

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

На правах рукопису

Дзіковська Юлія Миколаївна

УДК 006.91+536.5

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

05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Наукові керівники:
доктор технічних наук,
доцент **Гоц Н.Є.**;
доктор філософії,
професор **Пезеріл Т.**

Ідентичність усіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ

В.о. вченого секретаря спеціалізованої

вченої ради

/В.О. Яцук/

Львів – 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ ТЕХНІКИ В ПРОМИСЛОВОСТІ ТА МЕДИЦИНІ.....	15
1.1 Фізичні основи вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням	15
1.2 Тепловізор як засіб дослідження теплового поля об'єкта	19
1.2.1 Конструктивні особливості тепловізора як технічного засобу	19
1.2.2 Класифікація тепловізорів.....	20
1.3 Застосування тепловізорів у промисловості	21
1.4 Застосування тепловізорів у медицині.....	23
1.5 Проблеми низької точності вимірювань температури за випроміненням з використанням тепловізора.....	28
1.6 Особливості проведення калібрування тепловізорів у калібрувальних лабораторіях.....	33
1.7 Аналіз нормативного забезпечення вимірювань температури та градієнта температури теплового поля об'єктів промисловості та медицини	38
1.8 Засади оцінювання непевності вимірювання температури та градієнту температури за інфрачервоним випроміненням	43
Висновки до розділу 1	44
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ НЕПЕВНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ TEMПЕРАТУРИ ТА ГРАДІЄНТА TEMПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ОБ'ЄКТІВ ЗА ІНФРАЧЕРВОНИМ ВИПРОМІНЕННЯМ.....	47
2.1 Засади формування підходу до аналізування та оцінювання непевності вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням.....	47

2.2	Формування рівняння вимірювань температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням з урахуванням аналізу вхідних величин	48
2.3	Методика оцінювання непевності вимірювання температури та градієнта температури поверхні об'єкта за інфрачервоним випроміненням	51
2.2.1	Оцінювання непевності типу А результатів вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням	52
2.2.2	Оцінювання складових непевності типу В вихідного сигналу приймача випромінення тепловізора при вимірюванні температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням	54
2.2.3	Аналіз інструментальної складової непевності типу В вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням.....	56
2.2.4	Аналіз складової непевності типу В методу вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням	60
2.2.5	Формування бюджету непевності вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням тепловізором	65
2.4	Моделювання складових непевності вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням	66
	Висновки до розділу 2	76

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ГРАДІЄНТА ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ІНФРАЧЕРВОНИМ ВИПРОМІНЕННЯМ В РОБОЧИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЕПЛОВІЗОРА.....

3.1	Розроблення методу вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням в робочих умовах експлуатації тепловізора для поверхні об'єктів промисловості та медицини	78
3.2	Розроблення методики додаткового калібрування тепловізора в робочих умовах експлуатації	85
3.3	Обґрунтування вибору спектральних смуг для реалізації двосмугового вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням.....	89

3.4 Розроблення конструкції площинного сірого випромінювача.....	94
3.4.1 Обґрунтування доцільності застосування сірого випромінювача для розроблених методу вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням та методики додаткового калібрування тепловізора в робочих умовах експлуатації	94
3.4.2 Формування вимог до сірого випромінювача	96
3.4.3 Способи формування випромінювальної здатності поверхні площинного сірого випромінювача	97
3.4.4 Забезпечення стабільності температури поверхні площинного сірого випромінювача.....	100
3.4.5 Конструкція площинного сірого випромінювача без наповнювача.....	101
3.4.6 Конструкція площинного сірого випромінювача з наповнювачем	105
3.5 Моделювання реалізації методу вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням	106
Висновки до розділу 3	110
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ Й ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ ТА РОЗРОБЛЕННЯ НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧНИХ ДОКУМЕНТІВ	112
4.1 Експериментальні дослідження вимірювань температури та визначення розподілу температури тепловізором в умовах експлуатації.....	112
4.2 Експериментальні дослідження використання спектральних фільтрів при вимірюваннях температури тепловізором.....	118
4.3 Формування методики розрахунку тепловтрат будинку за результатами тепловізійного дослідження	120
4.4 Рекомендації щодо умов і порядку проведення тепловізійних досліджень у медицині	133
4.5 Розробка програми навчання персоналу в галузі неруйнівного контролю по тепловому методу.....	135
Висновки до розділу 4	136

