

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Дзіковська Юлія Миколаївна



УДК 006.91+536.5

**НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ
РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ
ОБ'ЄКТІВ ПРОМИСЛОВОСТІ ТА МЕДИЦИНИ**

05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України

Наукові керівники: доктор технічних наук, доцент
Гоц Наталія Євгенівна,
професор кафедри «Метрологія, стандартизація та
сертифікація» Національного університету «Львівська
політехніка»,
м. Львів, Україна

доктор філософії, професор
Пезеріл Томас,
професор Університету дю Мен (Université du Maine),
науковий співробітник Національного науково-
дослідного центру (Centre National de la Recherche
Scientifique),
м. Ле Ман, Франція

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Кошева Лариса Олександрівна,
професор кафедри біокібернетики та аерокосмічної
медицини Національного авіаційного університету,
м. Київ, Україна

кандидат технічних наук, старший науковий
співробітник
Воробйов Леонід Йосипович,
провідний науковий співробітник Інституту технічної
теплофізики Національної академії наук України,
м. Київ, Україна

Захист відбудеться «28» квітня 2017 року о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.21 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 28а, ауд. 713 п'ятого навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий «27» березня 2017 р.

*В.о. вченого секретаря спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., професор*



В.О. Яцук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Тепловізійні системи у промисловості та медицині відіграють важливу роль як ефективний дистанційний засіб отримання інформації про розподіл температури поверхні об'єктів дослідження за інфрачервоним випроміненням. Опрацювання та аналізування отриманих термограм, тобто зображень теплового поля об'єктів, забезпечують діагностування стану та порядку функціонування об'єкта, а просторово-часовий розподіл температури поверхні інформує про його зовнішню і внутрішню структуру, приховані дефекти та місця їхнього розташування. Як наслідок, ця інформація є вихідною при прийнятті рішення щодо проведення профілактичних заходів, ремонтних робіт чи лікування або є стимулом для призначення наступних уточнюючих досліджень.

На світовому ринку випуск тепловізорів представлений великою кількістю виробників: Fluke, CEM, DALI, Electrophysics, Testo AG, Wuhan Guide Infrared Co., IPI, IRay Technology Co., Irisys, IRtek, JENOPTIK/InfraTec, Chauvin Arnoux, SAT Infrared Technology та ін.. Зумовлено це насамперед присутністю на ринку високотехнологічної та відносно дешевої елементарної бази, зокрема матричних приймачів випромінення, застосуванням мікропроцесорного опрацювання сигналів і розробкою передового програмного забезпечення. Як наслідок, сучасні тепловізори є малогабаритними з низьким рівнем енергоспоживання, забезпечують високу швидкість та якісне тепловізійне зображення, широкий динамічний діапазон характеристик, зйомку та цифрове опрацювання в реальному масштабі часу, зв'язок із комп'ютерною технікою. Саме це і сприяє розширенню сфери використання тепловізорів у промисловості та медицині, однак низька точність вимірювань, а відповідно і некоректність результатів аналізування термограм, призводить до хибних висновків та прийняття помилкових рішень. Зумовлено це відсутністю або неврахуванням апріорної інформації про дійсні значення впливних факторів робочих умов експлуатації тепловізора, а саме, коефіцієнта випромінення поверхні досліджуваного об'єкта, пропускання проміжного середовища та фонового випромінення, що спричинює значну непевність методу вимірювання; відсутністю методик опрацювання результатів тепловізійних вимірювань з оцінюванням їх непевності; низьким рівнем підготовки персоналу до проведення тепловізійних досліджень.

Отже, для підвищення точності вимірювання температури та градієнта температури поверхні об'єктів у промисловості та медицині необхідне вдосконалення нормативно-технічного забезпечення тепловізійних досліджень на основі розроблення методів вимірювань і формування методик опрацювання результатів, що зумовлює актуальність даної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напряму кафедри метрології, стандартизації та сертифікації по розробленню теоретичних основ і технічних засобів для метрологічного забезпечення при вимірюваннях температури за випроміненням та проведення відповідної сертифікації персоналу. Дисертацію виконано в межах науково-дослідної роботи кафедри: наукової кафедральної теми

«Розроблення методів та методик вимірювання температури за випроміненням» (реєстраційний № 01116U006726).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є вдосконалення нормативно-технічного забезпечення вимірювань температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням у промисловості й медицині.

Для досягнення мети необхідно виконати такі завдання:

1. Дослідити особливості застосування тепловізорів у промисловості й медицині для вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням, проаналізувати фактори, що впливають на точність вимірювань.

2. Проаналізувати нормативно-технічне забезпечення вимірювань розподілу температури теплового поля об'єктів промисловості та медицини з метою виявлення проблемних питань, які стримують ефективне застосування тепловізійної техніки для якісного й кількісного аналізування результатів вимірювань, та визначити можливі шляхи їх вирішення.

3. Розробити методику оцінювання непевності результатів тепловізійних досліджень у промисловості та медицині.

4. Розробити метод визначення впливних факторів – коефіцієнтів випромінення, пропускання проміжного середовища, фонового випромінення – для отримання дійсних значень розподілу температури поверхні досліджуваного об'єкта.

5. Розробити методику калібрування тепловізора в робочих умовах експлуатації.

6. Провести моделювання реалізації запропонованих методу та методики, а також експериментальні тепловізійні дослідження з метою оцінювання доцільності застосування запропонованого нормативно-технічного забезпечення.

7. Сформулювати нормативно-методичні документи для забезпечення організації та проведення тепловізійних досліджень, а саме: програму навчання персоналу з неруйнівного контролю по тепловому методу з використанням тепловізійної техніки, проект стандарту методики тепловізійного дослідження та рекомендації щодо умов і порядку його проведення на прикладі окремих об'єктів промисловості та медицини.

Об'єкт дослідження: вимірювання параметрів теплового поля об'єктів промисловості та медицини з використанням тепловізора.

Предмет дослідження: нормативно-технічне забезпечення вимірювань температури та градієнта температури поверхні об'єктів промисловості й медицини за інфрачервоним випроміненням.

Методи дослідження. У дисертації використано основи теорії оптичного випромінення, зокрема термометрії за інфрачервоним випроміненням, для проведення аналізу фізичних основ тепловізійних вимірювань у промисловості та медицині, дослідження факторів, що впливають на точність результатів вимірювань; застосовано методи математичного та імітаційного моделювання для дослідження математичних моделей фізичних процесів тепловізійного дослідження; використано чисельні методи та концепцію непевності вимірювань для оцінювання результатів тепловізійних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів. У роботі отримані такі наукові результати:

1. Вперше отримано аналітичні вирази коефіцієнтів чутливості впливних факторів, які спричинюють непевність типу В від методу вимірювання температури та градієнта 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. Вперше 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 ("in-situ" calibration) 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.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Запропонована методика оцінювання непевності вимірювання температури та градієнта температури поверхні об'єктів за інфрачервоним випроміненням дозволяє привести порядок організації роботи лабораторій неруйнівного контролю у відповідність із розглянутими міжнародними стандартами.

2. Розроблений алгоритм проведення тепловізійних вимірювань дозволив реалізувати метод вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням поверхні об'єктів промисловості й медицини.

3. Удосконалена методика калібрування тепловізора в робочих умовах на місці експлуатації ("in-situ" calibration) забезпечує врахування дії впливних факторів у функції перетворення тепловізора.

4. Розроблені варіанти конструкції площинного сірого випромінювача дозволяють реалізувати запропонований метод вимірювання температури та градієнта температури й методику калібрування тепловізора на місці експлуатації для різних об'єктів та умов проведення тепловізійних досліджень.

5. Запропонована методика розрахунку тепловтрат будинку за результатами тепловізійного дослідження дозволяє визначити грошовий еквівалент втрат теплоти та оцінити окупність робіт по усуненню джерел їх виникнення.

6. Сформований проект стандарту «Методика тепловізійних досліджень будівель» для проведення якісного тепловізійного обстеження та кількісного тепловізійного аналізу залежно від вимог замовника у результаті вивчення його пріоритетів забезпечує раціональне використання коштів на дослідження.

7. 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.

8. Розроблена програма навчання персоналу з неруйнівного контролю по тепловому методу з використанням тепловізійної техніки може використовуватися для підвищення рівня його компетентності та підготовки до обов'язкової сертифікації з метою забезпечення застосування юридичної відповідальності за результати тепловізійного дослідження.

