ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічнних наук,
професора Ромаки Володимира Афанасійовича
на дисертаійну 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 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин.

Актуальність теми дисертації

Директива ЄС з енергоефективності ЄС/2023/1791 Європейського Парламенту та Ради від 13 вересня 2023 року сформулювала амбітну мету щодо скорочення споживання енергії до 2030 року. Для цього запроваджено низку заходів, які стимулюють покращення показників енергоефективності на всіх етапах від виробництва до споживання енергетичних ресурсів, включаючи впровадження принципу «спочатку енергоефективність».

Одним із секторів з високим потенціалом енергозбереження є домогосподарства. За оцінками Європейського агентства з навколишнього середовища (ЕЕА), їхнє кінцеве енергоспоживання складає близько 25% від загального енергоспоживання у всіх секторах економіки. Зниження енергоспоживання домогосподарств може призвести до значної економії коштів на енергоносії, зменшення викидів парникових газів та підвищення рівня енергобезпеки.

Одним із шляхів реалізації заходів з енергозбереження є підвищення теплозахисних характеристик будівель та споруд. Зокрема, важливим питанням є забезпечення контролю теплофізичних характеристик матеріалів та виробів на всіх етапах від їхнього виробництва до натурних випробувань теплозахисних оболонок будівель.

Провідні світові організації у сфері стандартизації та сертифікації, а також науково-дослідні інститути та університети постійно працюють над створенням нових методів та стандартів вимірювання теплоізоляційних характеристик

ІНСТИТУТ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ НАН України
Ідентифікаційний код 04589627
Вхідний № 26
"20" 08 2024 р.

будівель, які мають забезпечити необхідну точність вимірювання та достовірність контролю оболонок будівель.

Зміна клімату, підвищення вимог до теплового опору будівель та широке застосування нових утеплювачів зумовили потребу у вимірюванні малих значень густини теплового потоку в натурних умовах, а також у врахуванні терморадіаційних характеристик покриттів матеріалів та виробів.

Все перелічене вище вимагає створення нових засобів вимірювання та контролю терморадіаційних і теплофізичних характеристик матеріалів і виробів та розроблення відповідних методичних рекомендацій щодо їхнього використання.

Значення такого параметру контролю як тепловий опір теплозахисної оболонки, для нових та модернізованих будівель може перевищувати 4 К/Вт·м^2, а зміна клімату призвела до зменшення перепаду температури між зовнішнім та внутрішнім середовищем будівель, що, в свою чергу, призвело до зменшення значень поверхневої густини теплового потоку, які необхідно вимірювати. Крім того, при натурних та лабораторних випробуваннях теплового опору теплозахисної оболонки будівель спостерігаються коливання температури внутрішнього середовища, що робить необхідним вимірювання нестаціонарної поверхневої густини теплового потоку.

Тому, ***розроблення концептуального підходу до комплексного неруйнівного контролю*** основних показників при проведенні обстеження теплоізоляційних оболонок як складових частини енергоаудиту та створення сучасних засобів контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів і виробів та відповідних методик їхньої реалізації **є актуальною науково-прикладною проблемою**.

Актуальність теми дисертації підтверджується також її зв'язком з науковими програмами, планами, темами за приоритетними напрямками розвитку науки і техніки відповідно до державної енергетичної політики України.

Від теплофізичних властивостей огороджуючих конструкцій залежить кількість теплоти, що втрачається будинком у холодну пору року і входить до нього за теплої погоди. Це, в свою чергу, визначає навантаження на системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря і їхню вартість, впливає на сталість температурного режиму в об'ємі приміщення з часом (при зміні температури, швидкості повітря зовні будинку, тепловіддачі системи опалення, температури на внутрішній поверхні огороджуючої конструкції).