ВИСНОВКИ.....	137
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	140
Додаток А Фізичні засади теплового випромінення	158
Додаток Б Розширена класифікація тепловізорів	159
Додаток В Основні напрями сучасної термографії у промисловості	161
Додаток Г Нормативне забезпечення з питань вимірювань розподілу температури теплового поля об'єктів промисловості та медицини	162
Додаток Д Основні джерела виникнення непевності вимірювань температури та градієнта температури об'єктів промисловості та медицини.....	164
Додаток Е Характеристики точності вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням для різних моделей тепловізорів за даними фірм-виробників.....	165
Додаток Ж Бюджет непевності вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням тепловізором	166
Додаток З Розрахунок відносної непевності для об'єкта промисловості	167
Додаток И Проект Національного стандарту України «Методика тепловізійних досліджень будівель».....	170
Додаток К Зразок програми навчання персоналу з неруйнівного контролю по тепловому методу.....	191
Додаток Л Акти про впровадження результатів дисертаційної роботи	197

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ІЧ – інфрачервоний

ІЧВ – інфрачервоне випромінення

ВТ – вимірювання температури

ТП – теплове поле

АЧТ – абсолютно чорне тіло

НК – неруйнівний контроль

ОСП – органи із сертифікації персоналу

ТВ – термометрія за випроміненням

ТМВ – термометр випромінення

ПВ – приймач випромінення

ОПС – оптично-приймальна система

ПСВ – площинний сірий випромінювач

КВ – коефіцієнт випромінення

КППС – коефіцієнт пропускання проміжного середовища

ФВ – фонове випромінення

ГТ – градієнт температури

РТ – розподіл температури

ЗВТ – засіб вимірювальної техніки

ВСТУП

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 швидкодію 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 задачі 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. Сформувати 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» (Додаток Л).

Особистий внесок здобувача. У статті «Дослідження особливостей застосування тепловізорів у промислових умовах», опублікованій у співавторстві з Гоц Н., Кочан Р., особистим внеском здобувача є пропозиція проведення додаткового калібрування тепловізора у робочих умовах експлуатації та використання для цього площинного сірого випромінювача.

У статті «Development of in-situ calibration method's algorithm for thermal imager», опублікованій у співавторстві з Гоц Н., Кочан Р., особистим внеском здобувача є 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.

У статті «Методика визначення тепловтрат будинку за результатами тепловізійного дослідження», опублікованій у співавторстві з Гоц Н., особистим внеском здобувача є методика визначення тепловтрат будинку за результатами тепловізійного дослідження та грошової оцінки приросту втрат теплоти.

У статті «Аналізування складових непевності результатів вимірювання температури за інфрачервоним випроміненням тепловізійним методом», опублікованій у співавторстві з Гоц Н., особистим внеском здобувача є засади методики оцінювання непевності вимірювання температури та градієнта

температури за інфрачервоним випроміненням поверхні досліджуваного об'єкта.

У статті «Забезпечення лінійності оптично-приймальної системи термометра інфрачервоного випромінення», опублікованій у співавторстві з Гоц Н., Петриченко Г., Кочан Р., особистим внеском здобувача є формулювання основ забезпечення лінійності оптично-приймальної системи тепловізора.

У статті «Method of evaluation of electronic educational resources quality for conformity assessment (certification)», опублікованій у співавторстві з Федасюком Д., Гоц Н., Микийчуком М., Куцем В., особистим внеском здобувача є 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 дисертації. 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.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ ТЕХНІКИ В ПРОМИСЛОВОСТІ ТА МЕДИЦИНІ

У розділі проведено огляд тепловізорів (інфрачервоних камер) як засобів дослідження теплового поля поверхні об'єктів за інфрачервоним випроміненням, розглянуто їх конструктивні особливості, запропоновано розширену класифікацію тепловізорів. Проведено аналіз особливостей застосування тепловізорів у промисловості і в медичних дослідженнях для вимірювання температури та градієнта температури поверхні об'єктів, визначено спільні проблеми застосування тепловізійної техніки в промисловості і медицині, сформульовано шляхи їх вирішення. Розглянуто основні фактори, що призводять до низької точності вимірювань температури та градієнта температури за випроміненням, проаналізовано існуючі методи її підвищення, вказано їх переваги та недоліки. Досліджено особливості калібрування тепловізорів у калібрувальних лабораторіях та їх функціонування в робочих умовах. Проведено огляд нормативного забезпечення вимірювань температури та градієнта температури об'єктів промисловості та медицини, виділено основні напрямки його удосконалення. Виділено джерела виникнення непевності тепловізійних досліджень. Визначено необхідність вдосконалення нормативно-технічного забезпечення вимірювань розподілу температури теплового поля об'єктів промисловості та медицини. На основі проведеного аналізу сформульовано завдання дослідження.