Основні положення та результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес кафедри метрології, стандартизації та сертифікації Національного університету «Львівська політехніка» для підвищення рівня підготовки фахівців напрямку 6.051002 Метрологія, стандартизація та сертифікація при вивченні дисциплін «Контроль та діагностування технологічних процесів» й «Основи метрологічного забезпечення».

Теоретичні дослідження дисертаційної роботи використано при проведенні калібрування термометра випромінення, вимірюванні температури та градієнта температури за допомогою тепловізора Raytek Ti20 на ТОВ СЦ «Харків-прилад».

Особистий внесок здобувача. У дисертації використані авторські розробки, ідеї, результати теоретичних та практичних досліджень, що відображені в наукових працях і представлені на конференціях, у роботі над якими автор брала безпосередню участь. Зокрема, у статтях, написаних у співавторстві, здобувачу належать: [1] – пропозиція проведення додаткового калібрування тепловізора у робочих умовах експлуатації та використання для цього площинного сірого випромінювача; [2] – алгоритм методу вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням із проведенням додаткового калібрування тепловізора в умовах експлуатації; формулювання основних вимог до конструкції площинного сірого випромінювача; [3] – методика визначення тепловтрат будинку за результатами тепловізійного дослідження та грошової оцінки приросту втрат теплоти; [4] – засади методики оцінювання непевності вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням поверхні досліджуваного об'єкта; [5] – формулювання основ забезпечення лінійності оптично-приймальної системи тепловізора; [6] – пропозиція застосування розробленого алгоритму процедури сертифікації електронних навчальних джерел із метою проведення сертифікації навчальних програм для персоналу з неруйнівного контролю по тепловому методу з використанням тепловізійної техніки.

Апробація результатів роботи. Основні положення й результати роботи доповідались та пройшли апробацію на всеукраїнських і міжнародних конференціях, а саме: Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и автоматизация – 2014», м. Одеса, 2014 р.; Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2015», м. Славське, 2015 р.; II Міжнародній науково-практичній конференції «Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи», м. Львів, 2015 р.; Міжнародній

науково-практичній конференції «Шляхи розвитку стандартизації, сертифікації й оцінки якості товарів і послуг», м. Херсон, 2015 р.; III Міжнародній науковій конференції «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах», м. Вінниця, 2015 р.; Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів та молодих вчених «Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах», м. Харків, 2015 р.; II Всеукраїнській науково-технічній конференції «Актуальні проблеми автоматики та приладобудування», м. Харків, 2015 р.; Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2016», м. Славське, 2016 р.; Conferences No. 21 «Problems and progress in metrology» of Metrology Commission of Katowice Branch of Polish Academy of Sciences, Szczyrk (Poland), 2016 р.; Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні технології одержання виробів різного функціонального призначення, їх стандартизація та сертифікація», м. Херсон, 2016 р.; XIII Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах» (КУСС-2016), м. Вінниця, 2016 р..

Публікації. За темою дисертації опубліковано 17 наукових робіт, у тому числі 5 статей у наукових фахових виданнях України, 3 статті у наукових періодичних виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз, 11 тез доповідей за результатами конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 153 найменувань та 11 додатків, викладена на 199 сторінках друкованого тексту, у тому числі основний зміст дисертації представлений на 139 сторінках, робота містить 32 рисунки та 13 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та завдання дослідження. Наведено зв'язок роботи з науковими програмами та темами. Охарактеризовано наукову новизну отриманих результатів та їх практичну цінність. Визначено об'єкт, предмет та методи дослідження. Відображено дані про особистий внесок здобувача, апробацію та публікації результатів.

У першому розділі дисертації проведено аналіз використання тепловізійної техніки для дослідження теплового поля об'єктів промисловості та медицини.

На основі аналізу фізичних засад вимірювань температури та градієнта температури (ГТ) за інфрачервоним випроміненням (ІЧВ), а також конструктивних особливостей сучасних моделей тепловізорів розроблено їх розширену класифікацію.

За результатами дослідження особливостей застосування тепловізорів у промисловості та медицині визначено спільну проблему цих сфер діяльності, а саме, низьку точність вимірювання точкових значень температури і, як наслідок, якісний характер результатів тепловізійного дослідження. Тому доцільним є розробка методик вимірювань, що забезпечуватимуть кількісне дослідження теплового поля об'єктів із підвищеною точністю.

Визначено, що проблеми низької точності зумовлені впливними факторами реальних умов проведення дослідження, зокрема випромінювальними

властивостями поверхні об'єкта дослідження, пропусканням проміжного середовища та фоновим випроміненням. Існуючі методи підвищення точності вимірювань температури та ГТ за ІЧВ, які використовуються при тепловізійних дослідженнях, не забезпечують необхідної точності. Як результат, доцільним є розроблення методу вимірювання температури та ГТ за ІЧВ, що враховуватиме вплив усіх факторів із можливістю його реалізації в реальних умовах експлуатації.

Встановлено, що внаслідок відмінностей значень впливних факторів у нормальних умовах калібрування від їх значень у реальних умовах проведення тепловізійних досліджень виникає значна методична похибка, яка може становити десятки відсотків. Це зумовлює доцільність проведення додаткового калібрування тепловізора щоразу при його застосуванні в реальних умовах експлуатації ("in-situ" calibration), а відповідно і розробку технічних засобів для його реалізації.

За результатами аналізування нормативного забезпечення визначено необхідність розробки методик виконання тепловізійних досліджень для конкретних об'єктів промисловості та медицини, методик додаткового калібрування тепловізора в реальних умовах експлуатації та опрацювання результатів вимірювань з оцінюванням їх непевності.

На основі аналізування порядку проведення тепловізійних досліджень встановлено, що особливої уваги вимагає кваліфікація персоналу, який проводить тепловізійні вимірювання, оскільки неправильне трактування результатів тепловізійних досліджень і наступне формування рекомендацій за ними призводять до матеріальних збитків у промисловості та завдання шкоди здоров'ю в медицині. Тому доцільним є підвищення рівня підготовки персоналу теплового методу з метою його обов'язкової сертифікації для забезпечення застосування юридичної відповідальності за результати тепловізійного дослідження.

Отже, у розділі визначено проблеми нормативного-технічного забезпечення вимірювань розподілу температури (РТ) теплового поля об'єктів промисловості та медицини й сформульовано завдання щодо його вдосконалення.

У другому розділі розроблено методику оцінювання непевності тепловізійних вимірювань для об'єктів промисловості та медицини згідно ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement.

Для формування цієї методики запропоновано рівняння сигналу для окремого приймача випромінення (ПВ) тепловізора $S_{p,q}(\lambda, T_{p,q})$ при вимірюваннях температури та ГТ за ІЧВ на основі закону Планка в реальних умовах проведення досліджень:

$$S_{p,q}(\lambda, T_{p,q}) = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \cdot \tau(\lambda, T_{amb.}) \times \\ \times [\varepsilon(\lambda, T_{p,q}) \cdot C_1 \lambda^{-5} (e^{\lambda T_{p,q}} - 1)^{-1} + (1 - \varepsilon(\lambda, T_{p,q})) \cdot C_1 \lambda^{-5} (e^{\lambda T_f} - 1)^{-1}] d\lambda + S_{N_{p,q}} \quad (1)$$

де p та q – координати окремого ПВ матриці приймачів тепловізора; K – коефіцієнт перетворення; $\lambda_1 \div \lambda_2$ – робоча спектральна смуга тепловізора; $R(\lambda)$ –

спектральна чутливість; $\tau(\lambda, T_{amb.})$ – коефіцієнт пропускання проміжного середовища (КППС); $\varepsilon(\lambda, T_{p,q})$ – коефіцієнт випромінення (КВ) поверхні об'єкта дослідження; C_1 та C_2 – сталі; $T_{p,q}$ – точкове значення температури поверхні об'єкта дослідження; T_f – температура фону; $S_{Np,q}$ – сигнал шуму для окремого ПВ тепловізора.

