

Заступнику голови спеціалізованої  
вченої ради Д 26.223.01  
Інституту загальної енергетики  
НАН України  
академіку НАН України,  
доктору технічних наук,  
професору  
Кулику Михайлу Миколайовичу

## ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук,  
старшого наукового співробітника Зайцева Євгена Олександровича  
на дисертаційну роботу **Декуши Олега Леонідовича**  
**«Науково-практичні засади неруйнівного контролю терморадіаційних  
та теплофізичних характеристик матеріалів і виробів»,**  
яку подано до захисту на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 5.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу  
речовин.

### **Актуальність теми дисертації**

За даними Європейського агентства з навколишнього середовища, домогосподарства споживають понад 25% від загального обсягу енергії, що робить їх одними з найбільших споживачів. Знизити енергоспоживання в побуті можна шляхом підвищення енергоефективності будівель, а також покращення теплоізоляції, що дозволить зменшити витрати на опалення та знизити загальне навантаження на енергетичну систему.

Від теплофізичних властивостей теплозахисної оболонки будівлі залежить кількість теплоти, що втрачається будинком взимку і надходить влітку. Це, в свою чергу, впливає на навантаження на системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря.

При цьому спостерігається розрив між прогнозованою та фактичною енергоефективністю будівель, причини якого можна розділити на три основні



категорії: проектування, будівництво та експлуатація. На етапі проектування основними причинами є невідповідність між фактичною та заявленою продуктивністю обладнання та теплозахисними властивостями теплоізоляції, використання неправильних методів та моделей компонентів у процесі моделювання та симуляції, розбіжності між проектними розрахунками та реальними умовами, а також відсутність врахування погіршення характеристик матеріалів з часом. На етапі будівництва основними причинами є невідповідність якості теплозахисних властивостей матеріалів проектній документації та зміни проекту. На етапі експлуатації основними причинами є зміна теплозахисних та терморадіаційних властивостей матеріалів і виробів з часом, вплив зовнішніх факторів, таких як вологість та сонячне випромінення.

Таким чином, неруйнівний контроль теплофізичних та терморадіаційних властивостей теплозахисної оболонки будівель на етапі експлуатації є надзвичайно актуальним завданням, необхідним для розробки ефективних заходів підвищення енергоефективності. Удосконалення існуючих методів контролю та впровадження нових технологій охоплює весь ланцюг процесу: від вибору методу, розробки сенсорів та вимірювальних підсистем, до аналізу отриманих даних та забезпечення їхньої метрологічної точності.

Тому, розроблення концептуального підходу до комплексного неруйнівного контролю основних показників під час обстеження теплоізоляційних оболонок, як складової частини енергоаудиту, а також створення сучасних засобів контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів і виробів, та відповідних методик їх реалізації, є актуальною науково-прикладною проблемою.

Обрана тема дисертації відповідає сучасним вимогам розвитку науки і техніки в енергетичній галузі України, оскільки пов'язана з актуальними науковими програмами та планами, що визначають пріоритетні напрямки досліджень.

## **Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій**

Наукова обґрунтованість дослідження забезпечується застосуванням сучасних методів математичного та комп'ютерного моделювання теплових процесів, використанням теорії інформаційно-вимірювальних систем при створенні апаратно-програмних рішень, математичної статистики та теорії невизначеності при аналізі результатів вимірювання. Для наведених в дослідженнях моделей проведена валідація на основі використання експериментальних даних.

Практична значимість та наукова обґрунтованість отриманих результатів підтверджуються їх широкою апробацією, патентуванням та успішним впровадженням у відповідних галузях.

## **Наукова новизна отриманих результатів**

Запропоновано новий концептуальний підхід до комплексного неруйнівного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів та виробів, що використовуються в огороджувальних конструкціях будівель, який ґрунтується на моделях полів інформативних параметрів та статистичних методах опрацювання експериментальних даних, що дало можливість покращити характеристики якості оцінок теплотехнічних показників оболонки будівлі.

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

Вперше запропоновано метод корекції результатів вимірювання теплового потоку шляхом компенсації температурного дрейфу, що дало змогу

зменшити невизначеність результатів вимірювання теплового потоку в натурних умовах.

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

Розвинуто науково-практичні засади створення нових сенсорів теплового потоку та удосконалено їхнє метрологічне забезпечення для здійснення вимірювань густини теплового потоку в діапазоні 1–10 Вт/м<sup>2</sup> та за наявності дрейфу температури, що дало змогу зменшити невизначеність результатів вимірювання густини теплового потоку.

### **Практична цінність і значення дисертаційної роботи**

Розроблено методику контролю на основі поєднання безконтактного тепловізійного аналізу огорожувальних конструкцій з можливостями контактних методів вимірювання поверхневої густини теплового потоку та температури, що дало змогу зменшити вплив суб'єктивного фактору на результати випробувань.

