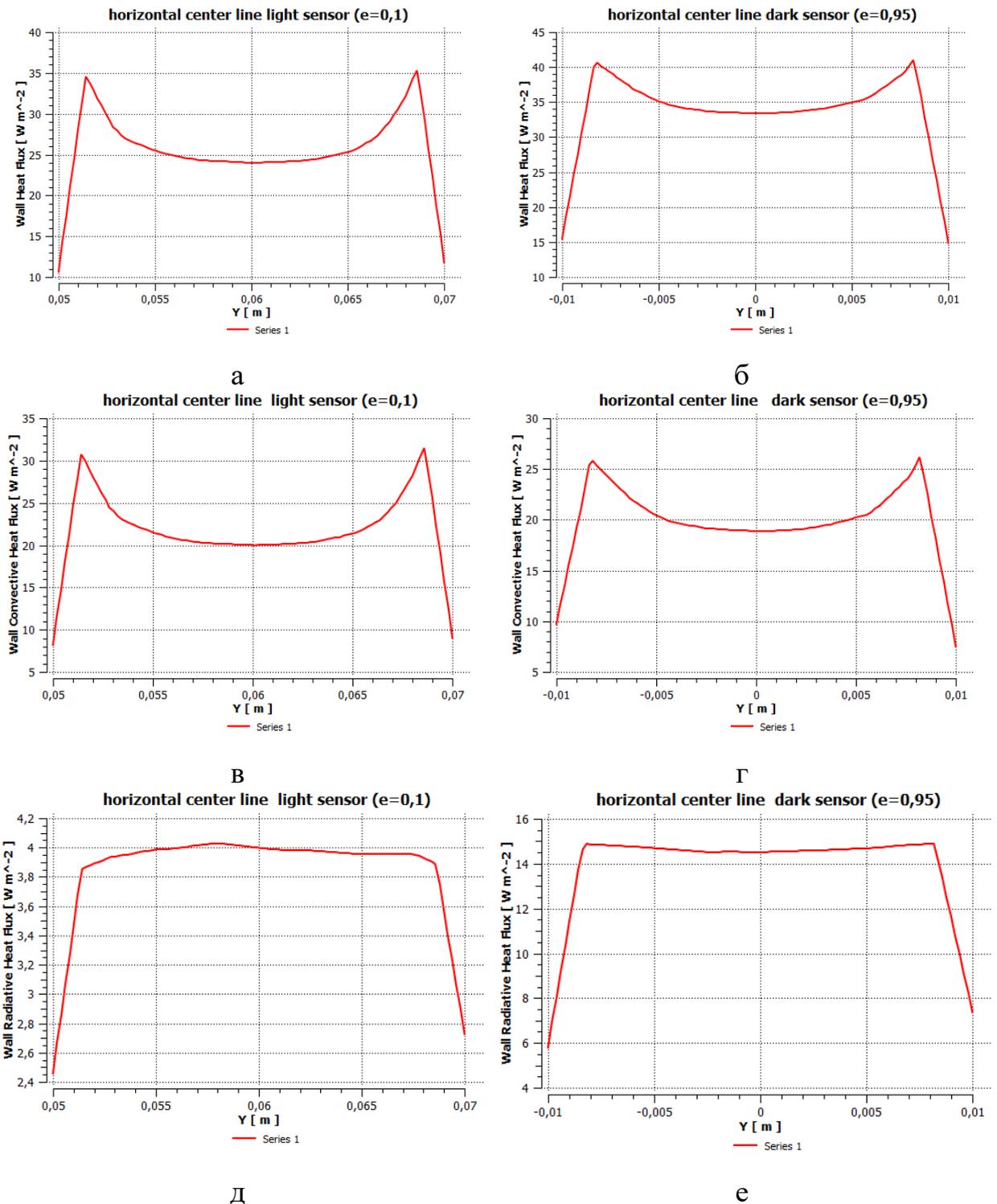
Коефіцієнт емісії зразка $\varepsilon = 0,1$ 

Рисунок А.1 – Розподіл теплових потоків в комірках приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії зразка: а, б – загальний тепловий потік для комірки з сенсором «light» і «dark» відповідно, в, г – конвективний тепловий

потік для сенсору «light» і «dark» відповідно, d , e – радіаційний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно

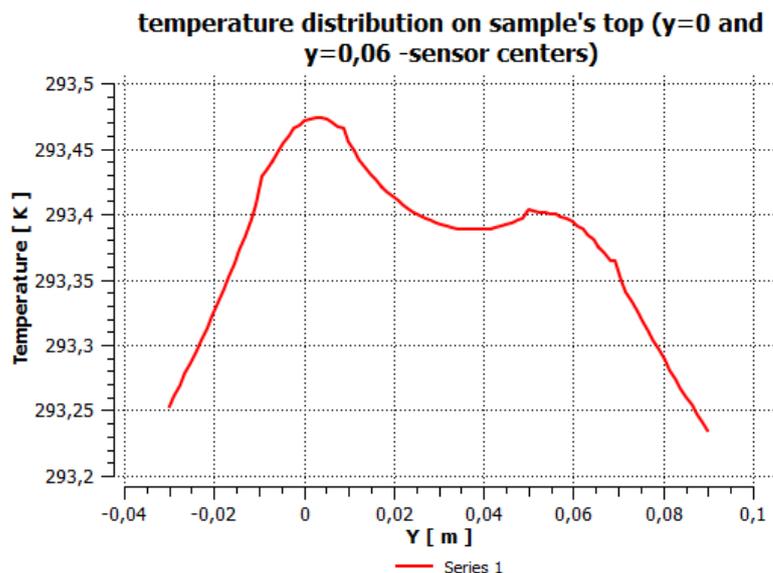


Рисунок А.2 – Розподіл температури по поверхні зразка ($\varepsilon = 0,1$) навпроти сенсорів: $y = 0$ м – «dark» сенсор; $y = 0,06$ м – «light» сенсор

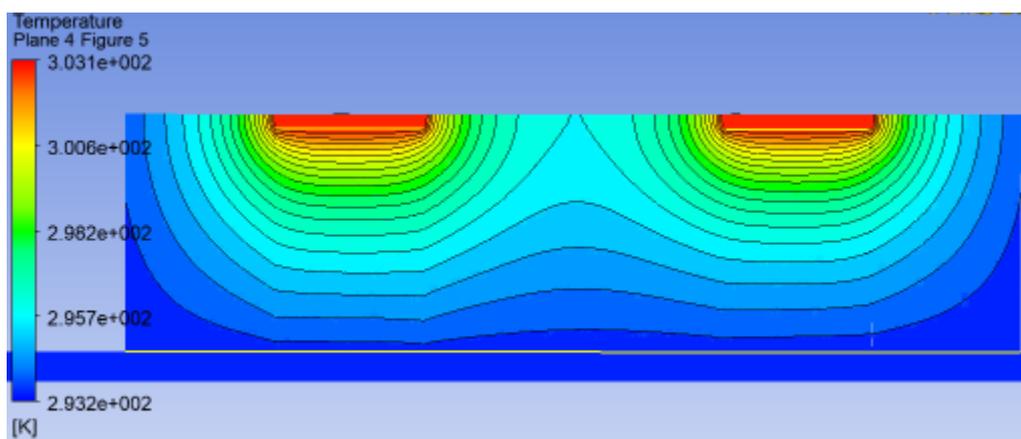


Рисунок А.3 – Температурне поле на осі вимірювального елемента при коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon = 0,1$

Таблиця А.1 – Інтегральні теплові потоки при коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon=0,1$

Тепловий потік	Dark sensor $\varepsilon = 0,95$	Light sensor $\varepsilon = 0,1$
Загальний тепловий потік Q_{Σ} , Вт	1,096e-02	8,329e-03
Конвективний тепловий потік Q_c , Вт	6,653e-03	7,147e-03
Радіаційний тепловий потік Q_R , Вт	4,309e-03	1,182e-03

Коефіцієнт емісії зразка $\varepsilon = 0,2$

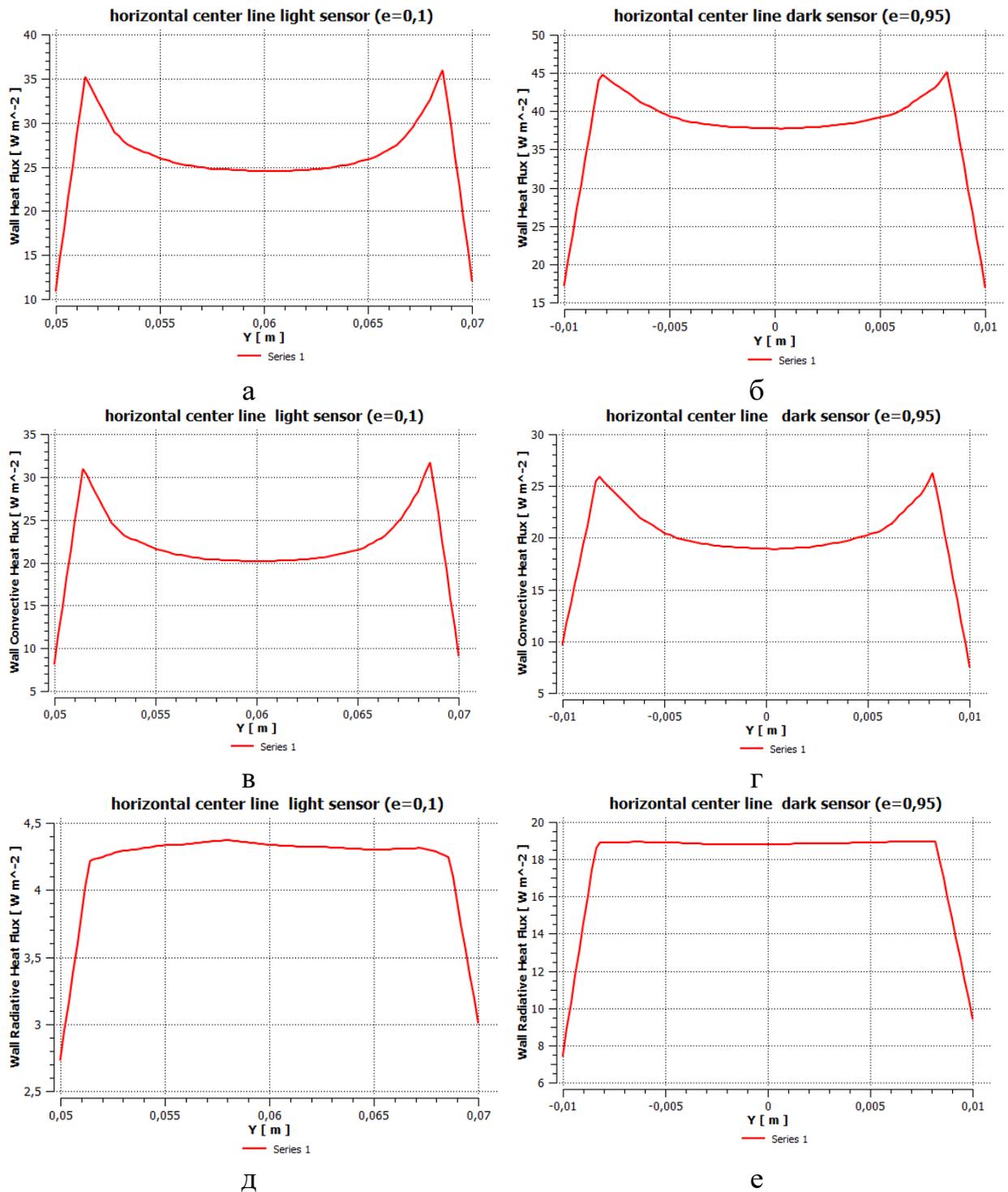


Рисунок А.4 – Розподіл теплових потоків в комірках приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії зразка: а, б – загальний тепловий потік для комірки з сенсором «light» і «dark» відповідно, в, г – конвективний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно, д, е – радіаційний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно

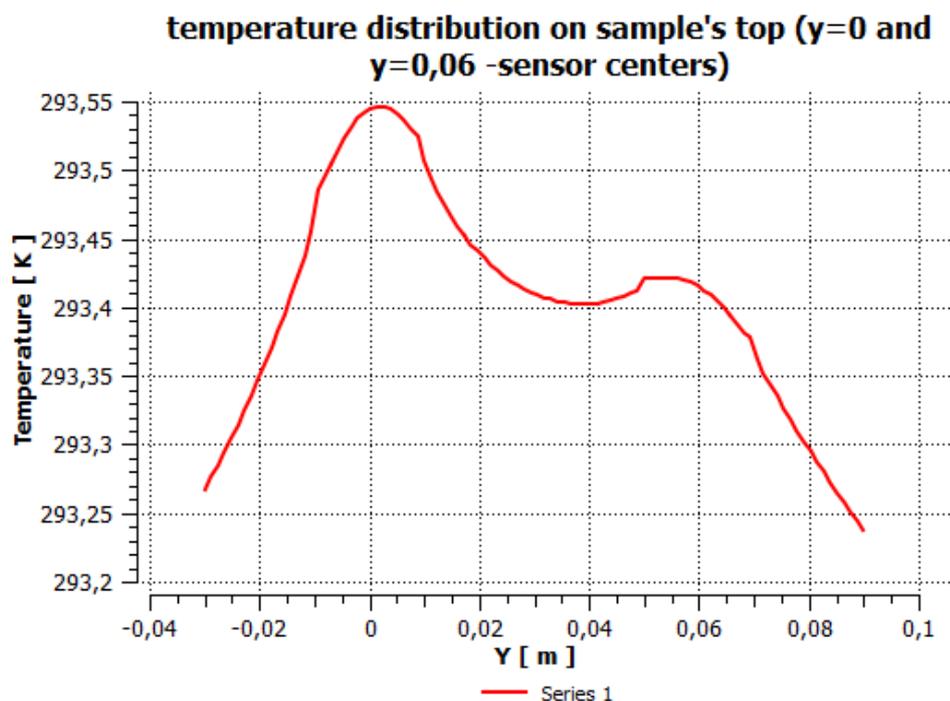


Рисунок А.5 – Розподіл температури по поверхні зразка ($\varepsilon = 0,2$) напроти сенсорів: $y = 0$ м – «dark» сенсор; $y = 0,06$ м – «light» сенсор

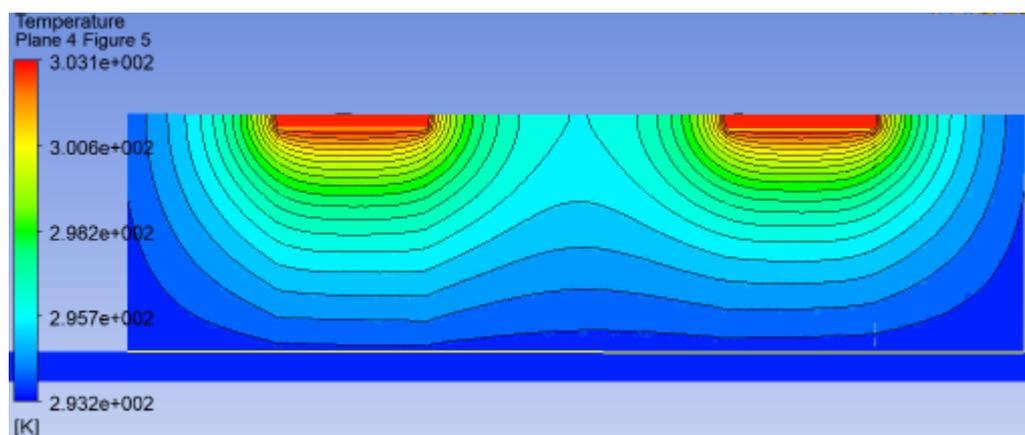
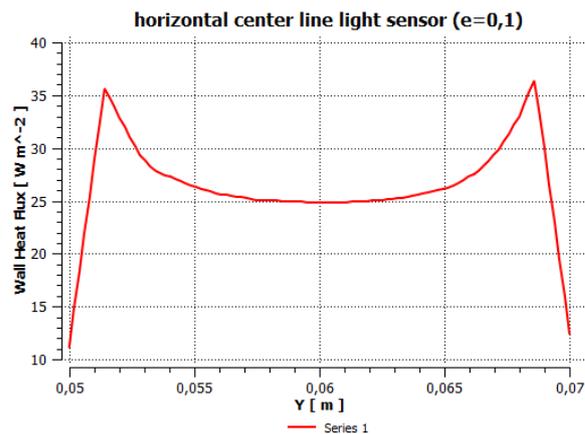


Рисунок А.6 – Температурне поле на осі вимірювального елемента при ступені чорноти зразка $\varepsilon = 0,2$

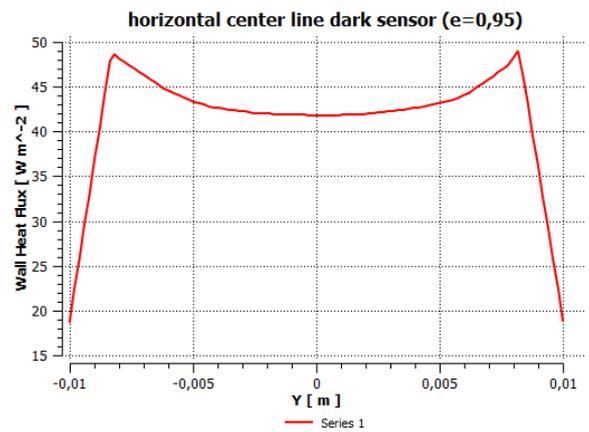
Таблиця А.2 – Інтегральні теплові потоки при коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon = 0,2$

Тепловий потік	Dark sensor $\varepsilon = 0,95$	Light sensor $\varepsilon = 0,1$
Загальний тепловий потік Q_{Σ} , Вт	1,218e-02	8,486e-03
Конвективний тепловий потік Q_c , Вт	6,676e-03	7,197e-03
Радіаційний тепловий потік Q_R , Вт	5,508e-03	1,289e-03

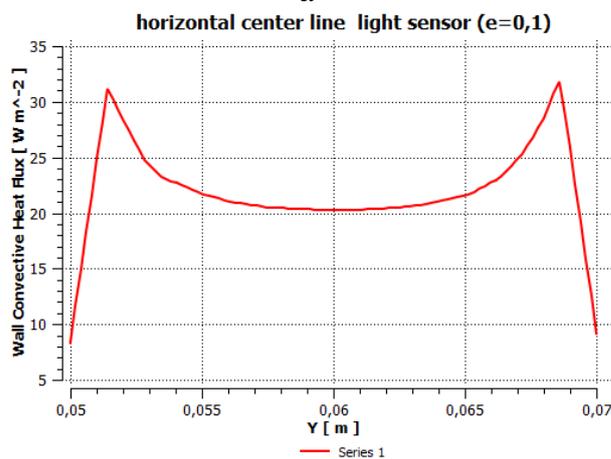
Коефіцієнт емісії зразка $\varepsilon = 0,3$



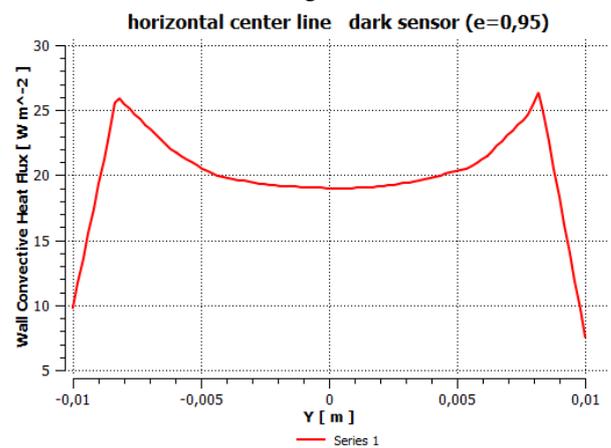
а



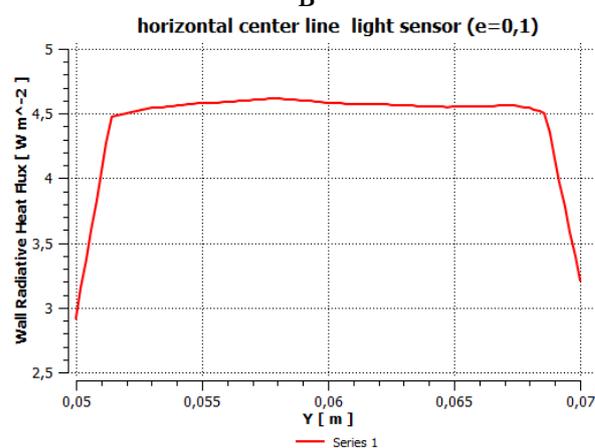
б



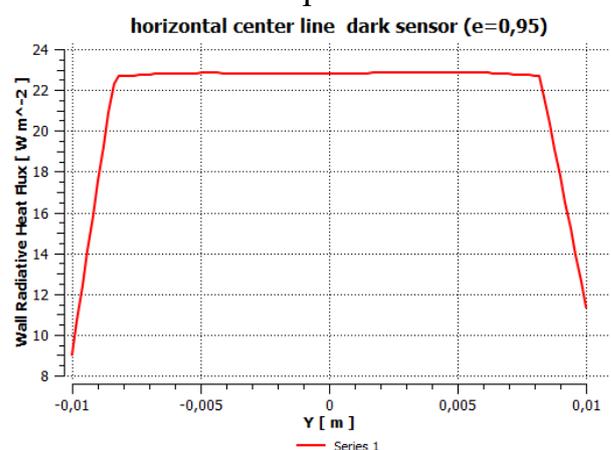
в



г



д



е

Рисунок А.7 – Розподіл теплових потоків в комірках приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії зразка: а, б – загальний тепловий потік для комірки з сенсором «light» і «dark» відповідно, в, г – конвективний тепловий

потік для сенсору «light» і «dark» відповідно, d , e – радіаційний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно

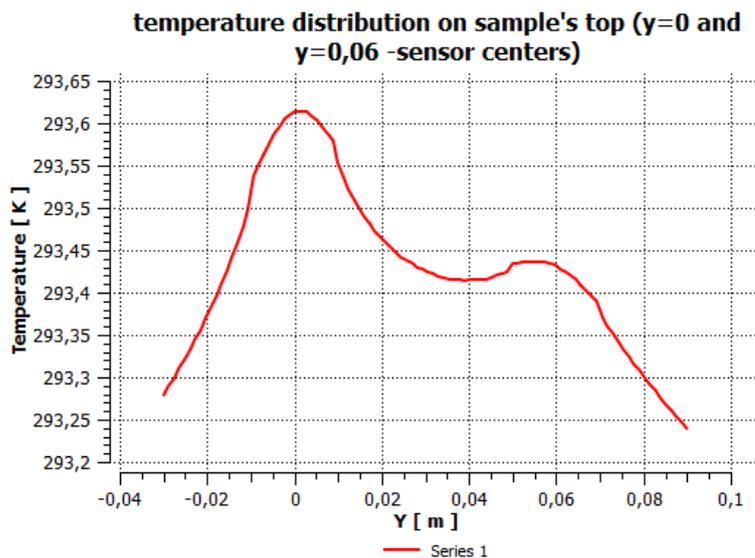


Рисунок А.8 – Розподіл температури по поверхні зразка ($\varepsilon = 0,3$) напроти сенсорів: $y = 0$ м – «чорний сенсор»; $y = 0,06$ м – «light» сенсор