1.1 Фізичні основи вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням

Температура є кількісним показником внутрішньої енергії об'єктів [1], яка випромінюється у вигляді електромагнітних хвиль. Аналіз теплового поля (ТП) поверхні об'єкта за оптичним випроміненням дозволяє отримати

інформацію про стан цього об'єкта й процес його функціонування, застосовується при вивченні об'єктів та процесів у різних сферах діяльності, включаючи енергетику, будівництво, промисловість, медицину тощо.

Тепловізійні дослідження поверхні об'єктів за інфрачервоним випроміненням (ІЧВ) є одним із перспективних напрямків розвитку комплексної системи теплового контролю об'єктів різної природи [2-3]. Тепловізійні системи відіграють надзвичайно важливу роль у промисловості та медицині як ефективний дистанційний засіб отримання інформації про тепловий стан об'єктів дослідження. Обробка та аналіз отриманих термограм, тобто зображень ТП об'єктів, забезпечують можливість діагностування стану та порядку функціонування об'єкта, а просторово-часовий розподіл температури (РТ) поверхні інформує про його зовнішню та внутрішню структуру, приховані дефекти та місця їх знаходження [4]. Як наслідок, ця інформація є вихідною при прийнятті рішення про проведення профілактичних заходів, ремонтних робіт чи призначення лікування або є стимулом для призначення наступних уточнюючих досліджень.

Вимірювання температури (ВТ) та градієнта температури (ГТ) за ІЧВ ґрунтується на засадах оптичної термометрії за випроміненням (ТВ), яка займається методами та засобами безконтактного ВТ, ґрунтованого на реєстрації інтенсивності електромагнітного випромінення в оптичному діапазоні спектра (ультрафіолетова, видима та інфрачервона (ІЧ) ділянки) [5]. ТВ базується на вимірюванні енергетичної яскравості теплового випромінення поверхні об'єкта дослідження та порівнянні її з яскравістю абсолютно чорного тіла (АЧТ) при тій же температурі [6]. Теплове випромінення характеризують фізичними величинами, поданими в таблиці А.1 додатків.

У ТВ застосовується поняття АЧТ як ідеального випромінювача, який має максимальну яскравість на всіх довжинах хвиль при відповідній температурі. АЧТ повністю поглинає випромінення, що падає на нього, незалежно від довжини хвилі λ , напрямку падіння і поляризації випромінення [5]. АЧТ є еталонним об'єктом в теорії теплового випромінення. В природі немає АЧТ,

але достатньо легко реалізувати таку модель, для якої поглинання на всіх довжинах хвиль буде нехтуючи мало відрізнятися від одиниці.

Спектри випромінення реальних об'єктів різняться від АЧТ, а отже, описати їх єдиною аналітичною залежністю неможливо. У той же час АЧТ має універсальний спектр розподілу енергії випромінення. У зв'язку з цим в основі ТВ є закони випромінення для АЧТ, подані в таблиці 2.А додатків [7-9].

Мірою кількості енергії випромінення даної поверхні, порівняно з енергією випромінення АЧТ, що знаходиться при тій самій температурі, є випромінювальна здатність, яка характеризується коефіцієнтом випромінення (КВ) $\varepsilon(\lambda, T)$. КВ дорівнює відношенню інтенсивності випромінення одиниці поверхні тіла $L(\lambda, T)$ з температурою T до інтенсивності випромінення одиниці поверхні АЧТ $L_{bb}(\lambda, T)$, нагрітого до такої ж температури T :

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{L(\lambda, T)}{L_{bb}(\lambda, T)}. \quad (1.1)$$

Особливістю безконтактного ВТ за ІЧВ є те, що результати її вимірювання залежать від значення КВ поверхні об'єкта дослідження, яке в свою чергу залежить від температури, довжини хвилі випромінення, матеріалу та ступеня обробки поверхні. Врахування цієї обставини визначає необхідність характеризувати поверхню кожного тіла КВ, який для реальних об'єктів знаходиться в межах $0 < \varepsilon(\lambda, T) < 1$. Тому при безконтактному ВТ за ІЧВ необхідним є визначення КВ, його врахування або введення поправки в результат вимірювання на значення КВ досліджуваної поверхні. Значення КВ різних матеріалів для забезпечення реалізації досліджень зазвичай знаходять у довідкових таблицях [10-11]. Але ця інформація не відповідає реальному значенню КВ поверхні $\varepsilon(\lambda, T)$, оскільки визначається при конкретних значеннях температури об'єкта дослідження та довжин хвиль за даних навколишніх умов.

