

В спеціалізовану вчену раду Д 35.052.21  
Національного університету „Львівська політехніка”

## ВІДГУК

офіційного опонента, к.т.н., с.н.с. Воробйова Л.Й  
на дисертаційну роботу Дзіковської Юлії Миколаївни «Нормативно-технічне забезпечення вимірювань розподілу температури теплового поля об'єктів промисловості та медицини», представлену на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення.

### **1. Актуальність теми дисертації та її зв'язок з державними і галузевими науковими програмами.**

Методи тепловізійних вимірювань дають можливість проводити ефективні дослідження та дистанційно отримувати інформацію про розподіл температури поверхні об'єктів дослідження. За останні два-три десятиліття тепловізори стали поширеними засобами досліджень, діагностики і контролю якості. В той же час, при тепловізійних обстеженнях часто спостерігаються значні методичні похибки вимірювань, які можуть перевершувати інструментальні похибки у декілька разів. Тому актуальним є розвиток методів вимірювань, які дозволяють компенсувати вплив зовнішніх впливних факторів, а також створення відповідних методик та нормативних документів. Створенню саме таких методів і документів присвячена робота Ю.М. Дзіковської.

Задачі, які вирішуються в дисертаційній роботі, є актуальними і доцільними як в суто теоретичному аспекті для врахування впливу на результати вимірювань коефіцієнта випромінення, пропускання проміжного середовища та фонового випромінення, так і в практичному аспекті, оскільки дають змогу вдосконалити нормативно-технічне забезпечення тепловізійних досліджень на основі розроблення методів вимірювань і формування методик опрацювання результатів. Актуальність теми дисертаційної роботи підтверджується тим, що дослідження проводилися відповідно до держбюджетної наукової кафедральної теми «Розроблення методів та методик вимірювання температури за випроміненням» (реєстраційний № 01116U006726).

Отже, тема дисертаційної роботи Ю.М. Дзіковської, без сумніву, є актуальною.

### **2. Загальна характеристика структури та змісту дисертаційної роботи.**

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку використаних джерел з 153 найменувань та додатків. Основний зміст роботи викладений на 139 сторінках, включаючи 32 рисунки та 13 таблиць.

*У вступі* обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету і задачі досліджень; наведено дані про зв'язок дисертації з науковими програмами, темами; визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів досліджень; наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію результатів, публікації, структуру та обсяг роботи.

*У першому розділі* подано інформацію про сучасні тепловізори, які дозволяють використовувати їх для контролю температури у широкому діапазоні, з високою швидкістю та можливістю динамічної візуалізації. Їх застосування є актуальним в багатьох галузях промисловості та медичній діагностиці. Показано, що при застосуванні тепловізорів як засобів вимірювання температури поверхонь об'єктів, непевність результатів дослідження є високою внаслідок недосконалості нормативно-технічного забезпечення тепловізійної техніки. Низька точність вимірювання температури за інфрачервоним випроміненням зумовлена відсутністю апріорної інформації про значення впливних факторів, а саме коефіцієнта випромінення поверхні об'єкта дослідження, пропускання проміжного середовища та фонового випромінення. Показана необхідність врахування дії впливних факторів умов експлуатації тепловізорів та доцільність проведення додаткового калібрування в робочих умовах експлуатації. На підставі проведеного аналізу сформульована мета роботи - вдосконалення нормативно-технічного забезпечення вимірювань температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням для об'єктів промисловості й медицини шляхом розроблення методів вимірювання та методик опрацювання їх результатів.

*У другому розділі* розроблено методику аналізування та оцінювання непевності вимірювання температури та градієнта температури поверхні об'єкта за інфрачервоним випроміненням, що дозволяє визначати вплив різних факторів на різні типи та складові непевності.