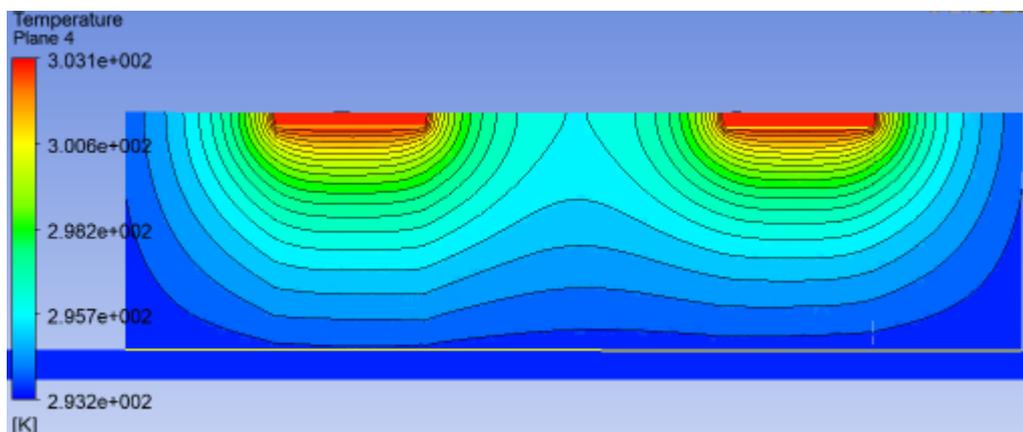
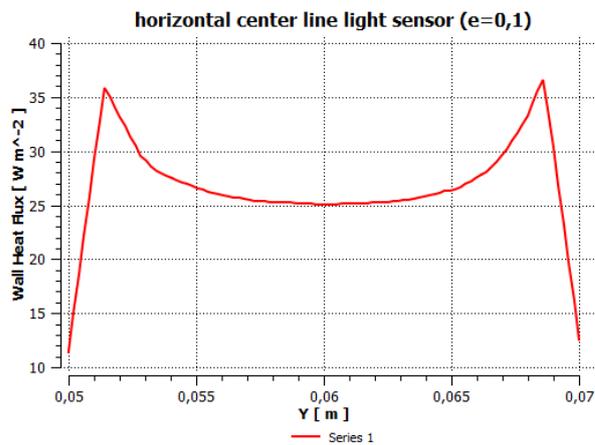


Рисунок А.9 – Температурне поле на осі вимірювального елемента при ступені чорноти зразка $\varepsilon = 0,3$

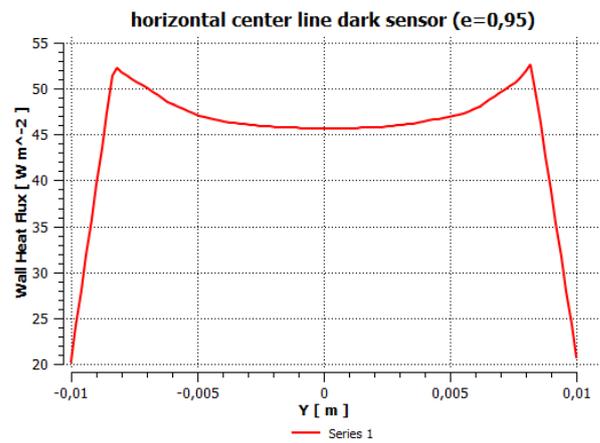
Таблиця А.3 – Інтегральні теплові потоки при коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon = 0,3$

Тепловий потік	Dark sensor $\varepsilon = 0,95$	Light sensor $\varepsilon = 0,1$
Загальний тепловий потік Q_{Σ} , Вт	1,332e-02	8,597e-03
Конвективний тепловий потік Q_c , Вт	6,695e-03	7,231e-03
Радіаційний тепловий потік Q_R , Вт	6,627e-03	1,366e-03

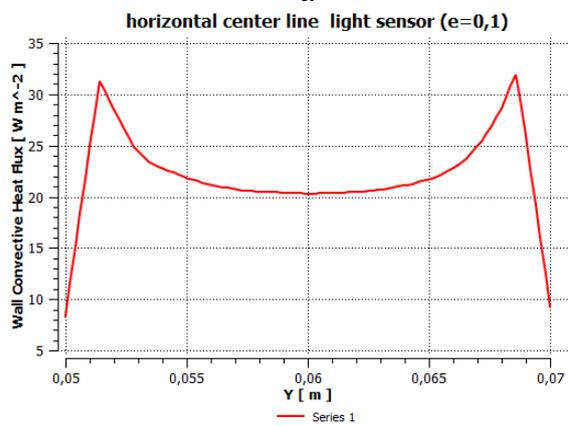
Коефіцієнт емісії зразка $\varepsilon = 0,4$



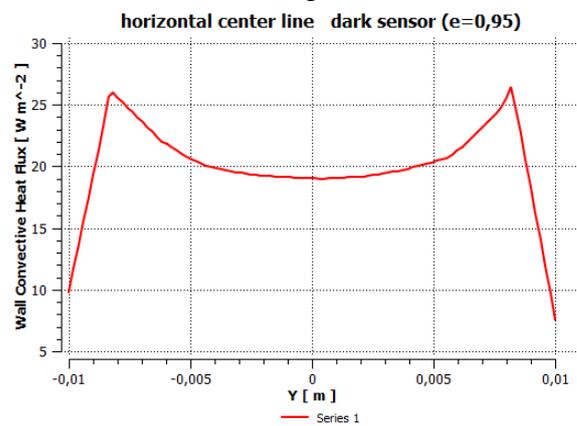
а



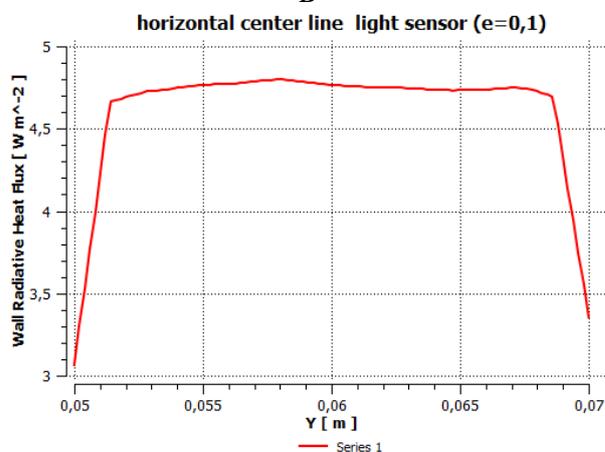
б



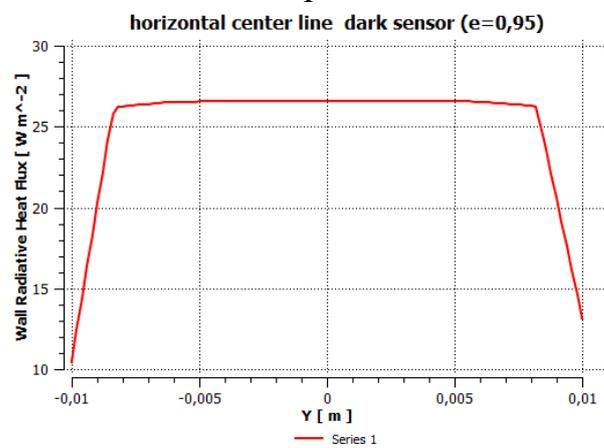
в



г



д



е

Рисунок А.10 – Розподіл теплових потоків в комірках приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії зразка: а, б – загальний тепловий потік для комірки з сенсором «light» і «dark» відповідно, в, г – конвективний

тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно, d , e – радіаційний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно

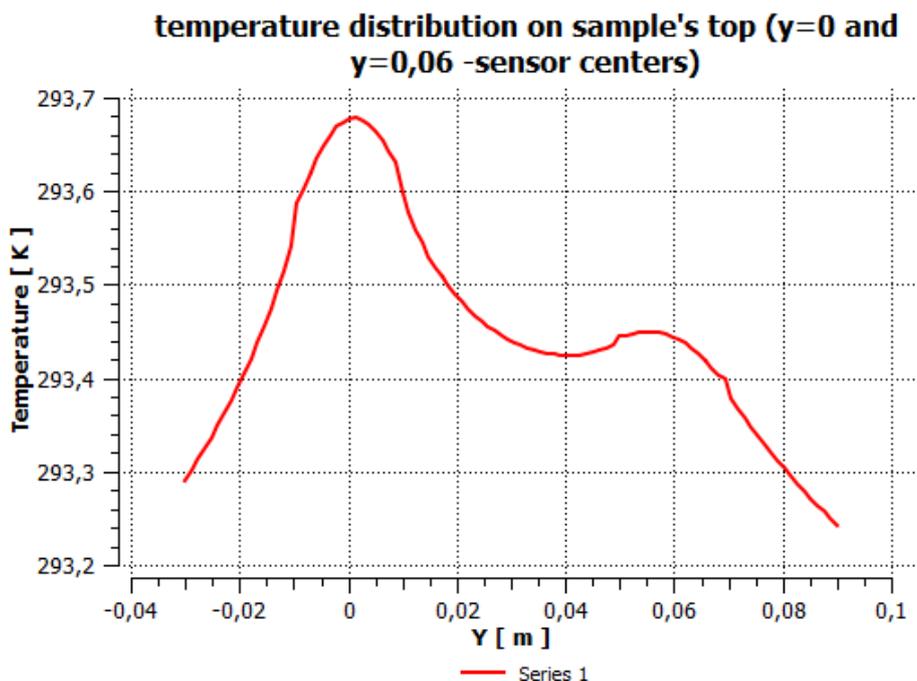


Рисунок А.11 – Розподіл температури по поверхні зразка ($\varepsilon = 0,4$) напроти сенсорів: $y = 0$ м – «dark» сенсор; $y = 0,06$ м – «light» сенсор

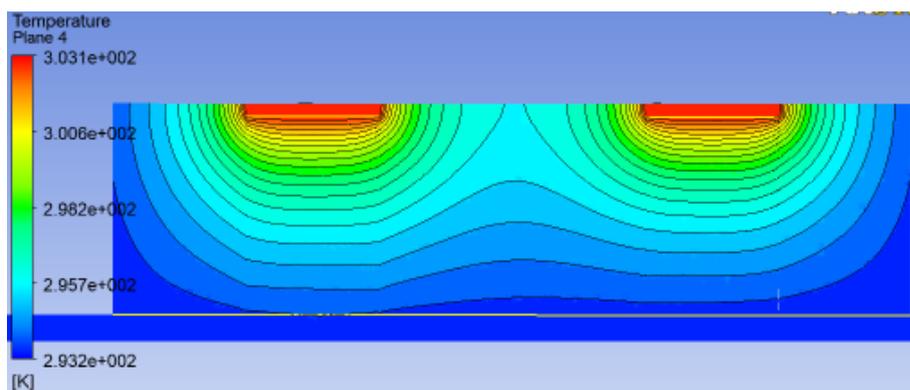
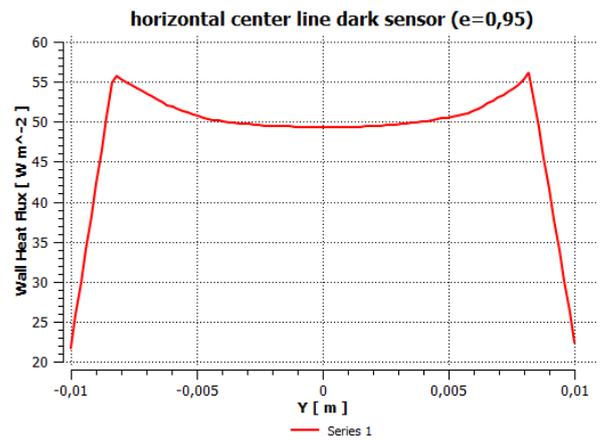
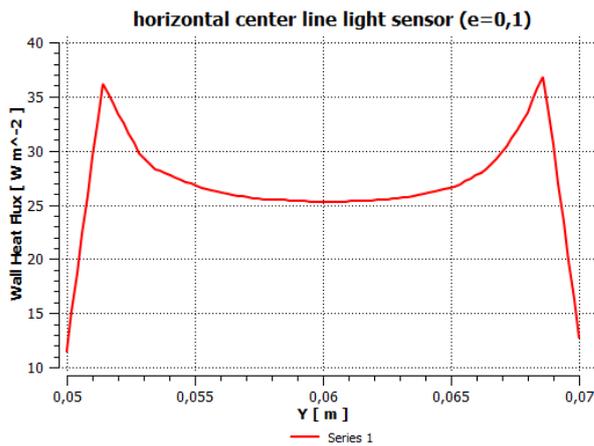


Рисунок А.12 – Температурне поле на осі вимірювального елемента при ступені чорноти зразка $\varepsilon = 0,4$

Таблиця А.4 – Інтегральні теплові потоки при коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon = 0,4$