Інтенсивність випромінення реального об'єкта дослідження $L(\lambda, T)$ визначається за формулою:

$$L(\lambda, T) = \int_0^{\infty} \varepsilon(\lambda, T) \cdot L_{bb}(\lambda, T) \cdot d\lambda \quad (1.2)$$

У реальних умовах сумарна енергетична яскравість об'єкта $L_{\Sigma}(\lambda, T)$, яка надходить на оптичну систему засобу вимірювальної техніки (ЗВТ) за ІЧВ, залежить також і від інших факторів:

$$L_{\Sigma}(\lambda, T) = \int_0^{\infty} [\varepsilon(\lambda, T) \cdot L_{bb}(\lambda, T) + \rho(\lambda, T) \cdot L_f(\lambda, T)] \cdot \tau(\lambda, T_{amb.}) \cdot d\lambda, \quad (1.3)$$

де $\rho(\lambda, T)$ – коефіцієнт відбивання поверхні досліджуваного об'єкта;

$L_f(\lambda, T)$ – енергетична яскравість відбитого від поверхні об'єкта фонового випромінення (ФВ) сторонніх об'єктів;

$\tau(\lambda, T_{amb.})$ – коефіцієнт пропускання проміжного середовища (КППС).

В залежності від ширини спектрального каналу оптично-приймальної системи (ОПС) ЗВТ за ІЧВ, вихідний сигнал окремого приймача випромінення (ПВ) матриці приймачів тепловізора визначається згідно формули:

$$S(\lambda, T) = K \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda, T) \cdot L_{\Sigma}(\lambda, T) \cdot d\lambda, \quad (1.4)$$

де $R(\lambda, T)$ – спектральна чутливість ОПС тепловізора;

K – коефіцієнт перетворення;

$\lambda_1 \div \lambda_2$ – робоча спектральна смуга перетворення.

Саме ця формула застосовується в ІЧ ТВ для опису реєстрації випромінення у спектральній смузі ІЧ ділянки спектра та є вихідною при фізичному представленні суті тепловізійних досліджень.

1.2 Тепловізор як засіб дослідження теплового поля об'єкта

Сучасні тепловізори дозволяють визначати ГТ до сотих значень градуса, формують зображення в телевізійному стандарті та активно використовуються у різних галузях промисловості та сферах медицини [12]. Результатом роботи тепловізора є видиме зображення, де певній температурі відповідає свій колір. Аномалії температур служать індикаторами дефектів, а величина температурних сигналів і їх зміна в часі лежать в основі кількісних оцінок тих або інших параметрів об'єкта дослідження.

На основі узагальнення даних про метрологічні характеристики тепловізорів світових та вітчизняних виробників (Fluke, CEM, DALI, Electrophysics, Балтех, Testo AG, Wuhan Guide Infrared Co., IPI, IRay Technology Co., Irisys, IRtek, JENOPTIK/InfraTec, Chauvin Arnoux, SAT Infrared Technology та ін.) та [13-14] можна так охарактеризувати їх сучасні моделі: це засоби вимірювання, які працюють у середній та тепловій ІЧ ділянках спектра (переважно лише в одній із них) у широкому температурному діапазоні та мають такі метрологічні характеристики:

- діапазон ВТ – від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- робочі спектральні діапазони – $3\div 5\text{ мкм}$ та $8\div 14\text{ мкм}$;
- швидкодія – до 10^{-6} с ;
- температурна чутливість – менше ніж 20 мК .