Сумарна стандартна непевність тепловізійних вимірювань передбачає визначення непевності типу А та непевності типу В згідно формули (2). Відповідно до Міжнародного словника основних та загальних термінів з метрології (VIM) запропоновано поділ непевності типу В на інструментальну складову непевності (СН) і СН методу вимірювання температури та ГТ за ІЧВ. За результатами проведеного у роботі аналізу встановлено, що це доцільно робити внаслідок різної вагомості їх вкладу в сумарний бюджет непевності.

$$u_c(T) = \sqrt{u_A^2(T) + u_B^2(T)} = \sqrt{u_A^2(T) + [u_{B(instr.)}^2(T) + u_{B(method.)}^2(T)]}. \quad (2)$$

Оцінювання непевності типу А результатів тепловізійного дослідження при n -спостереженнях доцільно проводити для таких величин:

- точкових значень температури T $u_A^2(T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i)^2}{n \cdot (n-1)}}$;
- градієнта температури ΔT $u_A^2(\Delta T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_i)^2}{n \cdot (n-1)}}$;
- вихідного сигналу ПВ $u_A^2(S(\lambda, T)) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i(\lambda, T) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i(\lambda, T))^2}{n \cdot (n-1)}}$.

Визначення непевності типу В вимірювань температури доцільно проводити на основі оцінювання непевності вихідного сигналу ПВ тепловізора. Перейти від непевності сигналу до непевності температури можна шляхом знаходження модуля похідної функції перетворення f :

$$u_B(T) = \left| \frac{\partial f}{\partial S(\lambda, T)} \right| \cdot u_B(S(\lambda, T)). \quad (3)$$

Інструментальна СН типу В визначається характеристиками тепловізора при його використанні:

$$u_{B(instr.)}(S(\lambda, T)) = \sqrt{\sum_{j=1}^J u_{B(instr.)j}^2(S(\lambda, T))}, \quad (4)$$

$$= \sqrt{u^2(S_N) + u^2(R(\lambda)) + u^2(T_{amb.}) + u^2(\Delta T) + u^2(\Delta S)}$$

де $u(S_N)$ – СН від шумів матриці ПВ; $u(R(\lambda))$ – СН від зміни спектральної чутливості оптично-приймальної системи тепловізора та нелінійності перетворення; $u(T_{amb.})$ – СН від температурного впливу оточуючого середовища;

$u(\Delta T)$ – СН від зміни температурної чутливості ПВ; $u(\Delta S)$ – СН від зміни просторової чутливості.

Цю складову необхідно розраховувати на основі інформації про значення абсолютної похибки $\Delta_{instr.}$, вказаної в технічній документації до конкретного тепловізора згідно обраного закону розподілу. Зокрема, для рівномірного закону розподілу оцінювання проводиться за виразом $u_{B(instr.)}(S(\lambda, T)) = \Delta_{instr.}/\sqrt{3}$. На основі проведеного огляду існуючих моделей тепловізорів встановлено, що значення інструментальної СН не перевищує 1,5%.

Виділення СН методу вимірювання зумовлено впливом факторів, а саме $\varepsilon(\lambda, T)$, $\tau(\lambda, T_{amb.})$ та T_f . Тому її описуємо таким чином:

$$u_{B(method.)}(S(\lambda, T)) = \sqrt{\sum_{l=1}^L u_{B(method.)}^2(S(\lambda, T))} = \sqrt{C'_{\varepsilon(\lambda, T)}{}^2 u^2(\varepsilon(\lambda, T)) + C'_{\tau(\lambda, T_{amb.})}{}^2 u^2(\tau(\lambda, T_{amb.})) + C'_{T_f}{}^2 u^2(T_f)}, \quad (5)$$

де $C'_{\varepsilon(\lambda, T)}$, $C'_{\tau(\lambda, T_{amb.})}$, C'_{T_f} – коефіцієнти чутливості, що вперше розраховані нами для цієї методики:

$$C'_{\varepsilon(\lambda, T)} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_1 \tau(\lambda, T_{amb.}) \left(\frac{1}{\lambda^5 (e^{\lambda T} - 1)} - \frac{1}{\lambda^5 (e^{\lambda T_f} - 1)} \right) d\lambda, \quad (6)$$

$$C'_{\tau(\lambda, T_{amb.})} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} -C_1 \left(\frac{\varepsilon(\lambda, T) - 1}{\lambda^5 (e^{\lambda T_f} - 1)} - \frac{\varepsilon(\lambda, T)}{\lambda^5 (e^{\lambda T} - 1)} \right) d\lambda, \quad (7)$$

$$C'_{T_f} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} -C_1 C_2 \tau(\lambda, T_{amb.}) \frac{e^{\lambda T_f} \cdot (\varepsilon(\lambda, T) - 1)}{\lambda^6 T_f^2 (e^{\lambda T_f} - 1)^2} d\lambda. \quad (8)$$

За умови рівномірного закону розподілу відхилень значень впливних факторів їх непевності оцінюються за виразами:

$$u(\varepsilon(\lambda, T)) = \frac{\Delta\varepsilon(\lambda, T)}{\sqrt{3}}, \quad u(\tau(\lambda, T_{amb.})) = \frac{\Delta\tau(\lambda, T_{amb.})}{\sqrt{3}}, \quad u(T_f) = \frac{\Delta T_f}{\sqrt{3}}, \quad (9)$$

де $\Delta\varepsilon(\lambda, T)$, $\Delta\tau(\lambda, T_{amb.})$, ΔT_f – границі, в яких знаходяться значення впливних факторів для реальних умов проведення тепловізійного дослідження.

Сформовано бюджет непевності тепловізійних вимірювань.

На основі розробленої методики проведено моделювання відносних значень окремих СН методу вимірювання при різних значеннях впливних факторів:

- для об'єктів промисловості $\varepsilon = 0,75; 0,85; 0,95$, $\tau = 0,95; 0,97; 0,99$, $T_f = 0; 25; 100; 250$ °С, діапазон температури T поверхні об'єкта $-20 \dots 470$ °С;

- для об'єктів медицини $\varepsilon = 0,96; 0,97; 0,98$, $\tau = 0,97; 0,98; 0,99$, $T_f = -10; 22; 32$ °С, діапазон температури T поверхні об'єкта $24,4 \dots 34,4$ °С.

На рисунках 1-3 а) подано окремі результати проведеного моделювання для об'єктів промисловості, а на рисунках 1-3 б) – для об'єктів медицини.

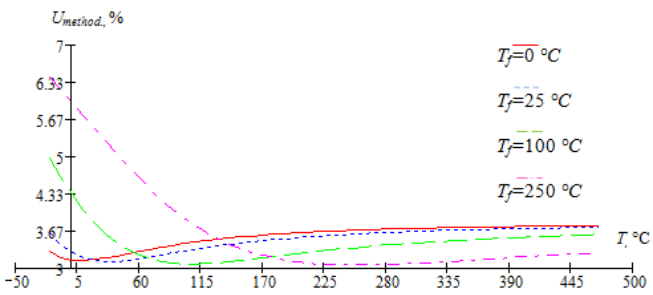


Рисунок 1 а) – Графік залежності відносної непевності від впливу фонового випромінювання при $\varepsilon = 0,75$ та $\tau = 0,95$

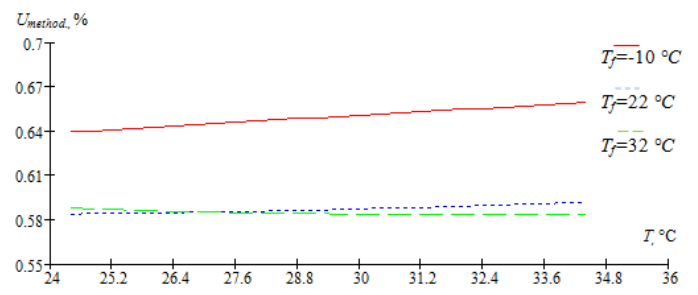


Рисунок 1 б) – Графік залежності відносної непевності від впливу фонового випромінювання при $\varepsilon = 0,95$ та $\tau = 0,99$

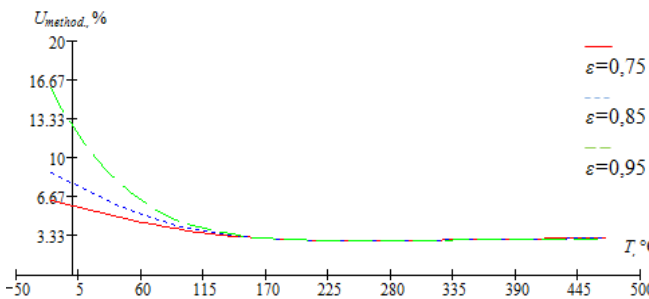


Рисунок 2 а) – Графік залежності відносної непевності від впливу КВ при $T_f = 250$ °C та $\tau = 0,99$