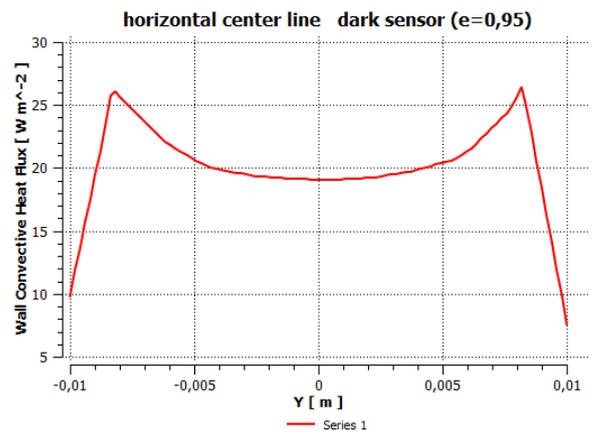
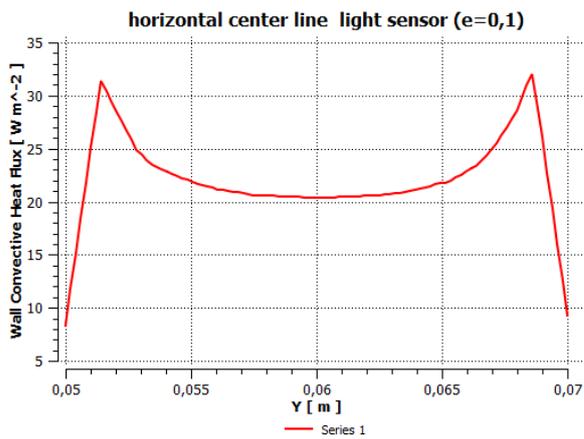
Тепловий потік	Dark sensor $\varepsilon = 0,95$	Light sensor $\varepsilon = 0,1$
Загальний тепловий потік Q_{Σ} , Вт	1,440e-02	8,679e-03
Конвективний тепловий потік Q_c , Вт	6,712e-03	7,256e-03
Радіаційний тепловий потік Q_R , Вт	7,684e-03	1,423e-03

Коефіцієнт емісії зразка $\varepsilon = 0,5$



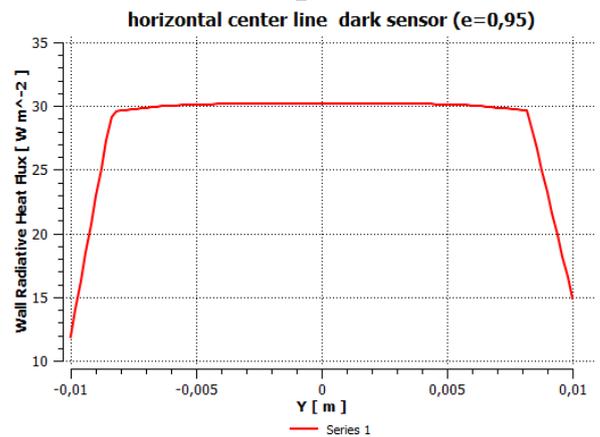
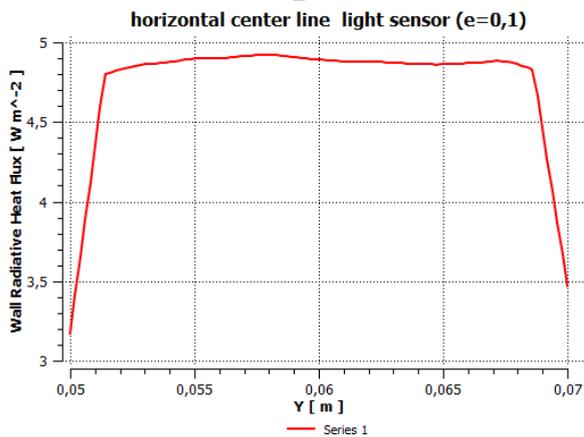
а

б



в

г



д

е

Рисунок А.13 – Розподіл теплових потоків в комірках приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії зразка: а, б – загальний тепловий потік для комірки з сенсором «light» і «dark» відповідно, в, г – конвективний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно, д, е – радіаційний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно

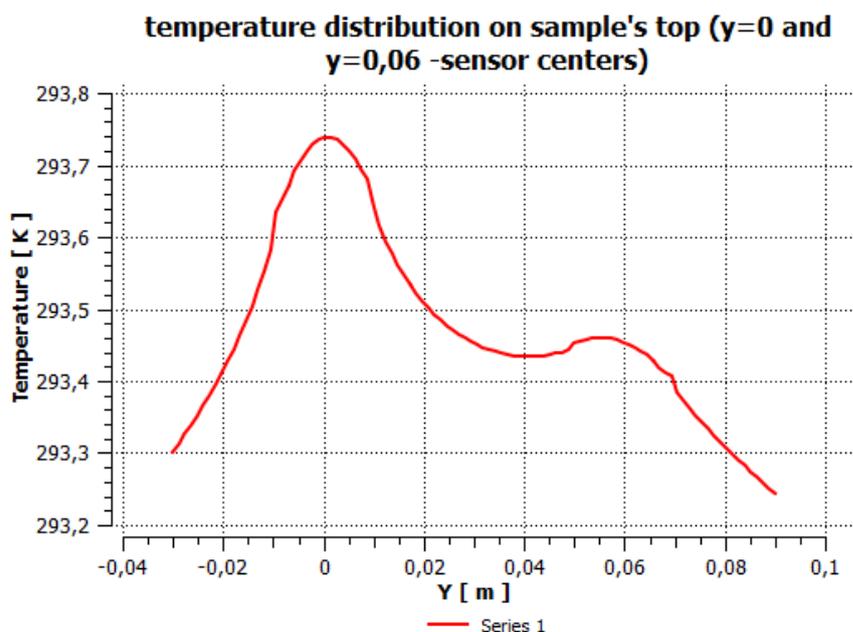


Рисунок А.14 – Розподіл температури по поверхні зразка ($\varepsilon = 0,5$)
напроти сенсорів: $y = 0$ м – «dark» сенсор; $y = 0,06$ м – «light» сенсор

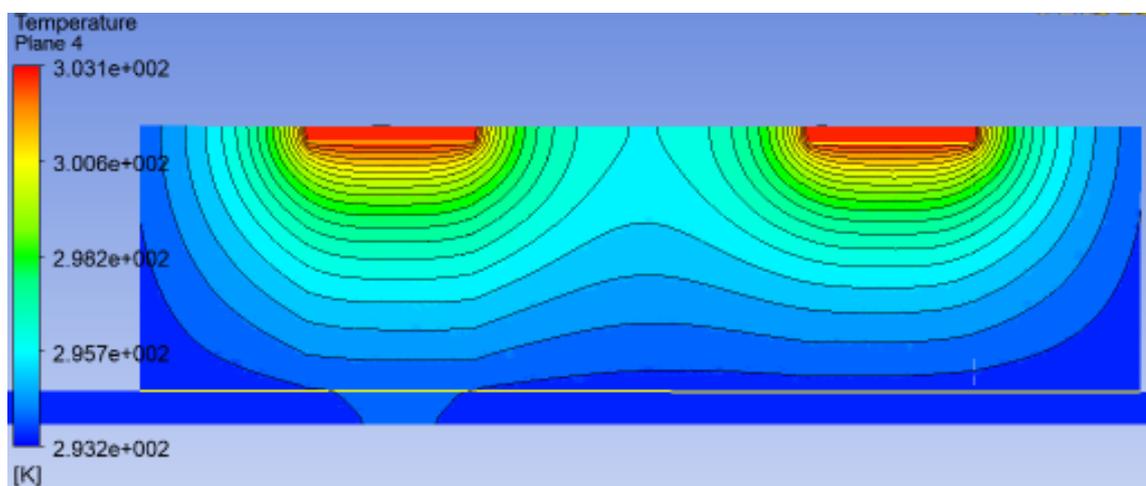
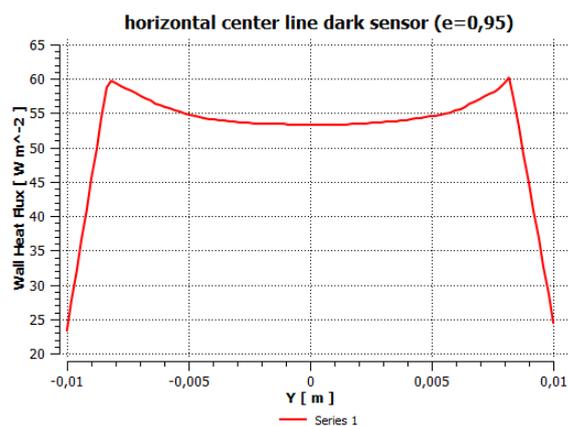
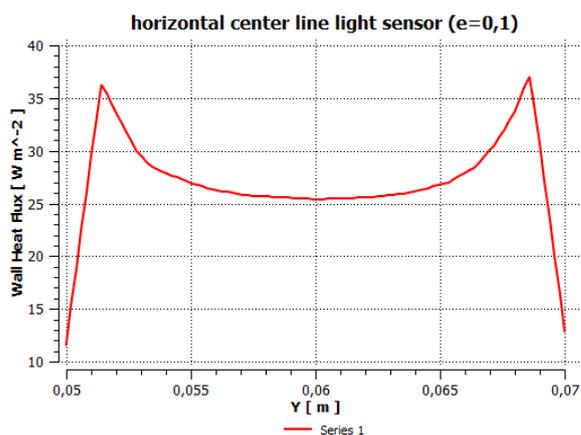


Рисунок А.15 – Температурне поле на осі вимірювального елемента при
ступені чорноти зразка $\varepsilon = 0,5$

Таблиця А.5 – Інтегральні теплові потоки коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon = 0,5$

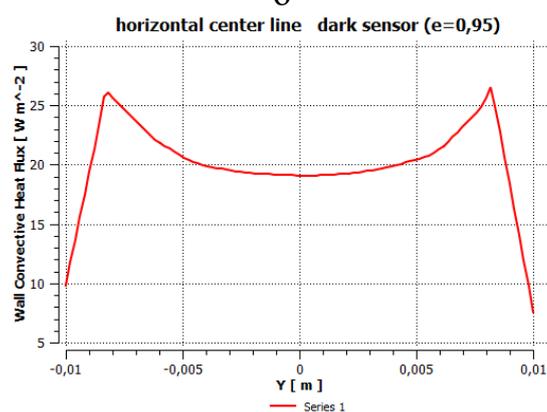
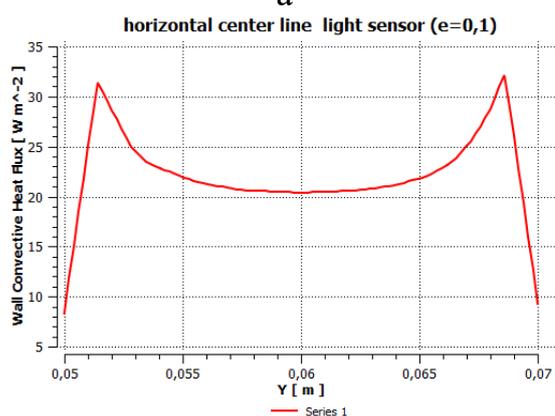
Тепловий потік	Dark sensor $\varepsilon = 0,95$	Light sensor $\varepsilon = 0,1$
Загальний тепловий потік Q_{Σ} , Вт	1,542e-02	8,741e-03
Конвективний тепловий потік Q_c , Вт	6,727e-03	7,278e-03
Радіаційний тепловий потік Q_R , Вт	8,693e-03	1,463e-03