1.2.1 Конструктивні особливості тепловізора як технічного засобу

Тепловізор є ЗВТ, призначеним для визначення РТ поверхні об'єкта за ГТ [15]. Визначення РТ поверхні досліджуваного об'єкта відбувається за його ІЧВ [16]. Конструкція тепловізора дозволяє перетворювати ІЧВ, що надходить від об'єкта, в електричний сигнал, який після підсилення та автоматичної обробки

забезпечує візуалізацію видимого термографічного зображення на дисплеї тепловізора [17]. Спектральні діапазони роботи тепловізорів визначаються інтервалами довжин хвилі для максимуму енергії випромінення досліджуваних об'єктів у відповідних вікнах прозорості атмосфери та діапазоном вимірюваної температури від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ [18].

В [19] подано таке визначення тепловізора: «оптико-електронний прилад, призначений для безконтактного (дистанційного) спостереження, вимірювання та реєстрації просторового та просторово-часового розподілу радіаційної температури об'єктів, що знаходяться в полі зору приладу, шляхом формування часової послідовності термограм та визначення температури поверхні об'єкта за відомими коефіцієнтами випромінення та параметрами зйомки (температура навколишнього середовища, пропускання атмосфери, дистанція спостереження і т.п.)». Отже, основною у цьому визначенні є інформація про те, що тепловізор працює безконтактно та забезпечує отримання даних про РТ.

Загальна функціональна схема конструкції тепловізора представлена на рисунку 1.1.

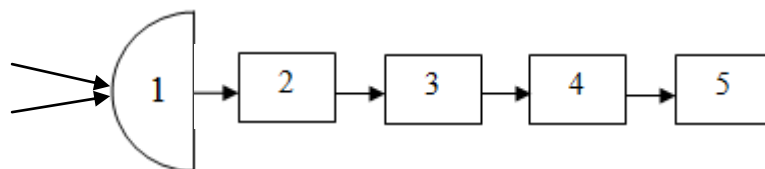


Рисунок 1.1 – Загальна функціональна схема конструкції тепловізора:

- 1 – оптична система; 2 – система сканування; 3 – матриця ПВ;
4 – система перетворення сигналу [20]; 5 – блок візуалізації

Особливості конструкції конкретного тепловізора передбачені його призначенням, видами ПВ та іншими ознаками.

1.2.2 Класифікація тепловізорів

На основі аналізу інформації виробників та існуючих підходів до класифікації тепловізорів, вивчення історії розвитку тепловізійної техніки,

дослідження конструктивних особливостей тепловізійних приладів [21-25] нами запропоновано розширену класифікацію тепловізорів, подану в таблиці Б.1 додатків.

Проте, незважаючи на таку різноманітність приладів, основним завданням тепловізорів є формування термограм, що забезпечуватимуть можливість проведення якісної (пошук «гарячих» та «холодних» ділянок) та кількісної (з визначенням температури та різниці температур досліджуваної та зразкової ділянок) оцінки результатів дослідження. Для цього доцільним є удосконалення технічних можливостей тепловізорів, розроблення методів ВТ та ГТ за ІЧВ та нормативно-технічного забезпечення вимірювань РТ.

1.3 Застосування тепловізорів у промисловості

Тепловізори застосовуються у різних сферах промисловості з метою:

- 1) візуалізації ТП об'єктів дослідження;
- 2) дистанційного визначення РТ;
- 3) для виявлення (у т.ч. і мікродефектоскопія) та реєстрації дефектів [26];
- 4) для наукових досліджень тощо.

Серед переваг використання теплового контролю у промисловості можна відзначити:

- дистанційність проведення дослідження;
- оперативність доступу до результатів та можливість їх швидкої обробки;
- можливість контролю об'єктів із будь-яких матеріалів;
- можливість дослідження динамічних та статичних теплових процесів, процесів вироблення, передачі, перетворення, споживання та консервації енергії різних видів;
- відсутність спотворень ТП об'єкта при вимірюванні;
- можливість реалізації вимірювань в агресивному середовищі, в умовах радіоактивного випромінювання й високого електричного потенціалу та без потреби переривання технологічного процесу й відключення обладнання;
- можливість прогнозування теплової деградації виробів;

- суцільність та безперервність дослідження;
- можливість проведення експрес-контролю теплового стану промислових об'єктів з метою діагностування та прогнозування порядку їх подальшого функціонування, зважаючи на результати діагностування;
- доповнюваність теплового контролю іншими методами дослідження (перевагу серед яких першочергово віддають неруйнівним);
- можливість поєднання зі стандартними системами обробки інформації;
- можливість поточного контролю та створення повноцінних автоматизованих систем контролю й управління технологічними процесами [27-28];
- можливість виявлення потенційно проблемних ділянок для проведення превентивного обслуговування, що скорочує подальші витрати з обслуговування та експлуатації.