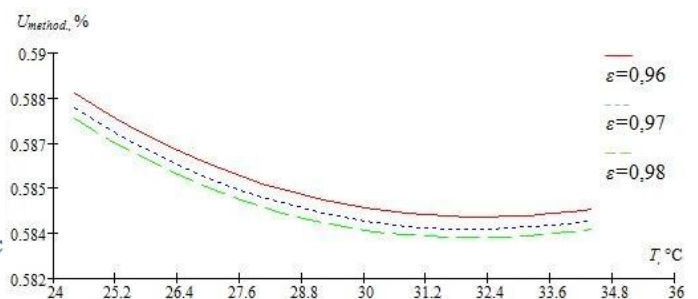


Рисунок 2 б) – Графік залежності відносної непевності від впливу КВ при $T_f = 32$ °C та $\tau = 0,99$

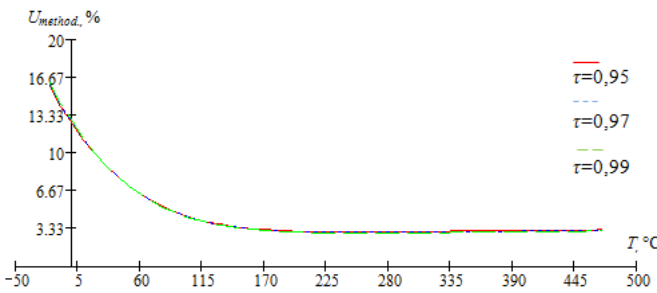


Рисунок 3 а) – Графік залежності відносної непевності від впливу КППС при $\varepsilon = 0,95$ та $T_f = 250$ °C

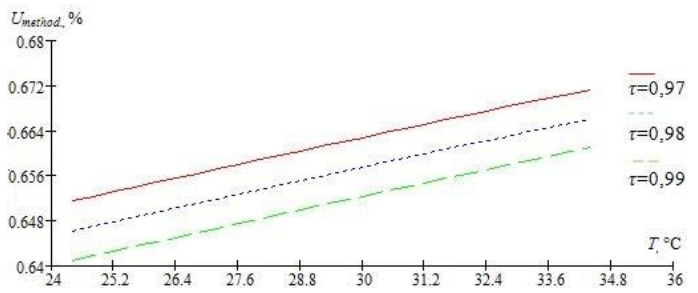


Рисунок 3 б) – Графік залежності відносної непевності від впливу КППС при $\varepsilon = 0,96$ та $T_f = -10$ °C

За результатами моделювання встановлено, що значення непевності вимірювань температури залежить від зміни значень впливних факторів. Побудова функцій впливу цих факторів на непевність забезпечує можливість апріорного визначення границь, у яких може знаходитися непевність результатів дослідження теплового поля в реальних умовах, а також дозволяє користувачеві проводити тепловізійне дослідження з наперед заданим значенням непевності або ж вибирати такі умови проведення дослідження, за яких він не перевищуватиме вибраної оцінки точності результатів вимірювань.

Застосування розробленої методики дає змогу забезпечити кількісну оцінку результатів тепловізійного дослідження з визначеною точністю та їх порівнюваність, гармонізувати процедури випробувань, калібрування та вимірювань із міжнародними вимогами, оцінювати вплив вхідних факторів для вибору оптимальних умов проведення тепловізійного дослідження.

У третьому розділі запропоновано двосмуговий метод тепловізійних вимірювань температури та ГТ із врахуванням значень впливних факторів і методику додаткового калібруванням тепловізора в робочих умовах експлуатації, розроблено конструкцію еталонного площинного сірого випромінювача (ПСВ) для забезпечення їх реалізації.

Метод вимірювання температури та ГТ складається із двох етапів: на першому визначаються τ та T_f , на другому – точкові значення $\varepsilon_{p,q}$ і $T_{p,q}$.

На першому етапі для визначення τ та T_f використовуємо інформацію, яка міститься у відбитому випромінненні. Для цього пропонуємо застосовувати ПСВ із відомими значеннями КВ ε_{gb} та температури поверхні T_{gb} . Вимірювання потоку випроміннення відбувається у двох спектральних смугах, що дає змогу сформулювати систему двох рівнянь для визначення τ та T_f . Для зменшення впливу спектральних залежностей впливних факторів обираємо таке взаємне розташування робочих спектральних смуг, за якого одна із них $\lambda_{12} \div \lambda_{22}$ знаходиться в межах другої $\lambda_{11} \div \lambda_{21}$, за принципом «смуга в смузі». Вважається, що умови навколишнього середовища є незмінними протягом проміжку часу вимірювань. Система рівнянь вихідних сигналів в обох спектральних смугах має вид:

$$\begin{cases} S_{p,q}^{11}(\lambda, T_{gb}) = \tau(\varepsilon_{gb}) \cdot \int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{21}} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_{gb}}} - 1)^{-1} d\lambda + (1 - \varepsilon_{gb}) \int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{21}} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1)^{-1} d\lambda \\ S_{p,q}^{21}(\lambda, T_{gb}) = \tau(\varepsilon_{gb}) \cdot \int_{\lambda_{12}}^{\lambda_{22}} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_{gb}}} - 1)^{-1} d\lambda + (1 - \varepsilon_{gb}) \int_{\lambda_{12}}^{\lambda_{22}} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1)^{-1} d\lambda \end{cases} \quad (10)$$

У результаті розв'язання системи рівнянь отримаємо значення впливних факторів τ та T_f , характерних для даних умов проведення дослідження.

На другому етапі проводимо двоспектральне вимірювання потоків випроміннення безпосередньо об'єкта дослідження з врахуванням інформації про τ та T_f для визначення точкових значень $\varepsilon_{p,q}$ і $T_{p,q}$. За результатами вимірювань формуємо систему двох рівнянь:

$$\begin{cases} S_{p,q}^{12}(\lambda, T_{p,q}) = \tau(\varepsilon_{p,q}) \cdot \int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{21}} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_{p,q}}} - 1)^{-1} d\lambda + (1 - \varepsilon_{p,q}) \int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{21}} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1)^{-1} d\lambda \\ S_{p,q}^{22}(\lambda, T_{p,q}) = \tau(\varepsilon_{p,q}) \cdot \int_{\lambda_{12}}^{\lambda_{22}} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_{p,q}}} - 1)^{-1} d\lambda + (1 - \varepsilon_{p,q}) \int_{\lambda_{12}}^{\lambda_{22}} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1)^{-1} d\lambda \end{cases} \quad (11)$$

Шляхом розв'язання цієї системи отримуємо точкові значення $\varepsilon_{p,q}$ та $T_{p,q}$ поверхні об'єкта в даних умовах проведення дослідження.

Послідовність виконання операцій методу подано на рисунку 4.



Рисунок 4 – Послідовність виконання операцій методу вимірювання температури та ГТ за ІЧВ поверхні об'єкта дослідження

Застосування програмного забезпечення для обчислення значень впливних факторів, температури та ГТ за вихідними сигналами окремих ПВ матриці приймачів тепловізора забезпечує визначення дійсних значень температури для кожної точки поверхні об'єкта дослідження згідно роздільної здатності тепловізора. Як результат, це забезпечить можливість отримання термограми з розподілом дійсних температур теплового поля поверхні об'єкта дослідження та проведення кількісного аналізу результатів тепловізійних вимірювань.

Запропонований метод може бути взятий за основу при формуванні методики виконання вимірювань температури та ГТ за ІЧВ поверхні об'єктів дослідження у промисловості й медицині.

У розділі проведено моделювання для підтвердження можливості застосування даного методу в реальних умовах експлуатації тепловізора.

Дані результатів моделювання, представлені у таблиці 1, підтверджують, що алгоритм запропонованого методу вимірювання температури та ГТ за ІЧВ поверхні об'єкта дослідження тепловізором у робочих умовах експлуатації дає можливість отримувати значення, збіжні з дійсними значеннями температури та впливних факторів.

Проведено моделювання використання методу ВТ та ГТ за ІЧВ для вибраних значень температури й умов тепловізійного дослідження з метою порівняння дійсних та виміряних значень температури поверхні об'єктів промисловості й медицини.