Для аналізу та оцінювання непевності вимірювання температури та градієнта температури тепловізором запропоновано поділ непевності типу В на дві складові, а саме інструментальну складову та складову непевності методу проведення тепловізійних досліджень. Це дає змогу розробити заходи по їх зменшенню, а також забезпечує формування основ методу вимірювання температури за інфрачервоним випроміненням у промислові та медицині, що передбачає врахування впливних факторів. За результатами аналізу складових непевності сформовано бюджет непевності тепловізійного дослідження.

Проведено моделювання непевності вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням, результати опрацювання якого дозволяють користувачеві проводити тепловізійне дослідження із наперед заданим значенням непевності або ж вибирати такі умови проведення

дослідження, за яких він не перевищуватиме вибраної оцінки точності результатів вимірювання.

*У третьому розділі* розроблено двоспектральний метод вимірювання температури за інфрачервоним випроміненням поверхні об'єкта дослідження та методику калібрування тепловізора в робочих умовах експлуатації з метою врахування впливних факторів на результати вимірювання температури.

Проведено аналіз вибору конкретних значень довжин хвиль для спектральних смуг за принципом «смуга в смузі» та розглянуто можливі шляхи реалізації двосмугового вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням.

Обґрунтовано доцільність використання площинного сірого випромінювача для реалізації запропонованих методу та методики. Сформовано вимоги до нього та запропоновано варіанти конструкції для різних об'єктів та умов проведення дослідження.

Для підтвердження можливості запропонованого методу забезпечити підвищення точності вимірювання температури та градієнта температури поверхні об'єкта дослідження проведено моделювання його реалізації. Показано, що метод дозволяє значно підвищити точність результатів вимірювання температури залежно від умов проведення.

*У четвертому розділі* розглянуті експериментальні дослідження та моделювання вимірювання температури та визначення розподілу температури поверхні різних об'єктів, які підтвердили проведені теоретичні напрацювання.

Розроблено методику розрахунку тепловтрат за результатами тепловізійного дослідження, що дає змогу кількісно оцінити тепловтрати об'єктів будівництва. Розроблено проект стандарту «Методика тепловізійних досліджень будівель».

Розроблено рекомендації щодо умов і порядку організації тепловізійних досліджень в медицині, що дозволяють скорегувати процес тепловізійного медичного діагностування з врахуванням фізіологічних особливостей організму людини.

Розроблено програму навчання персоналу з неруйнівного контролю по тепловому методу з використанням тепловізійної техніки.

*У висновках* по дисертаційній роботі наведені основні результати проведених досліджень, а саме показано, що вирішено науково-прикладну задачу вдосконалення нормативно-технічного забезпечення вимірювань температури за інфрачервоним випроміненням для об'єктів промисловості й медицини шляхом розроблення методів, засобів та методик забезпечення тепловізійних досліджень.

*Додатки* містять інформацію про засоби тепловізійної техніки, нормативні документи у галузі тепловізійних вимірювань, аналіз джерел виникнення

непевності вимірювань температури та бюджет непевності, проект розробленого стандарту та акти про впровадження результатів дисертаційної роботи.

### **3. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій.**

Обґрунтованість та достовірність наукових положень і висновків дисертації забезпечена використанням сучасних приладів для досліджень, відомої та перевіреної теорії оптичного випромінення, використанням апробованих коректних методів математичного та імітаційного моделювання, а також використанням концепції непевності вимірювань для оцінювання результатів тепловізійних досліджень.

Апробація основних наукових положень дисертації проведена на 11 міжнародних та всеукраїнських науково-технічних і науково-практичних конференціях, що відповідають тематиці роботи.

### **4. Значущість роботи для науки і практики.**

#### **4.1 Наукова новизна одержаних результатів.**

1. Вперше отримано аналітичні вирази коефіцієнтів чутливості впливних факторів, які спричинюють непевність типу В для методу вимірювання температури за інфрачервоним випроміненням, що дало змогу оцінити цю складову непевності та підвищити достовірність визначення сумарної непевності результатів тепловізійних досліджень.