В таблиці В.1 додатків описані найбільш затребувані напрями сучасної термографії у промисловості [29-30]. Таким чином, за рахунок практичного використання тепловізійні дослідження підтверджують свою ефективність як інструмент превентивного обслуговування та моніторингу роботи об'єктів виробничих процесів [31]. Узагальнивши, пропонуємо деякі напрями успішного та ефективного використання тепловізорів:

1. Регулярні сервісні перевірки.
2. Забезпечення проведення превентивного механічного обслуговування.
3. Швидкий та простий моніторинг.
4. Вимірювання високих температур та робота в умовах підвищеної небезпеки.
5. Забезпечення формування бази даних вихідного стану досліджуваного об'єкту та динаміки процесу його експлуатації чи функціонування [32].

Таким чином, перспективність використання тепловізорів у найрізноманітніших галузях промислового комплексу визначається потребою реалізації не лише якісної, але й кількісної оцінки РТ поверхні промислових об'єктів. Перехід від якісного аналізу стану поверхні досліджуваного об'єкта до

його кількісної оцінки з одночасним аналізуванням результатів вимірювання дасть змогу підвищити точність ВТ і ГТ та ефективність аналізування ТП. З цією метою доцільним є розробка нових методик ВТ та ГТ із врахуванням випромінювальних властивостей досліджуваних об'єктів та умов проведення досліджень. Саме тому особливо важливим є питання розробки нормативно-технічного забезпечення проведення вимірювань, що визначатиме умови, порядок та процедури проведення дослідження та наступні дії щодо обробки його результатів. Це сприятиме вирішенню ряду проблем формування систем управління технологічними процесами, моніторингу ефективності їх функціонування та інспектування результатів цих процесів.

1.4 Застосування тепловізорів у медицині

У сучасній медицині важливу роль відіграє профілактичний підхід при проведенні досліджень та діагностуванні різноманітних захворювань. Широке застосування отримують неінвазивні методи діагностики, які дозволяють в найкоротші терміни і без оперативного втручання верифікувати діагноз, а згодом неодноразово спостерігати за пацієнтом під час та після проведення лікування. Ці переваги неінвазивних методів діагностики особливо важливі при виявленні онкологічних захворювань, при застосуванні у стоматології, неонатології, психіатрії, оскільки дозволяють не тільки виявити захворювання на ранніх стадіях розвитку, а й проводити моніторинг зі створенням бази даних пацієнтів за допомогою програмного забезпечення. З огляду на це, у медичних дослідженнях все більш актуальним стає термографічний метод як візуалізуючий метод променевої діагностики [33].

Навколо питання доцільності використання термографічного методу в медицині виникало безліч дискусій, які були зумовлені недосконалістю перших тепловізорів, зокрема, при проведенні діагностування захворювань молочних залоз. Їх недоліками можна вважати наступне: низька чутливість, недостатня просторова роздільна здатність, відсутність досвіду аналізування термограм, а, як наслідок, суперечливість результатів. Тому перевага була надана іншим

методам діагностики [34]. Проте, поява тепловізорів третього та четвертого покоління із кращими технічними можливостями (реєстрації ГТ до 0,01 °С для двох точок на відстані 1 мм) сприяє відновленню інтересу медиків до цього методу діагностування [35-36].

У здорової людини кожна область поверхні тіла має характерну термографічну картину, РТ симетричний щодо серединної лінії тіла, а порушення цієї симетрії є основним критерієм тепловізійної діагностики захворювань [37]. Зміна РТ є потенційною ознакою патологічного процесу, що може бути виявлено за такими ознаками [38]: появою аномальних зон гіпертермії або гіпотермії; порушенням нормальної термотопографії судинного малюнка; зміною ГТ в досліджуваній зоні. Таким чином, термографія допомагає виявити співвідношення між виразністю клінічних проявів потенційного захворювання і температурою шкірних покривів [39].

Температура поверхні тіла залежить від трьох основних факторів: особливостей васкуляризації (тобто функціонування судин та лімфатичної системи), рівня метаболічних процесів і відмінностей в теплопровідності. При аналізі термограм повинні враховуватися всі ці фактори. Головним з них є судинний (інтенсивність кровообігу). Збільшення припливу крові або, навпаки, його зменшення, викликане звуженням судин (стенозом) або їх закупоркою (оклюзією), призводить до підвищення або зниження температури тканин відповідно [40]. Також перспективним є врахування впливу двох інших факторів на реалізацію медичних обстежень тепловізором [41].