Таблиця 1 – Результати моделювання двосмугового методу вимірювання температури та ГТ за ІЧВ поверхні об'єктів промисловості й медицини

Фізичні величини	Об'єкт промисловості		Об'єкт медицини	
	дійсне значення	результати моделювання	дійсне значення	результати моделювання
$T, ^\circ\text{C}$	22,0000	22,0002...22,0003	34,0000	34,1500...34,1501
ε	0,8900	0,8900	0,9700	0,9700
τ	0,95000	0,9499	0,9900	0,9900
$T_f, ^\circ\text{C}$	18,0000	18,0023	18,0000	17,9939

Приклад результатів моделювання для вибраних значень температури й умов проведення дослідження відображено в таблиці 2 для промисловості та таблиці 3 для медицини. При цьому комбінування значень впливних факторів для конкретного значення температури є випадковим.

Таблиця 2 – Результати моделювання реалізації методу для окремих значень вхідних величин у промисловості

Дійсне значення температури, $^\circ\text{C}$	Значення впливних факторів			Розраховане значення температури, $^\circ\text{C}$	Абсолютне відхилення розрахованого та дійсного значення, $^\circ\text{C}$	Відносне відхилення розрахованого та дійсного значення (для К)
	ε	τ	$T_f, ^\circ\text{C}$			
-20	0,80	0,90	21	-15,3999	4,6001	1,8171
10	0,95	0,93	250	28,8647	18,8647	6,6625
30	0,99	0,95	-10	26,2828	-3,7172	-1,2262
100	0,75	0,97	0	78,1421	-21,8579	-5,8577
250	0,90	0,99	100	235,9553	-14,0447	-2,6846
470	0,85	1,00	50	423,5431	-46,4569	-6,2514
-20	0,75	0,90	250	80,5711	100,5711	39,7279

Таблиця 3 – Результати моделювання реалізації методу для окремих значень вхідних величин у медицині

Дійсне значення температури, $^\circ\text{C}$	Значення впливних факторів			Розраховане значення температури, $^\circ\text{C}$	Абсолютне відхилення розрахованого та дійсного значення, $^\circ\text{C}$	Відносне відхилення розрахованого та дійсного значення (для К)
	ε	τ	$T_f, ^\circ\text{C}$			
24	0,97	0,90	10	16,9749	-7,0251	-2,3641
27	0,96	0,93	50	23,2892	-3,7108	-1,2363
30	0,98	0,95	-20	25,8362	-4,1638	-1,3735
33	0,96	0,97	0	29,8144	-3,1856	-1,0405
36	0,97	0,99	35	35,2752	-0,7248	-0,2344
39	0,98	1,00	22	38,6834	-0,3166	-0,1014
24	0,96	0,90	50	18,4656	-5,5344	-1,8625

Відповідно для заданих умов проведення дослідження використання методу вимірювання температури та ГТ за ІЧВ дозволяє підвищити точність вимірювання більше, ніж у 10 разів для об'єктів промисловості та до 2 разів для об'єктів медицини у порівнянні з існуючою точністю вимірювань, що вказується виробниками.

За відсутності можливості проведення вимірювань у двох спектральних смугах пропонуємо проводити додаткове калібрування існуючих моделей тепловізорів на місці експлуатації для забезпечення врахування дії впливних факторів робочих умов проведення дослідження.

Додаткове калібрування проводимо шляхом вимірювання тепловізором трьох значень температури T_{gbi} еталонного ПСВ, максимально наближених до значення температури досліджуваного об'єкта, та розрахунку за вихідними сигналами $S_i(\lambda, T_{gbi})$ нових значень коефіцієнтів C , A , B функції перетворення на прикладі формули Сакума-Хатторі-Віна II:

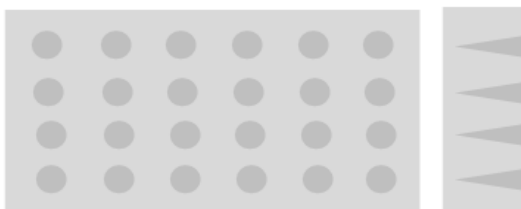
$$\left\{ S_i(\lambda, T_{gbi}) = C \cdot e^{\frac{-C_2}{AT_{gbi}+B}} \right., \text{ при } i=1 \dots 3. \quad (12)$$

Такий підхід передбачає потребу в проведенні перепрограмування функції калібрування тепловізора новими значеннями коефіцієнтів щоразу при зміні умов проведення дослідження. При цьому непевність калібрування оцінюємо за непевністю типу В від методу для кожного параметра функції. Нові значення коефіцієнтів враховуватимуть дію впливних факторів на значення вихідного сигналу, що дозволяє підвищити точність вимірювань температури та ГТ поверхні об'єкта дослідження.

У розділі також вибрано значення довжин хвиль для реалізації вимірювань за принципом «смуга в смузі» та розглянуто можливі варіанти двосмугових вимірювань температури та ГТ за ІЧВ. Оптимальним виявилось використання смугових фільтрів на таких довжинах хвиль – $8 \div 14$ мкм та $8 \div 10$ мкм.

Обґрунтовано доцільність використання ПСВ для реалізації запропонованих методу та методики. Сформульовано вимоги до цього випромінювача: площинний характер конструкції; $\varepsilon(\Delta\lambda, \Delta T) < 1$, $\varepsilon(\Delta\lambda, \Delta T) = const$ та $\varepsilon(t) = const$; $\rho(\Delta\lambda, \Delta T) > 0$, $\rho(\Delta\lambda, \Delta T) = const$; однорідність температури випромінюючої поверхні; робочий спектральний діапазон $\Delta\lambda$ – $8 \div 14$ мкм; робочий діапазон температур ΔT – $273 \dots 800$ К. Оптимальним матеріалом поверхні випромінювача, що забезпечує дотримання всіх умов, зазначених вище, є метал або ж сплав металів.

Запропоновано формування значення КВ поверхні ПСВ такими способами: окиснення поверхні металу, нанесення покриття з різними значеннями КВ, механічна обробка поверхні, зміна геометрії поверхні.



а) б)
Рисунок 5 – Поверхня ПСВ із висвердленими конусами:
а) вид зверху; б) вид збоку

Обґрунтовано доцільність використання двох останніх способів, що реалізується шляхом висвердлювання на поверхні ПСВ порожнин у формі конуса або друку на 3D принтері (рисунок 5). Формування структур геометрії поверхні забезпечує стабільність випромінювальної здатності поверхні з плином часу, хороші дифузні властивості, ізотропність просторових характеристик, повторюваність значень параметрів випромінювача та широкий діапазон можливих значень тепловіддачі при

виборі матеріалу основи з високим значенням теплопровідності. Вибір порожнин у формі конуса зумовлений його властивістю забезпечувати багаторазове відбивання випромінення, що потрапляє у порожнину. За рахунок цього забезпечується підвищення та стабільність значення КВ поверхні матеріалу ПСВ. Також значення КВ поверхні ПСВ можна змінювати за рахунок вибору різнорідних матеріалів поверхні випромінювача, зміни кількості висвердлених конусних порожнин на одиницю площі $n_{sq.}$, радіуса R й глибини конусів H , що можна представити коефіцієнтом форми: $k_F = f(R, H, n_{sq.})$.

Для підтримки стабільного значення температури при проведенні вимірювань у різних температурних діапазонах для різних об'єктів та умов проведення вимірювань доцільним є вибір ПСВ різної конструкції, зокрема:

- для низьких температур у діапазоні до 30 °С із можливістю забезпечення безпосереднього контакту між об'єктом дослідження та випромінювачем і теплообміну між ними – без наповнювача та підігріву (рисунок 6);
- в інших випадках – із наповнювачами (дистильована вода – $0 < T < 100$ °С; масляний наповнювач – $T = -25 \dots 250$ °С; соляна ванна – $T = 200 \dots 500$ °С).