2. Удосконалено метод вимірювання температури та градієнта температури тепловізором на основі опрацювання вихідних сигналів кожного його приймача випромінення від сірого випромінювача й об'єкта дослідження в двох спектральних смугах, що дозволяє шляхом визначення значень впливних факторів автоматизувати процес їх врахування та підвищити точність результатів тепловізійних досліджень.

3. Обґрунтовано доцільність застосування еталонного «сірого випромінювача» для визначення за відбитим випроміненням коефіцієнта пропускання проміжного середовища і температури фону, що дало можливість реалізувати запропонований метод вимірювання температури та градієнта температури.

4. Розвинуто метод калібрування тепловізора на місці експлуатації шляхом уточнення функції калібрування, що дає змогу врахувати дію впливних факторів на вихідний сигнал приймачів випромінення тепловізора та підвищити точність результатів тепловізійного дослідження в робочих умовах.

#### **4.2 Практичне значення одержаних результатів.**

1. Запропонована методика оцінювання непевності вимірювання температури за інфрачервоним випроміненням дозволяє привести порядок організації роботи лабораторій неруйнівного контролю у відповідність із міжнародними стандартами.

2. Удосконалена методика калібрування тепловізора в робочих умовах на місці експлуатації забезпечує врахування дії впливних факторів у функції перетворення тепловізора.

3. Розроблені варіанти конструкції площинного сірого випромінювача дозволяють реалізувати запропонований метод вимірювання температури й методику калібрування тепловізора на місці експлуатації.

4. Сформований проект стандарту «Методика тепловізійних досліджень будівель» для проведення якісного тепловізійного обстеження та кількісного аналізу розподілу температури на поверхні будівлі.

5. Запропоновані рекомендації щодо умов і порядку організації тепловізійних досліджень у медицині, що враховують фізіологічні особливості організму людини та фізичні засади вимірювання температури, дозволяють підвищити точність результатів вимірювань.

6. Розроблена програма навчання персоналу з неруйнівного контролю по тепловому методу з використанням тепловізійної техніки.

### **5. Повнота викладення основних результатів дисертації в наукових фахових виданнях.**

Основні результати, отримані при виконанні дисертаційної роботи Ю.М. Дзіковської достатньо повно опубліковані у 17-ти наукових працях, у тому числі у 5 статтях у наукових фахових виданнях України, з яких 3 статті - у виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах даних. Основні результати досліджень неодноразово обговорювалися на міжнародних та українських наукових конференціях. Зміст автореферату відповідає основним положенням дисертаційної роботи.

### **6. Зауваження щодо змісту й оформлення дисертації.**

До дисертаційної роботи є низка зауважень:

1. Стор. 18. У поясненнях до формули (1.3) вказано, що « $L_f$  - енергетична яскравість *відбитого від поверхні об'єкта* фонового випромінення (ФВ) сторонніх об'єктів». Насправді ж, з самої формули та наступних досліджень і перетворень слідує, що це - енергетична яскравість фонового випромінення, що *надходить на поверхню об'єкта* від сторонніх об'єктів.

2. На стор. 94 вказано, що «ASTM зазначає, що розмір досліджуваної поверхні для ТМВ повинен забезпечувати отриманням ТМВ **99 % усієї енергії випромінення досліджуваного об'єкта**». Насправді ж, стандарт має на увазі, що 99% енергії випромінення, яке надходить до об'єктиву термометру випромінення, повинно надходити від досліджуваного об'єкта.

3. На стор.100 у формулі (3.16) коефіцієнт форми для визначення коефіцієнту випромінення поверхні площинного сірого випромінювача поданий як деяка невизначена функція від розмірів конусів на поверхні та їх кількості на

одиницю площі. Доцільним було би навести конкретну розрахункову формулу для обчислення коефіцієнту форми.