При проектуванні зовнішніх огороджуючих конструкцій будинків необхідно вирішувати завдання взаємозв'язаного нестаціонарного тепломасопереносу, ускладненого нелінійністю теплофізичних характеристик матеріалу конструкцій (найчастіше багатошарових), фільтрацією вологого повітря, фазовими перетвореннями вологи, при змішаних граничних умовах.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій

Обґрунтованість наукових положень та результатів у роботі забезпечується коректним застосуванням методів математичного й комп'ютерного моделювання процесів складного теплообміну в об'єктах та системах контролю теплофізичних і терморадіаційних характеристик матеріалів та виробів, використанням методів математичної статистики, концепції невизначеності, достовірності контролю для оцінки отриманих експериментальних даних, валідацією відповідних моделей на основі використання експериментальних даних, які отримані на системах, що відповідають міжнародним стандартам.

Крім того, про достатньо високий рівень достовірності наукових положень та результатів свідчать дані про апробацію, патентування та впровадження отриманих результатів дисертаційного дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів

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

2. 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.

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

4. Удосконалено метод контролю теплового опору шляхом застосування комп'ютерної Computational Fluid Dynamics моделі об'єкта контролю, що дало можливість знизити вплив інструментальних факторів на достовірність 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 здійснення вимірювань густини теплового потоку в діапазоні 1–10 Вт/м^2 та за наявності дрейфу температури, що дало змогу зменшити невизначеність результатів вимірювання густини теплового потоку.

Практична цінність і значення дисертаційної роботи

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

2. 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.

3. Проведено апробацію методики та системи контролю в лабораторних та натурних умовах, що дало змогу визначити достовірність контролю теплотехнічних показників огороджувальних 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 досліджень та визначено вимоги до сенсорів й апаратно-програмної частини системи.

5. 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 дев'ять актів 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 квартилем Q1, та 2 публікації у виданнях з квартилем Q2.

Оцінювання змісту дисертаційної роботи

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

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

У вступі розкрито актуальність напряму досліджень та обґрунтовано вибір теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, наведено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок здобувача, вказано зв'язок з науковими програмами, темами, планами, грантами, методи досліджень, стан публікацій та апробація 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 та споруд. Розглянуто апаратне забезпечення, що застосовується для контролю теплотехнічного стану оболонки будівлі та споруд в натурних та лабораторних умовах, визначено вимоги до систем контролю, за допомогою яких проводяться дослідження теплового опору елементів теплозахисної оболонки будівлі. Показано, 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 (Міжнародний стандарт ISO 6781) і вимірювання значень поверхневої густини теплового потоку і температури (Міжнародний стандарт 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 проведені 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 їхніх 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/м^2 за наявності дрейфу температури.

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

метод придатний 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 калориметричний 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.

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, яка забезпечує 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 калориметричний 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 комп'ютерне моделювання процесів теплообміну в установці для радіаційного калібрування сенсорів теплового потоку та визначення терморадіаційних характеристик.

Запроваджено комплексний підхід до визначення метрологічних характеристик біметалевих та напівпровідникових сенсорів теплового потоку,

які найчастіше використовуються для контролю теплового опору огороджувальних конструкцій.

У шостому розділі наведено результати експериментальних досліджень розробленої системи контролю теплового опору огороджувальних конструкцій будівель та приладу для визначення коефіцієнту емісії.

Висновки містять розгорнутий 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 їхнього впровадження при проведенні обстеження теплоізоляційної оболонки, як складової частини енергетичного аудиту, що забезпечує підвищення достовірності оцінювання теплотехнічних показників огороджувальних конструкцій.

У Додатках наведено свідоцтво про повірку 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, необхідно визначити комплексність та багатогранність задач, розв'язаних автором на шляху вдосконалення існуючих систем неруйнівного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів і виробів, детальний аналіз запропонованих науково-практичних підходів та рішень. Запорукою успішного виконання завдань дисертаційної роботи є запровадження здобувачем наукових досліджень із проблем, які формально належать до різних наук. Саме результати наукових досліджень, отримані на стиках кількох наукових напрямів, стали запорукою створення здобувачем теоретичних засад неруйнівного контролю, розроблення та практичного застосування засобів та методів комплексного контролю терморадіаційних й теплофізичних характеристик матеріалів.