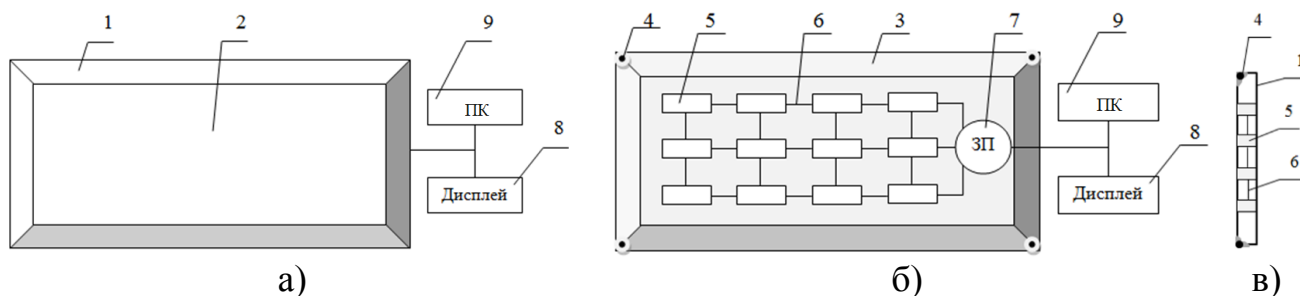


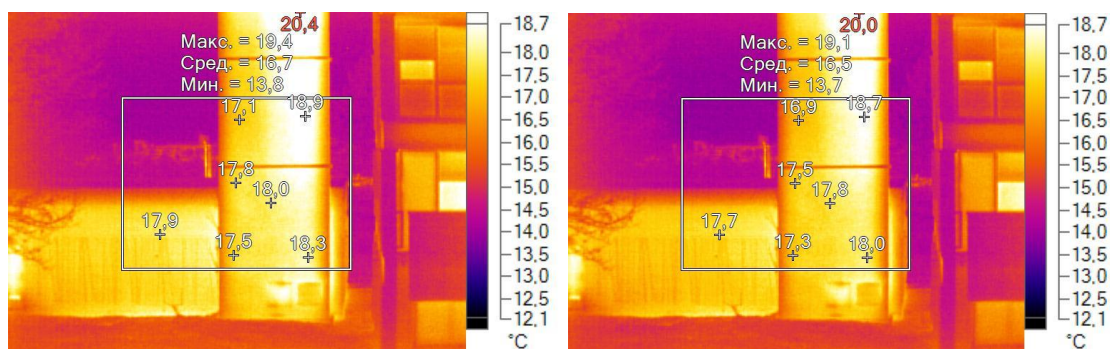
Рисунок 6 – Загальна схема конструкції ПСВ: а) – вид зверху; б) – вид знизу; в) вид у розрізі, де 1 – плоска металічна пластина; 2 – випромінююча поверхня; 3 – нижня грань плоскої пластини з резиноним покриттям; 4 – кріплення; 5 – сенсори; 6 – інформаційні канали; 7 – портативний запам'ятовуючий пристрій; 8 – дисплей ПСВ; 9 – персональний комп'ютер

Застосування запропонованих методу й методики в реальних умовах промисловості та медицини сприяє підвищенню точності практичних вимірювань, адже забезпечує істотне зменшення методичної непевності шляхом врахування впливу на результати вимірювань температури та ГТ випромінювальних властивостей об'єкта дослідження, пропускання проміжного середовища й відбивання фонового випромінення, що підтверджено результатами моделювання.

У четвертому розділі проведено експериментальні дослідження вимірювань температури та визначення РТ поверхні за випроміненням для таких об'єктів промисловості й медицини: абсолютно чорне тіло Kelvin моделі JQ200MYZ2B; тренувальна ціль Chauvin Arnoux моделі С.А 1875; охолоджувальна система лабораторної установки; котельня студентського гуртожитку; долонь людини. При проведенні досліджень використовувався тепловізор FLUKE TiR32 та програмне забезпечення SmartView. Для кожного об'єкта дослідження вимірювання проводилися за різних умов навколишнього середовища. Перевірка точності вимірювань температури проводилася контактним термометром Hanna моделі Checktemp 1 Digital Thermometer-НІ98509.

Для прикладу приведемо результати експериментальних досліджень котельні студентського гуртожитку та долоні людини.

Для котельні студентського гуртожитку на основі уточнення значень впливних факторів із використанням засад методу вимірювань температури та ГТ за ІЧВ тепловізора в умовах експлуатації були виявлені такі відхилення значення впливних факторів: КВ на 0,01, КППС на 0,02 і температури фону на 0,5 °С, що показано на рисунку 7.



а)

б)

Рисунок 7 – Термограми котельні студентського гуртожитку:

а) – до уточнення; б) – після уточнення

Контактним термометром визначили значення температури на висоті витягнутої руки, яке становить 17,3 °С. Порівняння значень температури для котельні студентського гуртожитку до та після проведення уточнення значень впливних факторів представлено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Таблиця результатів експериментальних досліджень для котельні студентського гуртожитку

Назва точки	Значення температури до уточнення, °С	Значення температури після уточнення, °С	Різниця значень температури до та після уточнення, °С
Центральна точка	17,8	17,5	0,3
P0	17,1	16,9	0,2
P1	18,9	18,7	0,2
P2	18,3	18,0	0,3
P3	17,5	17,3	0,2
P4	18,0	17,8	0,2

Для долоні людини на основі уточнення значень впливних факторів із використанням засад методу вимірювання температури та ГТ за ІЧВ тепловізора в умовах експлуатації були виявлені такі відхилення значення впливних факторів: КВ на -0,01 і температури фону на -0,5 °С. При чому зміна температури фону ніякого впливу на значення температур теплового поля поверхні долоні не мала, оскільки неістотно відрізнялася від них, що показано на рисунку 8.

Таким чином, у результаті виконання експериментальних досліджень було підтверджено, що впливні фактори вихідного сигналу зумовлюють виникнення відхилення між дійсним і вимірним значенням температури, тому доцільно використовувати метод вимірювання температури та ГТ за ІЧВ або додаткове

калібрування тепловізора в умовах експлуатації, оскільки навіть помилка у десяти градуса при визначенні температури в окремих галузях є критичною.

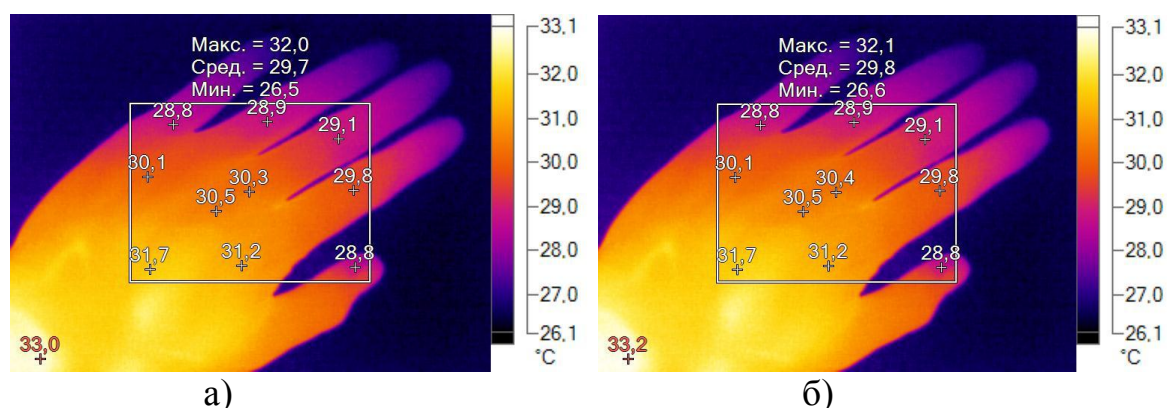


Рисунок 8 – Термограми долоні людини: а) – до уточнення; б) – після уточнення

Також проведено експериментальні дослідження й моделювання використання спектральних фільтрів при вимірюваннях температури тепловізором, що підтвердили можливість використання фільтрів при реалізації вимірювань температури та ГТ поверхні об'єкта дослідження за ІЧВ в умовах експлуатації за принципом «смуга в смузі».

На основі результатів аналізування теоретичних та експериментальних досліджень розроблено методику визначення тепловтрат будівлі та їх грошової оцінки. Вона включає декілька алгоритмів їх розрахунку залежно від доступності вхідних величин та вимог до результатів проведених розрахунків (точність, врахування складових теплового потоку, визначення приросту чи абсолютного значення тепловтрат тощо). Дана методика дозволяє визначити приріст втрат теплоти в грошовому еквіваленті та оцінити окупність робіт по усуненню джерел виникнення таких тепловтрат згідно формули:

$$W = \frac{\Delta Q(T)}{1000} \cdot t \cdot P, \quad (13)$$

де W – сума грошей, оплачена за надлишковий тепловий потік, визнаний тепловтратами, грн; t – час, для якого проводять розрахунок втрат теплоти, год.; P – вартість 1кВт·год енергії, грн/кВт·год (тариф).

Також запропоновано проект стандарту «Методика тепловізійних досліджень будівель», що передбачає проведення якісного тепловізійного обстеження та кількісного тепловізійного аналізу.