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

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

На підставі комп'ютерного моделювання та верифікації процесів складного радіаційного та конвективно-кондуктивного теплообміну під час

проведення контролю коефіцієнту емісії розроблено методику досліджень та визначено вимоги до сенсорів й апаратно-програмної частини системи.

Розроблено прилад контролю коефіцієнту емісії та програмний пакет реєстрації та опрацювання експериментальних даних, що дало змогу реалізувати дослідження низки енергоефективних матеріалів та покриттів, які застосовуються в будівництві.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено на підприємствах, в наукових закладах та у навчальному процесі вищих навчальних закладах країни, про що свідчать наведені акти впровадження.

Наукові положення відповідають світовому рівню, про що свідчать 13 статей у періодичних виданнях, що індексуються наукометричними базами Scopus та Web of Science, одна з публікації надрукована у виданні з квантилем Q1, та 2 публікації у виданнях з квантилем Q2.

### **Оцінка змісту дисертаційної роботи**

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, виконаною і оформленою відповідно до вимог.

Робота містить анотацію на двох мовах, список публікацій автора, вступ, шість розділів, висновки, перелік використаних джерел та чотири додатки.

У *вступі* наведено загальну характеристику дисертаційної роботи. Проведено обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і об'єкт дослідження. Висвітлено практичну цінність і наукову новизну та впровадження отриманих результатів досліджень. Наведено відомості про особистий внесок в публікаціях та апробацію роботи.

*Перший розділ* роботи присвячений аналізу наукових публікацій та нормативних документів, що регулюють проведення теплотехнічних обстежень будівель. Було досліджено сучасні методи та обладнання для контролю теплового стану будівель, зокрема, для вимірювання теплового опору огорожувальних конструкцій. Автором обґрунтовано необхідність вдосконалення існуючих методик контролю, пропонуючи поєднання

тепловізійного аналізу з вимірюванням теплового потоку для підвищення точності та об'єктивності результатів.

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

У *другому розділі* обґрунтовано концептуальний підхід до комплексного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів та виробів, який ґрунтується на моделях полів інформативних параметрів та статистичних методах опрацювання даних.

Наведено математичну модель кліматичної компоненти метеорологічного поля при контролі теплового опору, з метою оцінювання основних факторів та метеорологічних параметрів, що впливають на теплообмін при дослідженні тепलोзахисної оболонки будівлі.

Розроблено комп'ютерну CFD модель, яка відтворює процеси складного теплообміну в огорожувальних конструкціях будівель під час проведення теплофізичних вимірювань. Модель враховує розташування та характеристики теплових сенсорів, що дозволяє оцінити їхній вплив на результати вимірювань.

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/м<sup>2</sup> 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.

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.

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання виявив необхідність коректування алгоритму обробки даних, отриманих від сенсорів приладу, через нелінійність та зміщення калібрувальної характеристики.

Проведено аналіз процесів теплообміну в нестационарній постановці задачі за допомогою комп'ютерного моделювання. Встановлено, що для виходу на стаціонарний режим приладу необхідно 30 хвилин.

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 модулі системи контролю теплового опору на 48 і 8 каналів та програмний пакет реєстрації та опрацювання інформації, яка забезпечує можливість проведення контролю на об'єктах, що мають складну форму.

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

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

Проведено комп'ютерне моделювання процесів теплообміну в системі для радіаційного калібрування сенсорів теплового потоку та визначення терморадіаційних характеристик.

Запроваджено комплексний підхід до визначення метрологічних характеристик сенсорів теплового потоку, які найчастіше використовуються для контролю теплового опору огорожувальних конструкцій. При цьому визначено основні метрологічні характеристики теплових сенсорів: чутливість, температурну залежність, час відгуку та коефіцієнт емісії

У *шостому розділі* наведено результати апробації методики, яка ґрунтується на поєднанні тепловізійного методу для якісного аналізу та кількісних контактних вимірювань температури поверхні та теплового потоку.

Приведено результати експериментальних досліджень розробленої системи контролю теплового опору огорожувальних конструкцій будівель в натурних та лабораторних умовах.

За допомогою приладу, який ґрунтується на диференційному калориметричному методу експрес-контролю коефіцієнту емісії, про дослідження з визначення коефіцієнту емісії різних видів скла та покриттів.

У *Висновках* наведено перелік наукових і науково-практичних результатів та рекомендацій. Отримані в дисертаційній роботі результати в сукупності є вирішенням науково-практичної проблеми, що полягає у створенні теоретичних засад неруйнівного контролю, 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.