На основі аналізу було виділено такі переваги застосування термографії:

- 1) «пасивний характер» діагностування, забезпечення мінімального впливу на хворих при проведенні діагностичних процедур, неінвазивність, відсутність больових відчуттів та безпечність, можливість багаторазового проведення обстежень, відсутність протипоказань, можливість використання, коли інші методи небажані або небезпечні, відсутність вікових та часових обмежень;

2) функціональний характер діагностики, профілактичність обстеження, можливість виявлення порушення в організмі ще до появи структурних змін і часто навіть до клінічних проявів. Це визначає безальтернативність термографії, зокрема, при ракових захворюваннях;

3) зручність при спостереженні за ефективністю лікування, можливість спостерігати процеси в динаміці, уточнювати локалізацію функціональних змін, активність процесу, його поширення та характер змін – запалення, застій або злоякісність;

4) можливість дистанційного діагностування, використання в нетипових умовах (підвищений рівень електромагнітних коливань, відсутність освітлення тощо), портативність (наприклад, експрес-діагностика великих груп населення);

5) широкий спектр діагностування та можливість виявлення відразу декількох груп захворювань, що відсутнє у інших діагностичних методах;

6) відносна дешевизна проведення обстеження, його доступність, швидкість приготування пацієнта до обстеження;

7) наочність результатів і простота їх отримання при високій інформативності (при деяких захворюваннях наближається до 100%, а загалом складає для первинного обстеження близько 80%) [42-43];

8) можливість обстеження всього організму відразу і в рамках одного дослідження отримання інформації про стан здоров'я пацієнта. Достовірність діагностики заснована на стабільності тепловізійної симптоматики, головним параметром якої є сталість і передбачуваність зміни відносних температур, що дозволяє успішно застосовувати теплобачення як метод об'єктивного контролю за перебігом патологічного процесу в організмі [44];

9) можливість візуалізації больового синдрому, котрий завжди призводить до порушення нормальної термотопографії відповідної області;

10) доцільність при діагностуванні захворювань у дітей, які не завжди здатні пояснити, що в них болить;

11) сумісність з іншими методами діагностування;

12) екологічна чистота методу.

Серед негативних сторін застосування термографії доцільно виділити суб'єктивність пояснення термограм, що зумовлено відсутністю карт відхилення. Нині розроблено критерії тепловізійної діагностики більше двохсот захворювань та патологічних станів, і цей список постійно поповнюється [45].

Оскільки термографія є функціональним методом, то вона не дає інформацію про природу проблеми і не придатна для проблем, вирішення яких можливе за допомогою структурних методів. Так як температура не є специфічним показником, то відповідно термографію не можна використовувати в якості референтного методу діагностування. Але слід враховувати той факт, що за будовою можна охарактеризувати функціональні особливості органу і, навпаки, за функціональними проявам анатомічної структури можна орієнтовано визначити його будову. Також при обстеженні необхідне врахування впливу навколишнього середовища, що забезпечується правильністю організації умов роботи. Звичайно це важко забезпечити при нестандартних ситуаціях проведення обстеження, але можна «правильно» врахувати при трактуванні термограм. Деяке ускладнення виникає при наявності у пацієнта надмірної ваги, що необхідно врахувати при розшифруванні термограм, зважаючи на розподіл жирових відкладень.

Проте, за літературними даними нині за допомогою термографії відбувається діагностування більше 150 захворювань [40]. Загалом можна сформулювати такі області застосування термографії в клінічній медицині:

1. Первинна діагностика захворювань запального і функціонального характеру (присутність запалення та зміна активності органів і тканин).
2. Диференційна діагностика запальних, дегенеративно-дистрофічних захворювань, больового синдрому.
3. Тепловізійний контроль в процесі проведеної терапії.
4. Попередня експрес-діагностика деяких ургентних захворювань.
5. Рання діагностика прихованих і доклінічних форм захворювань.
6. Масова скринінг-діагностика.