У розділі розроблено рекомендації щодо умов та порядку проведення тепловізійних досліджень у медицині, що дозволяють скорегувати процес тепловізійного медичного діагностування.

Розроблено програму навчання персоналу в галузі неруйнівного тепловізійного контролю для підвищення кваліфікації персоналу тепловізійної лабораторії та зменшення непевності результатів тепловізійних досліджень, яка виникає внаслідок неправильності проведення вимірювань, некоректного аналізування результатів або незастосування методів підвищення точності вимірювань температури за ІЧВ. Програма відповідає міжнародним вимогам, що висуваються до спеціалістів теплового методу неруйнівного контролю та може

бути основою при проведенні навчання персоналу в рамках його обов'язкової сертифікації для забезпечення застосування юридичної відповідальності за результати тепловізійного дослідження.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну задачу вдосконалення нормативно-технічного забезпечення вимірювань температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням для об'єктів промисловості й медицини шляхом розроблення методів, засобів та методик забезпечення реалізації тепловізійних досліджень, а саме:

1. У результаті аналізування конструктивних особливостей сучасних моделей тепловізорів та їх використання у промисловості й медицині визначено проблему обмеженості їх застосування внаслідок низької точності вимірювань точкових значень температури та неврахування дії впливних факторів, що визначає лише якісний характер результатів тепловізійного дослідження.

2. Встановлено, що внаслідок відмінностей значень впливних факторів у нормальних умовах калібрування від їх значень у реальних умовах проведення тепловізійного дослідження виникає значна методична похибка. Також виявлено, що суб'єктивність вибору та введення оператором у функціонал тепловізора параметрів проведення тепловізійного дослідження призводить до виникнення додаткових відхилень виміряних значень температури від дійсних. Це зумовлює доцільність проведення додаткового калібрування тепловізора щоразу при його застосуванні в реальних умовах експлуатації ("in-situ" calibration) або розробки методу вимірювання температури із врахуванням дії цих факторів, а також розробки програми навчання персоналу в рамках його сертифікації.

3. На основі аналізу нормативного забезпечення визначено необхідність розробки методик виконання тепловізійних вимірювань для конкретних об'єктів промисловості та медицини й опрацювання результатів вимірювань з оцінюванням їх непевності.

4. Згідно основ концепції непевності та ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement розроблено методика оцінювання сумарної непевності вимірювання температури та градієнта температури поверхні об'єктів за інфрачервоним випроміненням, що забезпечує відповідність роботи лабораторій неруйнівного тепловізійного контролю міжнародним стандартам.

5. З метою зменшення впливу рівня кваліфікації персоналу та виключення дії впливних факторів на результати тепловізійного дослідження розроблено двоспектральний метод вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням у реальних умовах проведення тепловізійних досліджень. Цей метод дозволяє підвищити точність результатів вимірювання температури залежно від умов проведення дослідження – більше, ніж у 10 разів для об'єктів промисловості та до 2 разів для об'єктів медицини у порівнянні з існуючою точністю вимірювань, що вказується виробниками.

6. Для реалізації запропонованого методу обґрунтовано вибір діапазонів робочих спектральних смуг тепловізора та їх розташування за принципом «смуга

в смузі» залежно від об'єктів дослідження й оптимальність використання для цього багат шарових фільтрів на силіцієвій або германієвій основі.

7. Для існуючих моделей тепловізорів розроблено методику калібрування тепловізорів на місці експлуатації ("in-situ" calibration), що дозволяє враховувати дію впливних факторів робочих умов у функції перетворення вихідного сигналу.

8. Для реалізації запропонованих методу й методики розроблено варіанти конструкції та спосіб формування поверхні площинного сірого випромінювача для різних умов та об'єктів дослідження.

9. Проведено моделювання реалізації запропонованих методу й методик та експериментальні тепловізійні дослідження з метою оцінки доцільності застосування запропонованого нормативно-технічного забезпечення. Результати експериментальних досліджень підтверджують результати моделювання.

10. Прикладне застосування результатів тепловізійних досліджень сформовано у вигляді методики розрахунку тепловтрат, що дозволяє визначити грошовий еквівалент втрат теплоти та оцінити окупність робіт по усуненню джерел виникнення таких тепловтрат, і проекту стандарту «Методика тепловізійних досліджень будівель» для проведення якісного тепловізійного обстеження та кількісного тепловізійного аналізу.

11. На основі аналізу фізичних засад вимірювання температури та градієнта температури й фізіологічних особливостей організму людини розроблено рекомендації щодо умов та порядку організації тепловізійних досліджень в медицині, що дозволяють підвищити точність їх результатів.

12. Із врахуванням напрацювань дисертаційної роботи та вимог міжнародних нормативних документів розроблено програму навчання персоналу з неруйнівного контролю по тепловому методу з використанням тепловізійної техніки для підвищення рівня його компетентності та підготовки до обов'язкової сертифікації з метою забезпечення застосування юридичної відповідальності за результати тепловізійного дослідження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гоц Н.Є. Дослідження особливостей застосування тепловізорів у промислових умовах / Н.Є. Гоц, Ю.М. Дзіковська, Р.В. Кочан // Український метрологічний журнал. – 2015. – № 1. – С. 28-33.

2. Dzikovska Yu. Development of in-situ calibration method's algorithm for thermal imager / Yu. Dzikovska, N. Hots // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Комп'ютерні науки та інформаційні технології: збірник наукових праць. – 2015. – № 826. – С. 354-358.

3. Дзіковська Ю. Методика визначення тепловтрат будинку за результатами тепловізійного дослідження / Ю. Дзіковська, Н. Гоц // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2015. – № 76. – С. 59-66.

4. Гоц Н. Аналізування складових непевності результатів вимірювання температури за інфрачервоним випроміненням тепловізійним методом / Н. Гоц, Ю. Дзіковська // Метрологія та прилади. – 2016. – № 1(57). – С. 48-53.

5. Гоц Н.Є. Забезпечення лінійності оптично-приймальної системи термометра інфрачервоного випромінення / Н.Є. Гоц, Г.І. Петриченко, Р.В. Кочан, Ю.М. Приймак // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – № 4/1 (18). – С. 39-43.

6. Fedasyuk D. Method of evaluation of electronic educational resources quality for conformity assessment (certification) [Електронний ресурс] / D. Fedasyuk, N. Hots, M. Mykyuchuk, V. Kuts, Y. Dzikovska // CEUR Workshop Proceedings / ICT in Education, Research and Industrial Applications: Integration, Harmonization and Knowledge Transfer: proc. 12th Int. conf. ICTERI 2016, June 21-24, 2016, Kyiv. – CEUR-WS.org, online, 2016. – Vol. 1614. – P.148-156. – Режим доступу: http://ceur-ws.org/Vol-1614/paper_36.pdf.

7. Гоц Н.Є. Інформаційні аспекти застосування тепловізійної техніки в медицині / Н.Є. Гоц, Ю.М. Приймак // Информационные технологии и автоматизация – 2014: сборник докладов VII Междунар. науч.-практ. конф., 16-17 октября 2014 г., г. Одесса. – Одесса: ОНАХТ, 2014. – с. 16-18.

8. Дзіковська Ю.М. Особливості застосування тепловізійної техніки у промисловості в умовах експлуатації [Електронний ресурс] / Ю.М. Дзіковська, Н.Є. Гоц // Technical Using of Measurement – 2015: тези доповідей Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених у царині метрології, 2-6 лютого 2015 р., м. Славське. – Славське, 2015. – С. 133-134. – 1 CD-R. – Загл. з етикетки диска.

9. Гоц Н. Основи формування методики проведення тепловізійних досліджень / Н. Гоц, Ю. Дзіковська // Управління якістю в освіті та промисловості: досвід, проблеми та перспективи: тези доповідей II Міжнар. наук.-практ. конф., 28-30 травня 2015 р., м. Львів. – Львів, 2015. – С. 191.

10. Гоц Н.Є. Нормативні основи проведення тепловізійних досліджень будівель / Н.Є. Гоц, Ю.М. Дзіковська // Шляхи розвитку стандартизації, сертифікації й оцінки якості товарів і послуг: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 15-17 вересня 2015 р., м. Херсон. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2015. – С. 83-86.

11. Гоц Н.Є. Методика калібрування тепловізора в робочих умовах / Н.Є. Гоц, Ю.М. Дзіковська // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2015): збірник тез доповідей III Міжнар. наук. конф., 27-29 жовтня 2015 р., м. Вінниця. – Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К»», 2015. – С. 86.