Коефіцієнт емісії зразка $\varepsilon = 0,6$



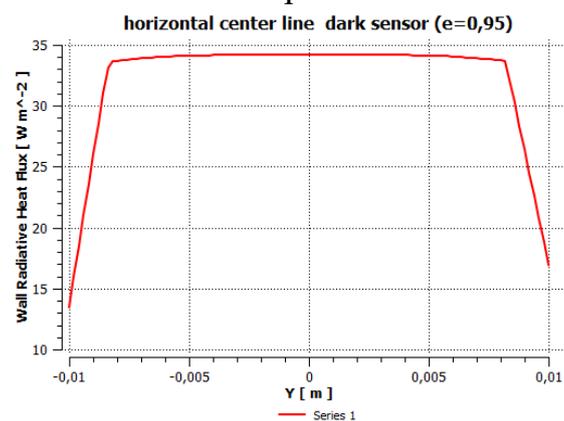
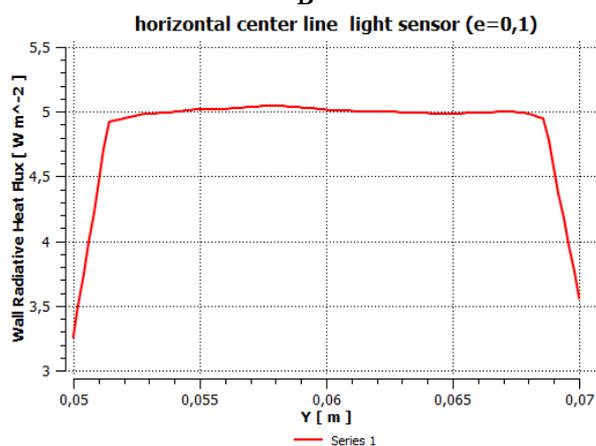
а

б



в

г



д

е

Рисунок А.16 – Розподіл теплових потоків в комірках приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії зразка: а, б – загальний тепловий потік для комірки з сенсором «light» і «dark» відповідно, в, г – конвективний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно, д, е – радіаційний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно

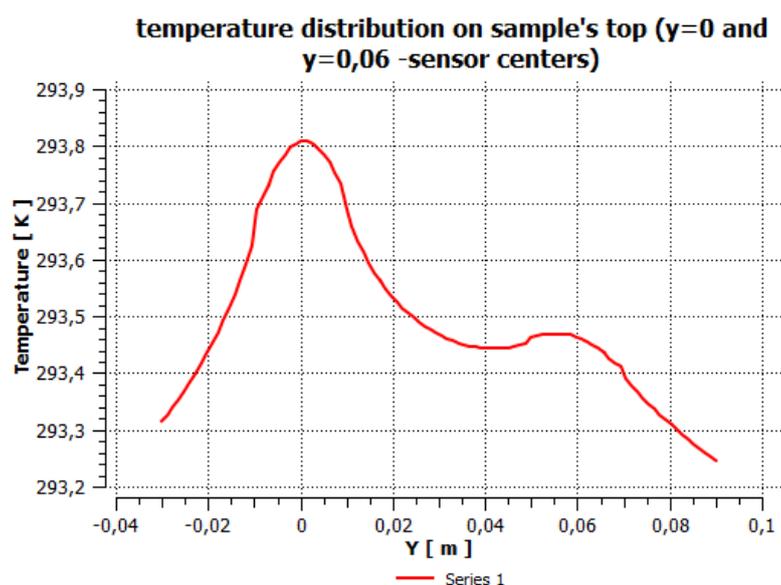


Рисунок А.17 – Розподіл температури по поверхні зразка ($\varepsilon = 0,6$) напроти сенсорів: $y = 0$ м – «dark» сенсор; $y = 0,06$ м – «light» сенсор

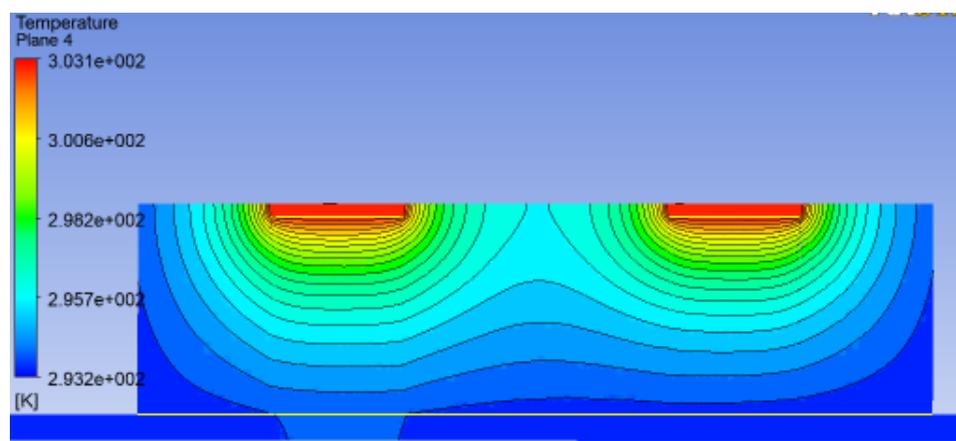
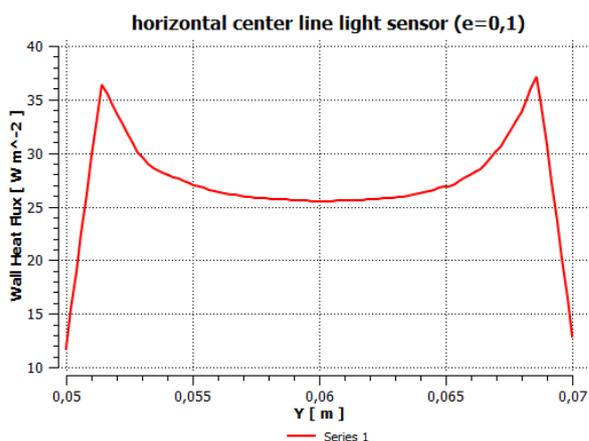


Рисунок А.18 – Температурне поле на осі вимірювального елемента при коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon = 0,6$

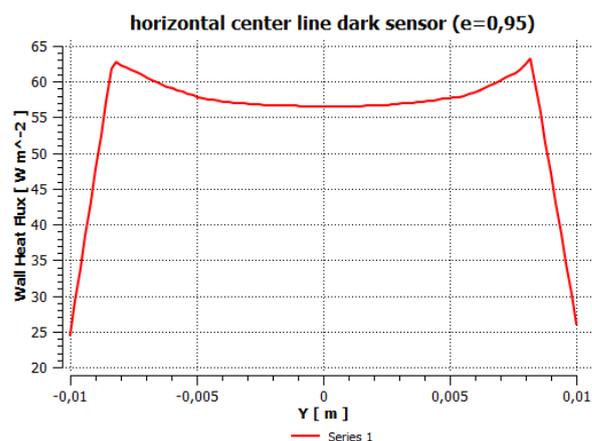
Таблиця А.6 – Інтегральні теплові потоки при коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon = 0,6$

Тепловий потік	Dark sensor $\varepsilon = 0,95$	Light sensor $\varepsilon = 0,1$
Загальний тепловий потік Q_{Σ} , Вт	1,660e-02	8,789e-03
Конвективний тепловий потік Q_c , Вт	6,733e-03	7,289e-03
Радіаційний тепловий потік Q_R , Вт	9.865e-03	1,500e-03

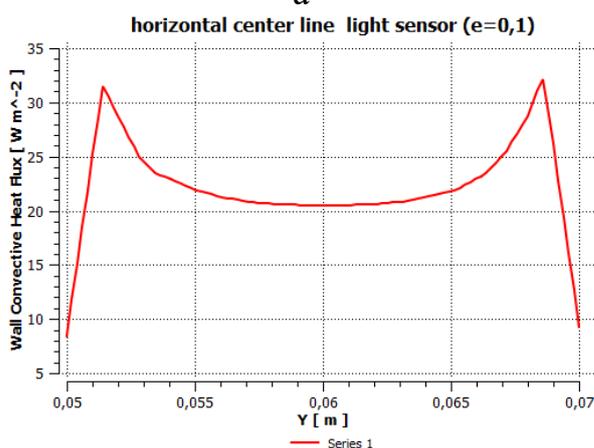
Коефіцієнт емісії зразка $\varepsilon = 0,7$



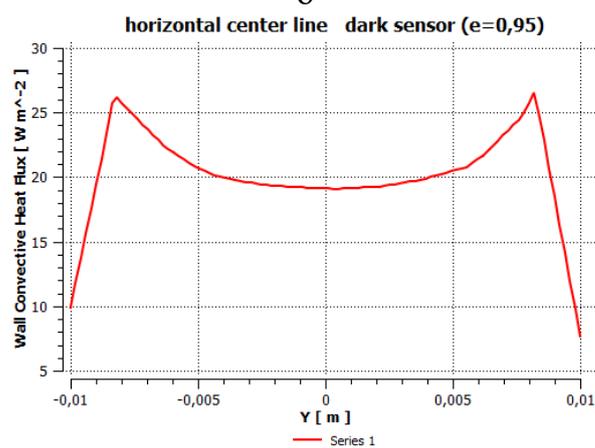
а



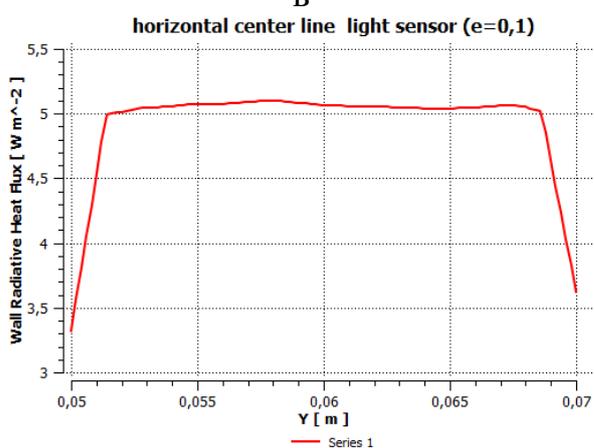
б



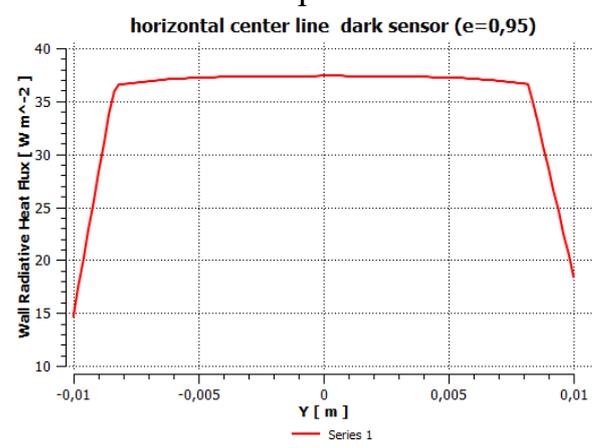
в



г



д



е

Рисунок А.19 – Розподіл теплових потоків в комірках приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії зразка: а, б – загальний тепловий потік для комірки з сенсором «light» і «dark» відповідно, в, г – конвективний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно, д, е – радіаційний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно

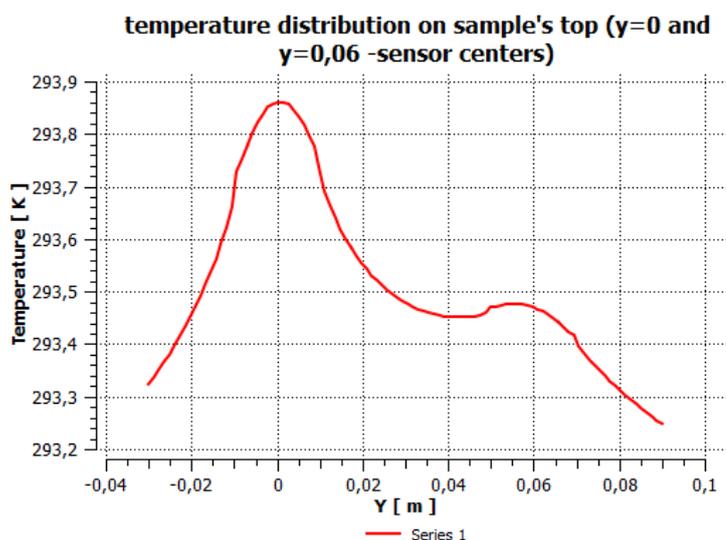


Рисунок А.20 – Розподіл температури по поверхні зразка ($\varepsilon = 0,7$)
напроти сенсорів: $y = 0$ м – «dark» сенсор; $y = 0,06$ м – «light» сенсор