У *Додатках* наведено свідоцтво про перевірку системи контролю теплового опору, акти впровадження дисертаційної роботи, розрахунки комп'ютерної

моделі до розділу 3, наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

Характеризуючи зміст роботи в цілому, слід визначити, що дослідження охоплює широкий спектр задач, починаючи від теоретичного обґрунтування методів неруйнівного контролю і закінчуючи розробкою практичних рекомендацій для їх застосування. У своїй роботі автор демонструє глибоке розуміння проблеми та пропонує комплексні рішення, які враховують сучасні тенденції розвитку науки і техніки в енергетичній галузі.

#### **Повнота відображення результатів у публікаціях та апробація роботи**

Зміст дисертаційної роботи відображено в 31 науковій публікації, зокрема в 21 публікації розкриває основний зміст дисертації, з яких 13 - у періодичних виданнях, що індексуються наукометричними базами Scopus та Web of Science, 1 - у фаховому виданні України віднесеному до категорії А, 3 - у фахових іноземних виданнях та виданнях України, 2 монографії, 2 патенти; одна з публікацій надрукована у виданні з квантилем Q1, та 2 публікації у виданнях з квантилем Q2. Крім того, наявні 5 публікацій у збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій, з яких 4 у виданнях, що індексуються наукометричними базами Scopus та Web of Science та 5 публікацій, які додатково розкривають зміст дисертаційної роботи.

Представлені в дисертації результати досліджень були апробовані на науково-технічних та науково-практичних конференціях, зокрема на таких: 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.

В публікаціях основні результати викладено в повній мірі, в працях, які опубліковано у співавторстві, відображено особистий внесок здобувача.

### **Зауваження до дисертації**

1. У розділі 2, пункті 2.3, зазначено, що радіаційний теплообмін описано за допомогою моделі дискретного переносу (Discrete Transfer). Однак, не вказано кількість променів, що є важливим параметром під час використання цієї моделі і може суттєво вплинути на точність отриманих результатів.

2. У розділі 2, пункті 2.3, на рисунках 2.16 та 2.17 вибрано невдалий масштаб, що ускладнює визначення того, що різниця між значеннями температури сенсора, досліджуваної поверхні поблизу сенсора і поверхнею оболонки не перевищує 0,02 К.

3. У розділі 3, пункті 3.3.2, під час проведення комп'ютерного моделювання процесів теплообміну приладу для дослідження різних видів скла не вказані коефіцієнти теплопровідності та теплоємності зразків. Ці параметри є важливими, оскільки вони безпосередньо впливають на процеси теплообміну і, відповідно, на точність моделювання.

4. У розділі 4 пункті 4.1 вказано, що коефіцієнт емісії поверхні сенсорів теплового потоку повинна бути близька до коефіцієнту емісії обстежуваної поверхні, але не надані рекомендації як цього досягти.

5. У розділі 4, пункті 4.2, під час апаратно-програмної реалізації системи контролю теплового опору теплозахисної оболонки будівель не наведено обґрунтування вибору інтерфейсу, що є важливим для побудови розгалужених вимірювальних систем.

6. В розділі 6 пункті 6.1 «Лабораторні випробування системи контролю теплового опору» на Рисунках 6.1 та 6.2 не наведені місця розташування

сенсорів температури та теплових потоків, що ускладнює можливість відтворення результатів лабораторних досліджень та їх перевірки.

7. В тексті дисертації зустрічаються випадки, коли поряд використовуються температурні шкали Цельсія і Кельвіна, що ускладнює аналіз результатів.

8. У тексті дисертаційної роботи зустрічаються стилістичні та граматичні помилки.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку отриманих автором результатів, несуть рекомендаційний зміст і є відкритими до обговорення.

#### **Загальні висновки**

Дисертаційна робота Декуши О.Л. «Науково-практичні засади неруйнівного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів і виробів» є завершеною науковою працею і написано технічно грамотною українською мовою. Роботу присвячено вирішенню науково-практичної проблеми 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, містить обґрунтовані наукові положення, висновки та рекомендації, має наукову новизну та практичну цінність.

Зміст дисертації відповідає паспорту спеціальності 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Реферат повністю відображає ключові положення дисертації та описує отримані результати.

Дисертація містить результати власних досліджень, у роботі відсутні академічний плагіат, фабрикації, фальсифікації.

За змістом, цілісністю, оформленням, науковим і практичним значенням вважаю, що дисертаційна робота Декуши О.Л. на тему «Науково-практичні засади неруйнівного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів і виробів» відповідає вимогам МОН України щодо оформлення дисертацій (наказ МОН України №40 від 12.01.2017 разом зі змінами згідно наказу МОН України №759 від 31.05.2019) та пунктам 7 та 9 Постанови Кабінету міністрів України від 17 листопада 2021 р. № 1197. Автор Декуша Олег Леонідович заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

**Офіційний опонент:**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу теоретичної електротехніки та діагностики електротехнічного обладнання Інституту електродинаміки НАН України

Євген ЗАЙЦЕВ

**Підпис засвідчую**

Вчений секретар

Інституту електродинаміки НАН України



Марина ГУТОРОВА