12. Гоц Н.Є. Застосування тепловізорів для оперативного контролю на техногенно небезпечних об'єктах / Н.Є. Гоц, Ю.М. Дзіковська // Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об'єктах: матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. студентів та молодих вчених, 28-29 жовтня 2015 р., м. Харків. – Харків: ТОВ «Видавництво «Форт», 2015. – С. 37-39.

13. Гоц Н.Є. Визначення теплових втрат будинку за результатами тепловізійного дослідження / Н.Є. Гоц, Ю.М. Дзіковська // Актуальні проблеми автоматики та приладобудування: матеріали II Всеукр. наук.-техн. конф., 10-11 грудня 2015 р., м. Харків. – Харків: ТОВ «В справі», 2015. – С. 135-136.

14. Дзіковська Ю.М. Розроблення нормативно-технічного забезпечення тепловізійних вимірювань температури та її розподілу поверхні промислових об'єктів [Електронний ресурс] / Ю.М. Дзіковська, В.Я. Крайовський, М.М.

Микийчук, Н.Є. Гоц // Technical Using of Measurement – 2016: тези доповідей Всеукр. наук.-техн. конф. молодих вчених у царині метрології, 1-5 лютого 2015 р., м. Славське. – Славське, 2016. – С. 47-48. – 1 CD-R. – Загл. з етикетки диска.

15.Hots N. Method of calibration of radiation thermometer in real conditions / N. Hots, Y.Dzikovska // Problems and progress in metrology: proceedings of Metrology Commission of Katowice Branch of Polish Academy of Sciences. Series: Conferences No. 21, 5-8 June 2016, Szczyrk, Poland. – Szczyrk: Metrology Commision of Katowice Branch of Polish Academy of Sciences, 2016. – P. 52-55.

16.Гоц Н.Є. Додаткове калібрування термометрів випромінення в умовах виробництва / Н. Є. Гоц, Ю. М. Дзіковська // Інноваційні технології одержання виробів різного функціонального призначення, їх стандартизація та сертифікація: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 7-9 вересня 2016 р., м. Херсон. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2016. – С. 127-129.

17.Гоц Н. Застосування додаткового калібрування в робочих умовах для зменшення методичної похибки вимірювання та контролю температури за випроміненням / Н. Гоц, Г. Петриченко, Ю. Дзіковська // Контроль і управління в складних системах: тези доповідей XIII Міжнар. конф. КУСС-2016, 3-6 жовтня 2016 р., м. Вінниця. – Вінниця, 2016. – С.128-131.

АНОТАЦІЯ

Дзіковська Ю.М. Нормативно-технічне забезпечення вимірювань розподілу температури теплового поля об'єктів промисловості та медицини.
– На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення. Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2017.

Дисертація присвячена вдосконаленню нормативно-технічного забезпечення вимірювань температури та градієнта температури теплового поля об'єктів промисловості та медицини. Розроблено методику оцінювання непевності вимірювання температури та градієнта температури поверхні об'єкта. Отримано аналітичні вирази коефіцієнтів чутливості від впливу факторів, що визначають значення вихідного сигналу в робочих умовах. Запропоновано двосмуговий метод вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням і методику додаткового калібрування тепловізора в робочих умовах з використанням площинного сірого випромінювача. Сформовано вимоги до площинного сірого випромінювача та запропоновано варіанти його конструкції для різних об'єктів й умов проведення дослідження. Розроблено методику визначення тепловтрат за результатами тепловізійного дослідження та проект стандарту «Методика тепловізійних досліджень будівель». Сформовано рекомендації щодо проведення медичного тепловізійного дослідження. Запропоновано програму навчання персоналу в галузі неруйнівного контролю по тепловому методу.

Ключові слова: *метод вимірювання температури за інфрачервоним випроміненням, тепловізор, градієнт температури, калібрування на місці*

експлуатації “in-situ”, площинний сірий випромінювач, коефіцієнт випромінення, фонове випромінення.

АННОТАЦІЯ

Дзиковская Ю.М. Нормативно-техническое обеспечение измерений распределения температуры теплового поля объектов промышленности и медицины. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.01.02 – стандартизация, сертификация и метрологическое обеспечение. Национальный университет «Львівська політехніка» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2017.

Диссертация посвящена совершенствованию нормативно-технического обеспечения измерений температуры и градиента температуры теплового поля объектов промышленности и медицины. Разработана методика оценки неопределенности измерения температуры и градиента температуры поверхности объекта. Получены аналитические выражения коэффициентов чувствительности от влияния факторов, определяющих значение выходного сигнала в рабочих условиях. Предложены метод измерения температуры и градиента температуры по инфракрасному излучению в двух спектральных диапазонах и методика дополнительной калибровки тепловизора в рабочих условиях с использованием плоскостного серого излучателя. Сформированы требования к плоскостному серому излучателю и предложены варианты его конструкции для различных объектов и условий проведения исследования. Разработаны методика определения теплотерь по результатам тепловизионного исследования и проект стандарта «Методика тепловизионных исследований зданий». Сформированы рекомендации по проведению медицинского тепловизионного исследования. Предложена программа обучения персонала в области неразрушающего контроля по тепловому методу.

Ключевые слова: метод измерения температуры по инфракрасному излучению, тепловизор, градиент температуры, калибровка на месте эксплуатации “in-situ”, плоскостной серый излучатель, коэффициент излучения, фоновое излучение.

ANNOTATION

Dzikovska Y.M. Normative and technical support for measurements of thermal field temperature distribution of objects in industry and medicine. – On the rights of manuscript.

A thesis for a scientific degree of Candidate of Technical Sciences by speciality 05.01.02 – Standardization, Certification and Metrological Assurance. Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2017.

The thesis is devoted to improving the normative and technical support of temperature and temperature gradient measurements of objects' thermal field in industry and medicine. The review of thermal imagers as a means for a research of thermal field of objects' surface by infrared radiation is conducted, their constructive features are reviewed, generalized extended classification of thermal imagers is proposed. The

analysis of thermal imagers usage in industry and medical research for temperature and temperature gradient measurements of objects' surface is performed, common problems of thermal imagers usage in industry and medicine are identified, their solutions are formed. The main factors which lead to low infrared radiation temperature and temperature gradient measurement accuracy are considered, existing methods and ways of its increasing are analyzed, their advantages and disadvantages are specified. Analysis of thermal imagers calibration in calibration laboratories and their functioning in operating conditions, of normative support of temperature and temperature gradient measurement for objects of industry and medicine are conducted. Sources of thermal imaging research uncertainty are reviewed. The need to improving the normative and technical support for measurement of temperature distribution of objects' thermal field in industry and medicine are determined. Estimation methodology for uncertainty of temperature and temperature gradient measurement of object's surface that allows to assess the impact of various factors on different types and components of uncertainty is developed. By the analysis and evaluation of uncertainty for infrared radiation temperature and temperature gradient measurement, this methodology allows to propose measures for its reducing. Analytical expressions of sensitivity coefficients of factors influence that determine the value of output signal in working conditions are obtained. Infrared radiation temperature and temperature gradient measurement method on principle "band in band" and methodology of thermal imager "in-situ" calibration by using extended area gray emitter are offered. They provide a significant reduction of methodological uncertainty by taking into account the effect on the temperature and temperature gradient measurement emissivity of the researched object, the transmission of intermediate medium and reflection of background radiation. The analysis of choosing of specific wavelengths values for spectral bands on the principle "band in band" is performed and possible ways to implement two-bands temperature measurement are discussed. Requirements to extended area gray emitter are formed and its design variants for different objects and conditions are proposed. Methodology of buildings heat losses determination and their monetary evaluation on the results of thermal imaging research is developed. This allows to determine the heat losses increase in monetary equivalent and to assess the recoument of work to eliminate these sources of heat losses. The project of standard "Methodology of buildings thermal imaging research" is developed. Recommendations for a medical thermal imaging research are formed. The program of personal training in the field of non-destructive control on thermal method is proposed. It is aimed to improve the staff qualification of thermal imaging laboratory and to reduce the uncertainty of thermal imaging research resulting from incorrect measurements, incorrect analysis of the results or non-use of methods for improving the accuracy of infrared radiation temperature and temperature gradient measurements.

Keywords: infrared radiation temperature measurement method, thermal imager / infrared camera, temperature gradient, "in-situ" calibration, extended area gray emitter, emissivity, background radiation.