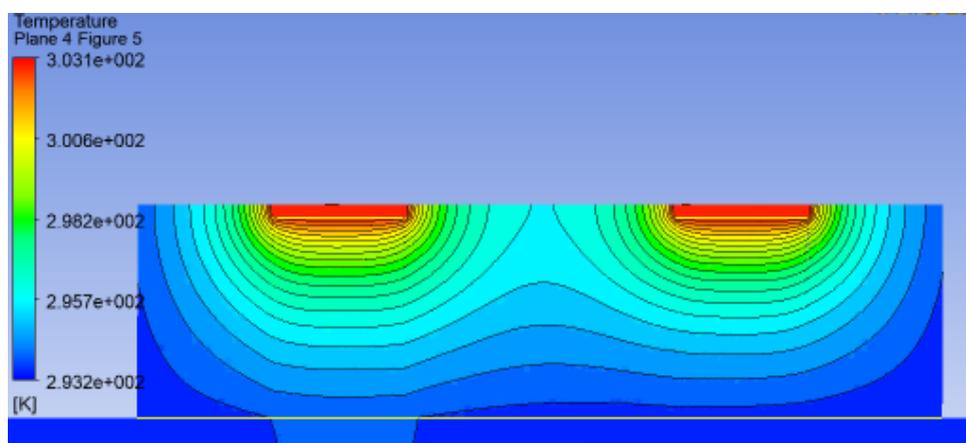


Рисунок А.21 – Температурне поле на осі вимірювального елемента при
коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon = 0,7$

Таблиця А.7 – Інтегральні теплові потоки при коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon = 0,7$

Тепловий потік	Dark sensor $\varepsilon = 0,95$	Light sensor $\varepsilon = 0,1$
Загальний тепловий потік Q_{Σ} , Вт	1,749e-02	8,821e-03
Конвективний тепловий потік Q_c , Вт	6,748e-03	7,302e-03
Радіаційний тепловий потік Q_R , Вт	1,074e-02	1,519e-03

Коефіцієнт емісії зразка $\varepsilon = 0,8$

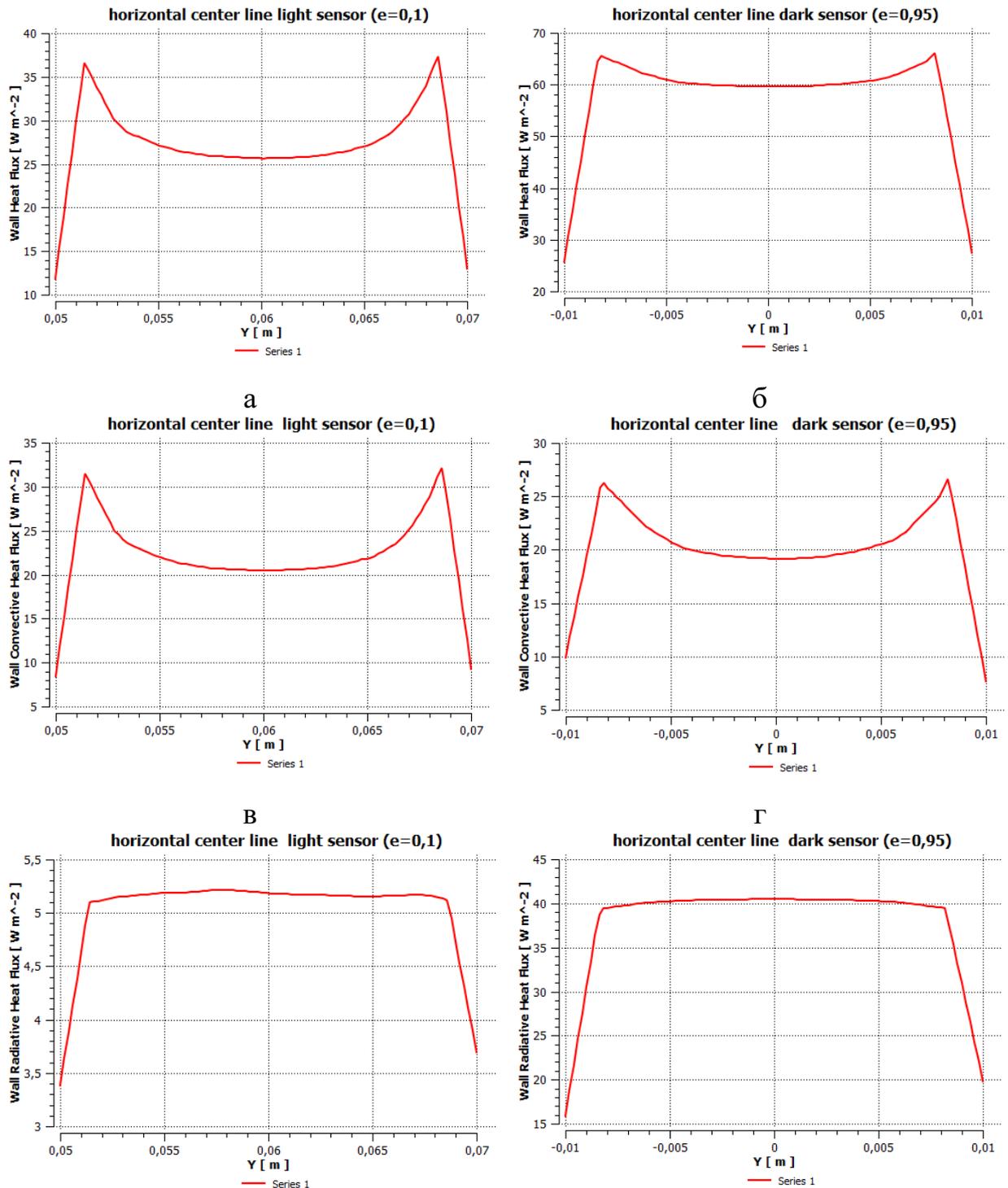


Рисунок А.22 – Розподіл теплових потоків в комірках приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії зразка: а, б – загальний тепловий потік для комірки з сенсором «light» і «dark» відповідно, в, г – конвективний

тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно, d , e – радіаційний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно

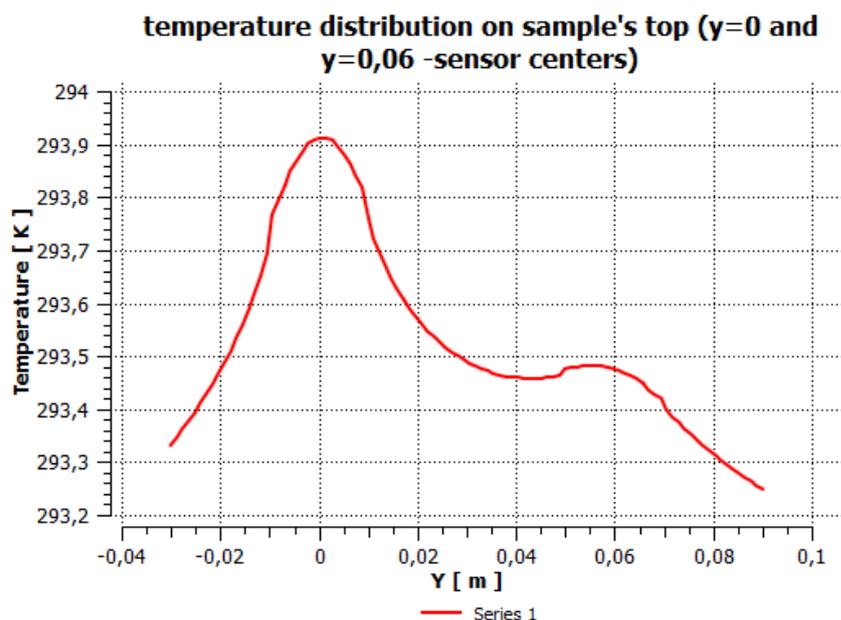


Рисунок А.23 – Розподіл температури по поверхні зразка ($\varepsilon = 0,8$) напроти сенсорів: $y = 0$ м – «dark» сенсор; $y = 0,06$ м – «light» сенсор

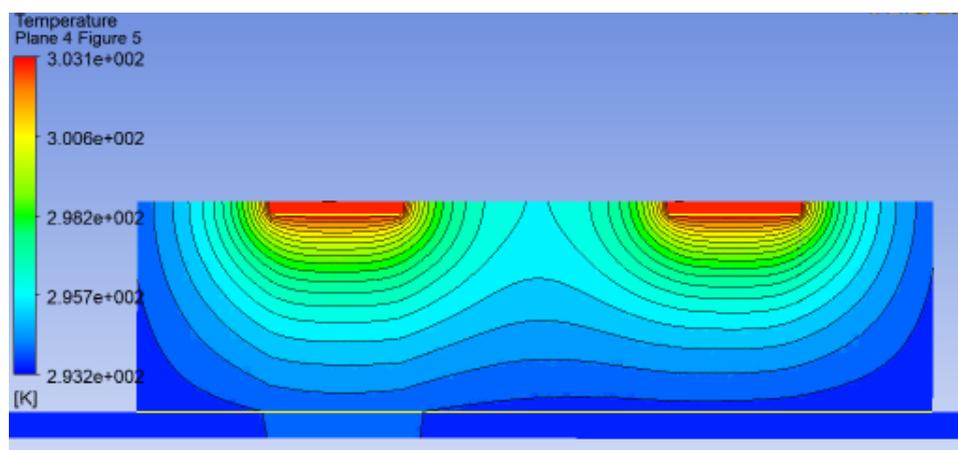


Рисунок А.24 – Температурне поле на осі вимірювального елемента при коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon = 0,8$

Таблиця А.8 – Інтегральні теплові потоки при коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon = 0,8$

Тепловий потік	Dark sensor $\varepsilon = 0,95$	Light sensor $\varepsilon = 0,1$
Загальний тепловий потік Q_{Σ} , Вт	1,835e-02	8,863e-03
Конвективний тепловий потік Q_c , Вт	6,762e-03	7,311e-03
Радіаційний тепловий потік Q_R , Вт	1,159e-02	1,552e-03

Коефіцієнт емісії зразка $\varepsilon = 0,9$

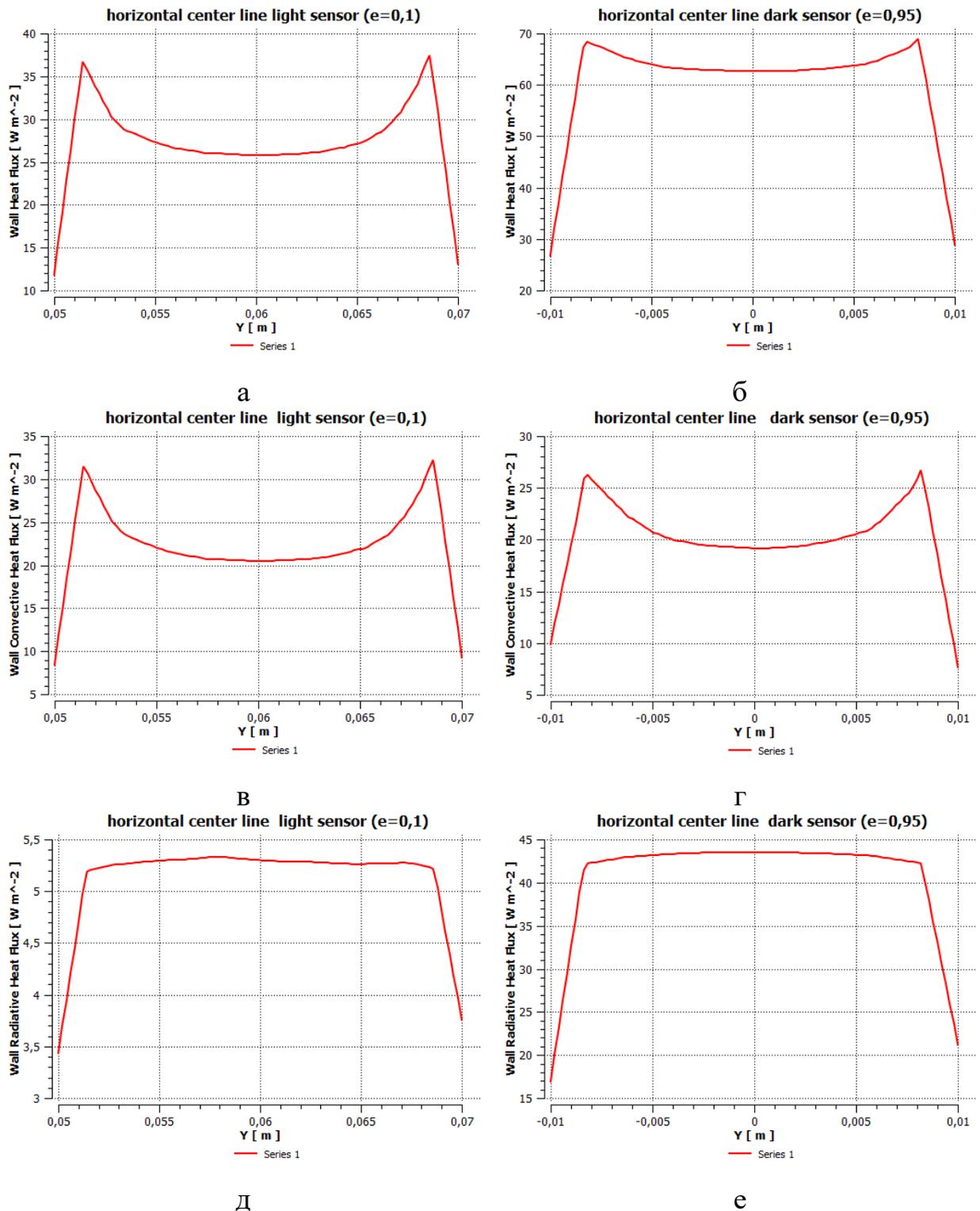


Рисунок А.25 – Розподіл теплових потоків в комірках приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії зразка: а, б – загальний тепловий потік для комірки з сенсором «light» і «dark» відповідно, в, г – конвективний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно, д, е – радіаційний тепловий потік для сенсору «light» і «dark» відповідно