Крім того, при вимірюваннях за допомогою тепловізора з матрицею чутливих елементів, необхідно враховувати обмеження мінімальної кількості конусів або інших елементів поверхні площинного сірого випромінювача, що припадає на один піксель зображення. Така мінімальна кількість визначається необхідною точністю задання коефіцієнту випромінення.

4. Пропонується визначати значення коефіцієнту випромінення ПСВ за формулою (3.17) як відношення вихідного сигналу контактного термометра до вихідного сигналу безконтактного термометра.

По-перше, не зрозуміло, чому сигнал контактного термометра представлений як функція довжини хвилі.

По-друге, співставлення вихідних сигналів різнорідних приладів, є коректним тільки якщо вони мають однакову розмірність та чутливість.

Насправді, значення коефіцієнту випромінення ПСВ можна обчислити як відношення густини теплового потоку випромінення обчисленої за вихідним сигналом безконтактного термометра до густини теплового потоку випромінення абсолютно чорного тіла, обчисленого за значенням температури, виміряним контактним термометром.

5. На стор.125 – 127 кілька разів згадується, що зовнішній теплообмін поверхні будівлі є променевим, а на стор. 130 – 131 вказано, що втрати теплоти, які відбуваються через теплове випромінення, становлять 50 - 80% загального теплового потоку.

Насправді ж, як на внутрішній, так і на наріжній поверхнях огорожувальних конструкцій будівель відбувається складний радіаційно-конвективний теплообмін. Наведені в дисертації дані про частку тепловтрат через теплове випромінення характерні тільки для внутрішньої поверхні, а для зовнішньої поверхні конвективні тепловтрати можуть значно перевищувати радіаційні. Оскільки тепловізійне обстеження будівель проводять переважно ззовні, необхідно враховувати конвективні тепловтрати.

6. Формула (4.7) для густини теплового потоку з поверхні дефектної ділянки стіни будівлі подана без належного обґрунтування. На мій погляд, у формулі повинно використовуватись значення температури, виміряне на базовій ділянці за тих же умов обстеження.

7. У роботі наведена методика обчислення тепловтрат внаслідок наявності дефектної ділянки і оцінки фінансових збитків внаслідок цих тепловтрат.

По-перше, як зауважено вище, необхідно врахувати конвективні тепловтрати, наприклад, за відношенням сумарного нормативного та радіаційного коефіцієнтів теплообміну.

По-друге, погода і зовнішня температура змінюються у часі, а тепловізійне обстеження проводять за деяких конкретних умов теплообміну. Тому у методиці розрахунку тепловтрат за деякий тривалий період (місяць, опалювальний період) необхідно враховувати співвідношення зовнішньої температури під час обстеження та середньої температури за актуальний проміжок часу.

Слід зазначити, що вказані недоліки не зменшують наукової цінності дисертаційної роботи Ю.М. Дзіковської та не впливають на загальну позитивну оцінку проведених досліджень.

#### **7. Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам**

Дисертація Ю.М. Дзіковської в цілому представляє собою закінчене наукове дослідження, яке вирішує наукові та практичні задачі з нормативно-технічного забезпечення вимірювань розподілу температури теплового поля об'єктів промисловості та медицини. Основні наукові результати роботи опубліковані в фахових виданнях, що входять до переліку видань, затвердженому МОН України та у виданнях, що входять до наукометричних баз. Автореферат дисертації в цілому відображає її зміст. Дисертація відповідає вимогам до оформлення кандидатських дисертацій.

Все вищенаведене дозволяє стверджувати, що представлена робота відповідає вимогам до кандидатських дисертацій пп. 9, 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р. та внесеним до «Порядку...» змінам, а її авторка Дзіковська Юлія Миколаївна, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення.

Офіційний опонент  
кандидат технічних наук, с.н.с.,  
провідний науковий співробітник  
ІТТФ НАН України



Л.Й. Воробйов

Підпис Л.Й. Воробйова завіряю.

Вчений секретар ІТТФ НАН України  
кандидат технічних наук, с.н.с



О.І. Чайка