Можемо стверджувати, що результати дисертаційного дослідження Декуші О.Л. є дорожньою картою створення засобів моніторингу об'єктів енергетики, а отримані ним нові наукові результати засвідчують їхню ***конкурентність*** на ринку ідей та реальних розроблень засобів дистанційного контролю.

Представлене дисертаційне дослідження, поряд із роботами по моніторингу забруднення повітря об'єктами енергетики (А.О. Запорожець), дистанційного моніторингу стану об'єктів енергетики, зокрема, високовольтних ліній електропередач (С.В. Бабак), густини теплового потоку (С.І. Ковтун) тощо є вагомим внеском у створення глобальної системи моніторингу енергетичної системи України.

Повнота відображення результатів у публікаціях та апробація роботи

Зміст дисертаційної роботи відображено в 31 друкованих наукових працях, зокрема 21 публікація, в яких розкривається 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 України на винахід; одна з публікацій надрукована у виданні з квартилем Q1, та 2 публікації у виданнях з квартилем Q2, що відповідно п. 2 наказу МОН від 23.09.2019 № 1220 «Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», кількісно у сукупності із зазначеними вище публікаціями прирівнюються до 27 публікацій, які розкривають основні наукові результати дисертації. 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 доповідалися на 7 міжнародних і національних науково-технічних та науково-практичних

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

Зміст реферату ідентичний до змісту основних положень дисертації та повністю відображує сутність отриманих результатів.

Зауваження до тексту дисертації

1. У роботі повсякчас, зокрема, у меті дослідження, положеннях наукової новизні та у висновках використовується узагальнене словосполучення «*контроль характеристик матеріалів та виробів*» без уточнення про які матеріали йде мова. Адже різні будівельні матеріали та конструкції володіють різною теплоємністю, теплопровідністю тощо. Яким чином це було враховано при моделюванні теплових потоків?

2. У будівлях та спорудах існують, як правило, системи пасивного та примусового вентилювання повітря, димоходи тощо, які є каналами витоку теплових потоків. Однак у дисертаційній роботі при аналізі теплоізоляційної оболонки будівель та споруд як складової частини енергетичного аудиту такі теплові потоки не враховано.

3. У розділі 2, пункті 2.3 не обґрунтовано вибір характерної ділянки для проведення комп'ютерного моделювання.

4. У розділі 3. п 3.3, не достатньо обґрунтована мета проведення побудови додаткової комп'ютерної CFD Моделі процесів теплообміну приладу для експрес-контролю коефіцієнту емісії, при тому, що у п. 3.2.2 наведено результати комп'ютерного моделювання теплообміну при диференціальному включенні комірок та побудована калібрувальна характеристика приладу.

5. У розділі 4, п. 4.2, запропоновано модуля реєстрації первинних даних на 8 каналів з використанням термоелектричних перетворювачів температур, в якому не показано яким чином реалізована компенсація «холодних спаїв», та не вказано вплив на невизначеність результатів вимірювання температури.

6. У представленій роботі детально описано метрологічне забезпечення експериментальних вимірювань та процесів моделювання. Однак на численних графіках досліджень відсутня інформація про значення невизначеності, що утруднює їхнє сприйняття.

7. У роботі подекуди зустрічаються граматичні та стилістичні помилкики.

Загальні висновки

Дисертаційна робота Декуши О.Л. «Науково-практичні засади неруйнівного контролю терморадіаційних та теплофізичних характеристик матеріалів і виробів», є завершеною, цілосною науковою працею, присвяченою 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 обгрунтовані наукові положения, 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.

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

Представлена дисертаційна робота Декуші О.Л. не містить результатів досліджень його кандидатської дисертації.

За змістом, оформленням, обсягом, науковою новизною і публікаціями, важливістю та глибиною вирішення актуальних задач 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 та її 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, професор
кафедри захисту інформації,
Інституту комп'ютерних технологій, автоматики та метрології
Національного університету «Львівська політехніка»

Володимир РОМАКА

Підпис Володимира РОМАКИ засвідчую:
Вчений секретар Національного університету
«Львівська політехніка», к.т.н., доцент

Роман БРИЛИНСЬКИЙ