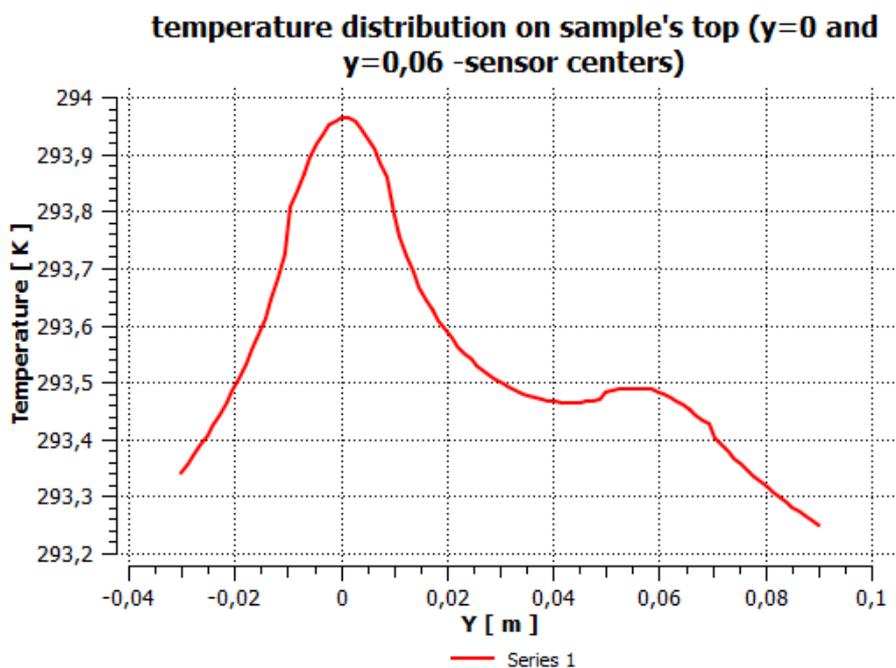


Рисунок А.26 – Розподіл температури по поверхні зразка ($\varepsilon = 0,9$)
напроти сенсорів: $y = 0$ м – «dark» сенсор; $y = 0,06$ м – «light» сенсор

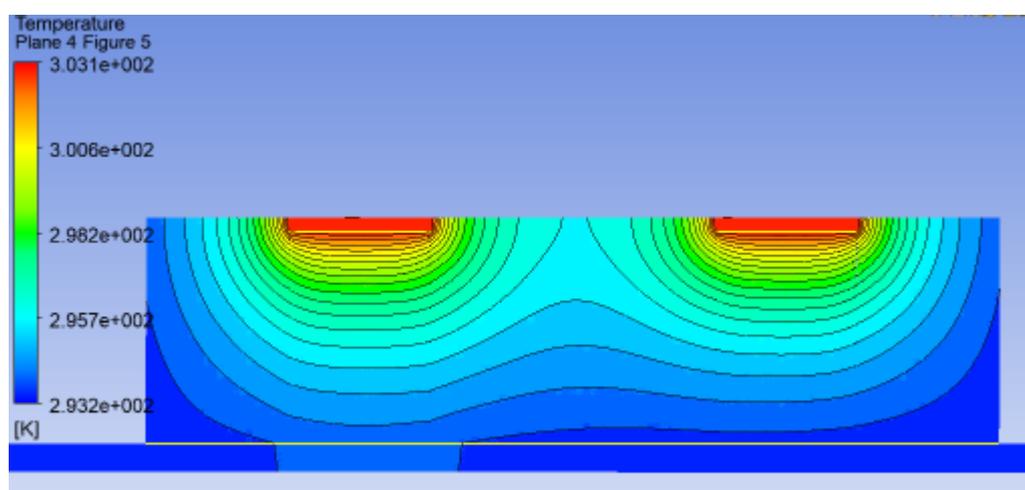


Рисунок А.27 – Температурне поле на осі вимірювального елемента при
коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon = 0,9$

Таблиця А.9 – Інтегральні теплові потоки при коефіцієнті емісії зразка $\varepsilon = 0,9$

Тепловий потік	Dark sensor $\varepsilon = 0,95$	Light sensor $\varepsilon = 0,1$
Загальний тепловий потік Q_{Σ} , Вт	1,920e-02	8,901e-03
Конвективний тепловий потік Q_c , Вт	6,773e-03	7,318e-03
Радіаційний тепловий потік Q_R , Вт	1,242e-02	1,583e-03

ДОДАТОК Б



МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ УКРАЇНИ

Державне підприємство
«Всеукраїнський державний науково-виробничий
центр стандартизації, метрології, сертифікації
та захисту прав споживачів»
(ДП «УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ»)

вул. Метрологічна, 4, м. Київ, 03143
Свідоцтво про уповноваження № ПК 001-2014 від 24 лютого 2014 р.

СВІДОЦТВО

про повірку на добровільних засадах
засобу вимірювальної техніки

№ 24-2/5616

Чинне до «19» грудня 2019 р.

Вимірювальний комплекс «Система моніторингу теплового опору
огороджувальних конструкцій» №1

назва засобу вимірювальної техніки, умовне позначення, заводський номер

Виробник ІТТФ НАНУ

назва виробника

За результатами повірки встановлено, що засіб вимірювальної техніки

назва документу, що містить вимоги до метрологічних

відповідає вимогам експлуатаційної документації фірми-виробника.

характеристик, та, за потреби, значення метрологічних характеристик

Границі допустимої відносної похибки вимірювання густини теплового
потoku в діапазоні від 1 до 500 Вт/м² ± 3 %

(клас похибки, діапазони вимірювань тощо)

Границі допустимої основної абсолютної похибки вимірювання
температури в діапазоні від мінус 40 до 50 °С ±1 °С

Додаток на _ стор.

Персонал, який

виконував роботи з
повірки

Місце печатки або відбитку
повірочного тавра

Підпис

Вишняков П.О.

ініціали, прізвище

«17» грудня 2018 р.

Результати експериментальних досліджень метрологічних характеристик в режимі вимірювання теплового потоку

Канал, номер ПТП, позначення	Відносна похибка вимірювання густини теплового потоку, δ , %
25, № 16793, q1	-1,40
26, № 16794, q2	0,84
27, №16795, q3	0,88
28, №16796, q4	-0,92
29, №16797, q5	-1,00
30, №16798, q6	-1,28
31, №16799, q7	-0,96
32, №16800, q8	-0,99

Результати експериментальних досліджень метрологічних характеристик в режимі вимірювання температури

Канал, номер перетворювачів температури	Значення температури, °C	Найбільше значення абсолютної похибки вимірювання температури, °C
канали 1...22 № ПТ 2893...2914,	0,5	0,41
	49,92	0,37

Начальник лабораторії

Вишняков П.О.

Національна академія наук України
Інститут технічної теплофізики

Затверджую

Директор ІТТФ НАНУ

академік НАН України


Ю.Ф. Снежкін

2018 р.



А К Т

м. Київ

18.12 2018 р.

про приймання в експлуатацію Системи моніторингу теплового опору огорожувальних
конструкцій будівель

Підстава: Наказ директора ІТТФ НАН України №33-А від 14.08.2017 р. «Про
призначення комісії для приймання в експлуатацію експериментальних стендів та
установок»

Голова комісії:
заступник директора з наукової роботи,
д.т.н., чл.-кор. НАН України

А.О. Авраменко

Заступник голови:
зав. відділом ТОЕТ,
д.т.н., чл.-кор. НАН України

Б.І. Басок

Члени комісії:
заступник директора
головний енергетик
провідний інженер з охорони праці
представник профспілки Інституту

І.С. Євсютін

А.Ю. Калягін

А.Б. Григоревський

О.О. Переяславцева

Від відділу МОТП:
зав. відділу МОТП
старший науковий співробітник,
відповідальний за експлуатацію установки

В.П. Бабак

О.Л. Декуша

Громадський інспектор
з охорони праці

Є.В. Скляренко

ДОДАТОК В
ДОДАТОК В



ЗАТВЕРДЖУЮ

Декан приладобудівного факультету
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»


Григорій ТИМЧИК

21.03.2024

АКТ

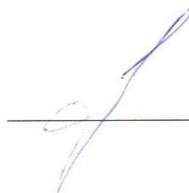
про впровадження в навчальному процесі результатів докторської дисертаційної роботи

Декуши Олега Леонідовича

В навчальному процесі кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» при розробці навчальних програм і лекційного матеріалу за спеціальністю 175 «Інформаційно-вимірювальні технології» дисциплін «Інформаційні технології контролю фізичних величин» та «Моделювання та оптимізація інформаційно-вимірювальних систем» були впровадженні такі матеріали докторської дисертації Декуши О.Л.:

- комп'ютерна модель процесів складного радіаційного та конвективно-кондуктивного теплообміну при контролі теплового опору;
- комп'ютерна модель процесів складного радіаційного і конвективно-кондуктивного теплообміну при експрес-контролі коефіцієнту емісії;
- інформаційно-вимірювальна технологія контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик.

Завідувач кафедри
інформаційно-вимірювальних
технологій,
доктор технічних наук, доцент



Володимир СРЕМЕНКО

Директор Навчально-наукового інституту енергетики, автоматики і енергозбереження Національного університету біоресурсів і природокористування України,
д-р техн. наук, проф.


Віктор КАПЛУН
2024 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес Навчально-наукового інституту енергетики, автоматики і енергозбереження Національного університету біоресурсів і природокористування України

Даний акт складений про те, що результати докторської дисертації Декуши О.Л., зокрема:

- математичні та комп'ютерні моделі, алгоритми та методи неруйнівного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів і виробів;
- вдосконалена методика неруйнівного контролю теплового опору, яка ґрунтується на тепловізійному аналізі огорожувальних конструкцій та вимірюванні значень поверхневої густини теплового потоку і температури,

впроваджені в освітній процес кафедри інженерії енергосистем Навчально-наукового інституту енергетики, автоматики і енергозбереження НУБіП України та будуть використані при вивченні дисципліни «Енергетичний менеджмент та аудит» за освітньою програмою «Теплоенергетика» для здобувачів освітнього ступеню «Бакалавр», а також «Моделювання теплових і гідродинамічних процесів» за освітньою програмою «Інженерія відновлювальних джерел енергії і енергоменеджмент» для здобувачів освітнього ступеню «Магістр» спеціальності 144 «Теплоенергетика» відповідно.

В.о. завідувача кафедри інженерії енергосистем ННІ енергетики, автоматики і енергозбереження
канд. техн. наук, доцент



Свген АНТИПОВ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ІТТФ НАН України
академік НАН України


_____ Ю.Ф. Снежкін
« 10 » 12 2018р.


ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ДП «ДЕРЖАВНИЙ
НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ»


_____ Г.Г. Фаренюк
« 18 » 12 2018р.

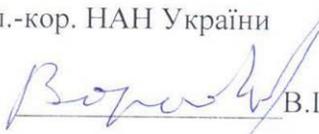


**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів наукової роботи**

Даний акт складено про впровадження результатів науково-технічного проекту Інституту технічної теплофізики НАН України «Розроблення та впровадження системи моніторингу теплового опору огорожувальних конструкцій будівель».

Результати отримані при виконанні науково-технічного проекту погоджуються та розвивають засоби та методи вимірювання рекомендовані в ДСТУ Б В.2.6-101:2010 «Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій» та ДСТУ ISO 9869 «Теплоізоляція. Будівельні елементи. Натурні вимірювання теплового опору та коефіцієнта теплопередавання».

/ Заступник директора з наукової
роботи ІТТФ НАН України
чл.-кор. НАН України


_____ В.П. Бабак

Завідувач відділу будівельної фізики та
енергоефективності ДП «ДЕРЖАВНИЙ
НДІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ»


_____ Е.Г. Фаренюк

ЗАТВЕРДЖУЮДиректор ІТТФ НАН України
академік НАН України

Ю.Ф. Снежкін

2019р.

ЗАТВЕРДЖУЮЗаст. директора ІЕЗ НАН України
академік НАН України

Л.М. Лобанов

2019р.

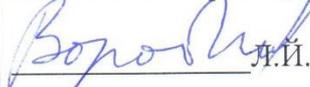
АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів наукової роботи

Даний акт складено про впровадження результатів науково-технічної роботи Інституту технічної теплофізики НАН України з створення та впровадження приладів для контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів. Із застосуванням розробленої в ІТТФ НАН України апаратури та методик вимірювання визначені значення коефіцієнту емісії та коефіцієнту поглинання сонячного випромінення алюмініду титану та спеціальних покриттів поверхонь елементів космічної техніки з титану. Результати вимірювань застосовуються в ІЕЗ НАН України при опрацюванні технології нанесення покриттів на елементи з титану та при розрахунках радіаційного теплообміну у об'єктах з такими елементами.

Заступник директора з наукової
роботи ІТТФ НАН України
чл.-кор. НАН України

 В.П. Бабак

Провідний науковий співробітник
ІТТФ НАН України, д.т.н.

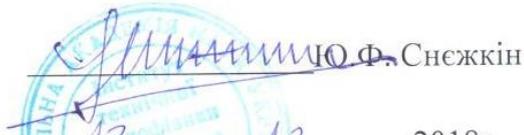
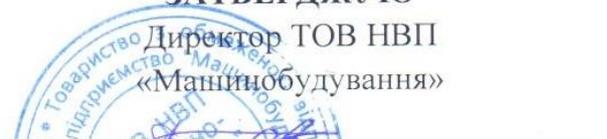
 Д.І. Воробйов

Старший науковий співробітник
ІТТФ НАН України, к.т.н.

 О.Л. Декуша

Старший науковий співробітник
ІЕЗ НАН України, к.т.н.

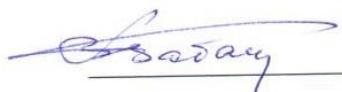
 В.С. Волков

ЗАТВЕРДЖУЮДиректор ІТТФ НАН України
академік НАН України

 О.Ф. Снежкін
 «13» 12 2018р.
 
ЗАТВЕРДЖУЮДиректор ТОВ НВП
«Машинобудування»

 С. Г. Шевченко
 «12» 12 2018р.
 

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ результатів наукової роботи

Даний акт складено про впровадження результатів I етапу науково-технічної роботи Інституту технічної теплофізики НАН України «Створення та впровадження приладів для експрес-контролю коефіцієнту емісії поверхонь матеріалів та покриттів з використанням високочутливих сенсорів інфрачервоного випромінювання». Методики вимірювання та результати визначення коефіцієнтів емісії поверхонь матеріалів та спеціальних покриттів застосовуються при розрахунках радіаційного теплообміну та проведенні неруйнівного контролю деталей машин, які здійснюються ТОВ НВП «Машинобудування».

 Заступник директора з наукової
роботи ІТТФ НАН України
чл.-кор. НАН України


 В.П. Бабак

 Заступник директора з наукової роботи
ТОВ НВП «Машинобудування»


 О.В. Мозговой



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о. директора Інституту
загальної енергетики НАН України,
член-кор. НАН України
В.П. Бабак



«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Генеральний директор
ТОВ «Буд-Буд»

С.І. Корнієнко

1.12.2025

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів науково-дослідної роботи

Ми, що нижче підписалися, контактна особа ТОВ «Буд-Буд» Корнієнко С.Ю., разом зі заступником директора з науково-організаційної роботи Інституту загальної енергетики НАН України, д.т.н., старш. дослідником Запорожцем А.О. та старшим науковим співробітником Інституту загальної енергетики НАН України, к.т.н., старш. дослідником Декушою О.Л., склали цей акт про те, що результати наукового проекту 2022.01/0048 «Інформаційна технологія енергоаудиту будівель як складова енергетичної безпеки країни» за етапом 1 «Аналіз існуючих нормативних вимог та європейського досвіду з проведення енергоаудиту будівель. Формування відповідних рекомендацій, що враховують національні та міжнародні стандарти і норми з випробувань», що виконується Інститутом загальної енергетики НАН України за результатами проведення конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди» Національного фонду досліджень України, впроваджені ТОВ «Буд-Буд» у вигляді звіту.

Назва результату НДР, що впроваджується	Форма упровадження	Ефект від впровадження
Номенклатура low-cost сенсорів вимірювальних модулів для дослідження параметрів мікроклімату приміщень	Звіт за результатами 1-го етапу виконання проекту	Запропонована номенклатура сенсорів дозволила значно розширити перелік характеристик моніторингу забруднення повітря в приміщеннях, що дало можливість сформуванню комплексний підхід до дослідження параметрів мікроклімату приміщень
Удосконалена методика контролю теплового опору із застосуванням CFD моделі об'єкта контролю		Запропонована методика дала можливість знизити вплив інструментальних та суб'єктивних факторів на процес моніторингу з урахуванням кондуктивного та конвективно-радіаційного теплообміну, що дало можливість підвищити достовірність контролю огорожувальних конструкцій

Заст. директора з науково-організаційної роботи ІЗЕ НАН України,
д.т.н., старш. дослідник

А.О. Запорожець

С.п.с. ІЗЕ НАН України,
к.т.н., старш. дослідник

О.Л. Декуша

С.Ю. Корнієнко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ІТТФ НАН України
академік НАН України


_____ Ю.Ф. Снежкін
« 18 » _____ 12 _____ 2018р.


ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ДП «НТЦ НТ НАН України»


_____ В.О. Гурін
« 18 » _____ 12 _____ 2018р.



**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів наукової роботи**

Даний акт складено про впровадження результатів науково-технічного проекту Інституту технічної теплофізики НАН України «Розроблення та впровадження системи моніторингу теплового опору огорожувальних конструкцій будівель» в рамках договору № 579 про партнерське виконання науково-технічного проекту.

Згідно з пунктом 1.2.2 впроваджено програмний модуль реєстрації та опрацювання вимірювальної інформації.

Згідно з пунктом 1.2.3 впроваджено методику випробувань на основі тепловізійного аналізу огорожувальних конструкцій (ISO 6781:2015) та визначення теплотехнічних показників навколишнього середовища з контактними вимірюваннями значень поверхневої густини теплового потоку та температури (ISO 9869:2014)

Відповідно до пункту 3.1 ІТТФ НАН України набуває майнових прав на об'єкти права інтелектуальної власності, технології, що створені під час виконання цього науково-технічного проекту.

/ Зав. відділом МОТП
ІТТФ НАН України
чл.-кор. НАН України



В.П. Бабак

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту
технічної теплофізики НАН України
академік НАН України



Ю.Ф. Снежкін

2021 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
науково-технічної розробки ІТТФ НАНУ

Дійсний акт складено про те, що відповідно до науково-технічного проекту №: 19 1.7.1.902 "Інформаційно-вимірювальна система теплофізичних характеристик матеріалів та виробів» Інститутом технічної теплофізики НАН України виконана уся робота, результати якої впроваджені в ІТТФ НАН України, при цьому:

1. Розроблено конструкторську документацію та виготовлено деталі та вузли Інформаційно-вимірювальної системи теплофізичних характеристик матеріалів та виробів (ІВС ТФХ).

2. Проведено складання, електричний монтаж та первинне налаштування ІВС ТФХ.

3. Проведена перевірка методик роботи ІВС ТФХ при вимірюваннях теплопровідності твердих та м'яких теплоізоляційних матеріалів, теплоти гідратації бетонів, теплоємності, коефіцієнту емісії поверхонь.

4. Розроблена методика калібрування ІВС ТФХ, яка базується на вимірюванні фізичних величин, які метрологічно забезпечені в Україні. Проведено оцінювання метрологічних характеристик ІВС ТФХ.

Характеристики створеної ІВС ТФХ відповідають вимогам Технічного завдання до науково-технічного проекту №: 19 1.7.1.902.

ІВС ТФХ впроваджено в ІТТФ НАН України для визначення теплопровідності та інших теплофізичних характеристик матеріалів та виробів.

ВИКОНАВЦІ

Науковий керівник роботи
зав. відділу МОТП
чл.-кор. НАН України

 В.П. Бабак

Відповідальний виконавець
старший наук. співробітник, к.т.н.

 О.Л. Декуша

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ІТТФ НАН України
академік НАН України




Ю.Ф. Снежкін

« 18 » 12 2018р.

**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів наукової роботи**

Даний акт складено про впровадження результатів науково-технічного проекту №1.7.1.884 «Розроблення та впровадження системи моніторингу теплового опору огорожувальних конструкцій будівель» від 03 вересня 2018р.

Впроваджена система моніторингу теплового опору огорожувальних конструкцій будівель та програмний пакет реєстрації та опрацювання вимірювальної інформації, заявка на «Прилад для вимірювання теплового опору огорожувальних конструкцій», комбіновану методику випробувань на основі тепловізійного аналізу огорожувальних конструкцій (ISO 6781:2015) та визначення теплотехнічних показників навколишнього середовища з контактними вимірюваннями значень поверхневої густини теплового потоку та температури (ISO 9869:2014)

Відповідно до пункту 4.1 установа-виконавець ІТТФ НАН України набуває майнових прав на об'єкти права інтелектуальної власності, технології, які створені під час виконання цього науково-технічного проекту.

/ Зав. відділом МОТП
ІТТФ НАН України
чл.-кор. НАН України



В.П. Бабак

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту
технічної теплофізики НАН України
академік НАН України


Ю.Ф. Снежкін
19.12 2021 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТОВ "МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
УКРАЇНИ"


В.В. Коврига

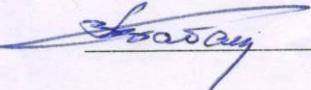
АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів науково-технічної роботи ІТТФ НАНУ

Даний акт складено про впровадження результатів, отриманих Інститутом технічної теплофізики НАН України при виконанні науково-технічного проекту №: 19 1.7.1.902 "«Інформаційно-вимірювальна система теплофізичних характеристик матеріалів та виробів».

Із застосуванням розроблених в ІТТФ НАН України апаратури та методики проведено визначення теплофізичних характеристик матеріалів, які застосовує ТОВ "МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ УКРАЇНИ" у своїй роботі, що забезпечує підвищення енергоефективності виробництва.

Зав. відділу МОТП ІТТФ НАН
України
чл.-кор. НАН України

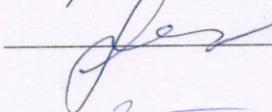

В.П. Бабак

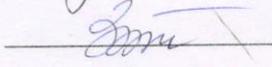
Старший наук. співробітник, к.т.н.


О.Л. Декуша

Представники ТОВ "МЕТАЛЕВІ
КОНСТРУКЦІЇ УКРАЇНИ"


О.С. Ренкас


О.М. Макарчук


І.А. Зарицкий

ДОДАТОК Г

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Hotra, 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., Красильников, 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. *Trajectoriâ 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