Також наводимо перелік тих сфер медицини, у яких можливе застосування термографії, та конкретні захворювання, до виявлення яких термографія вже застосовувалася або є потенційно ефективною у застосуванні:

- сфери: терапія, неврологія, ортопедія, ревматологія, онкологія, травматологія, діагностика і моніторинг спортивних травм і захворювань спортсменів, неонатологія, офтальмологія, урологія, кардіохірургія, реабілітаційна діяльність, стоматологія, акушерство, дерматологія, мікрохірургія, протезування, трансплантологія;

- захворювання або патологічні стани: капілярна дисфункція, нервово-м'язові розлади, дисфункція нервових закінчень, запальний артрит, пошкодженні м'язів чи скелету (закриті переломи, забої), синдром Рейнода, мастопатія, первинні пухлини, метастазування, захворювання шлунково-кишкового тракту, сечостатевої системи, лор-органів, імунодефіцит, натальні травми, діабетична ангіопатія, захворювання щитовидної та слинних залоз, захворювання судин кінцівок (атеросклероз нижніх кінцівок), вегето-судинна дистонія, діабет, травми верхнього шийного відділу хребта, анокопчиковий больовий синдром (кокцигодінія), системний склероз, імпічмент-синдром, остеохондроз хребта, остеоартрит коліна, катаракта, синдром рефлекторно-симпатичної дистрофії, закриті переломи, порушення мозкового кровообігу, артрити, бурсити, опіки і відморожень, гострий апендицит, панкреатит, холецистит, мігрень, поліневропатія, панічні атаки.

Таким чином, зважаючи на вищенаведену інформацію, варто відмітити, що термографія не конкурує з іншими методами діагностики. Вона прагне зайняти свою нішу як «переддіагностичний» та «профілактичний» метод.

Особливо доцільно відмітити значні можливості термографії не лише при оцінюванні ступеня патології, прийнятті рішення про лікування та наступний його контролю, але й її унікальність щодо визначення захворювань на доклінічній стадії (зокрема, це стосується пухлин, коли інші методи їх не виявляють через надто малі розміри), що надважливо для прийняття

превентивних заходів, проведення профілактичного лікування для попередження розвитку патологічного процесу.

Таким чином, у сучасній медицині, як і у промисловості, термографія використовується переважно як якісний метод дослідження. Це значною мірою зумовлено відсутністю чітких термографічних критеріїв, а також відносно легкою, на перший погляд, інтерпретацією термограм, часто без знання нормальної термографічної картини конкретного об'єкта дослідження [45].

Отже, можливості методу найрізноманітніші та перспективні, але для підвищення ефективності застосування необхідним є врахування умов проведення обстеження різних груп пацієнтів на основі фізичних законів та медичних аспектів. Це можна реалізувати, як і у промисловості, шляхом розробки методик проведення ВТ та ГТ й аналізування результатів тепловізійних досліджень.

1.5 Проблеми низької точності вимірювань температури за випроміненням з використанням тепловізора

Основною проблемою ВТ за ІЧВ за допомогою тепловізорів є низька точність ВТ поверхні об'єкта дослідження. Зумовлена вона впливом факторів навколишнього середовища, дію яких на результати вимірювання важко врахувати. Значний вплив на точність вимірювань виникає у результаті необхідності введення апріорної інформації у систему тепловізора про параметри проведення дослідження, значення яких суб'єктивно вибираються спеціалістом з неруйнівного контролю (НК). Зокрема, низька точність результатів тепловізійного дослідження зумовлена впливом:

- випромінювальних властивостей поверхні об'єкта дослідження;
- ФВ сторонніх об'єктів;
- пропусканням проміжного середовища.

При цьому відхилення від дійсного значення температури може значно перевищувати значення похибки ЗВТ і становити сотні градусів [46-48, 15].

Вплив цих факторів на потік випромінювання, що сприймається оптичною системою тепловізора в робочих умовах його експлуатації, можна описати так:

$$\Phi(\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\tau_w(\lambda, T_{amb.}) \cdot \varepsilon_o(\lambda, T) \cdot C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_o}} - 1)^{-1}) d\lambda + (\tau_w(\lambda, T_{amb.}) \cdot (1 - \varepsilon_o(\lambda, T)) \cdot \Phi_w(\lambda, T_f)) \quad (1.5)$$

де $\tau_w(\lambda, T_{amb.})$ – КППС в робочий умовах;

$\varepsilon_o(\lambda, T)$ – КВ поверхні об'єкта дослідження;

$\Phi_w(\lambda, T_f)$ – потік ФВ.

Узагальнена схема вплив цих факторів на ОПС тепловізора у робочих умовах представлена на рисунку 1.2.

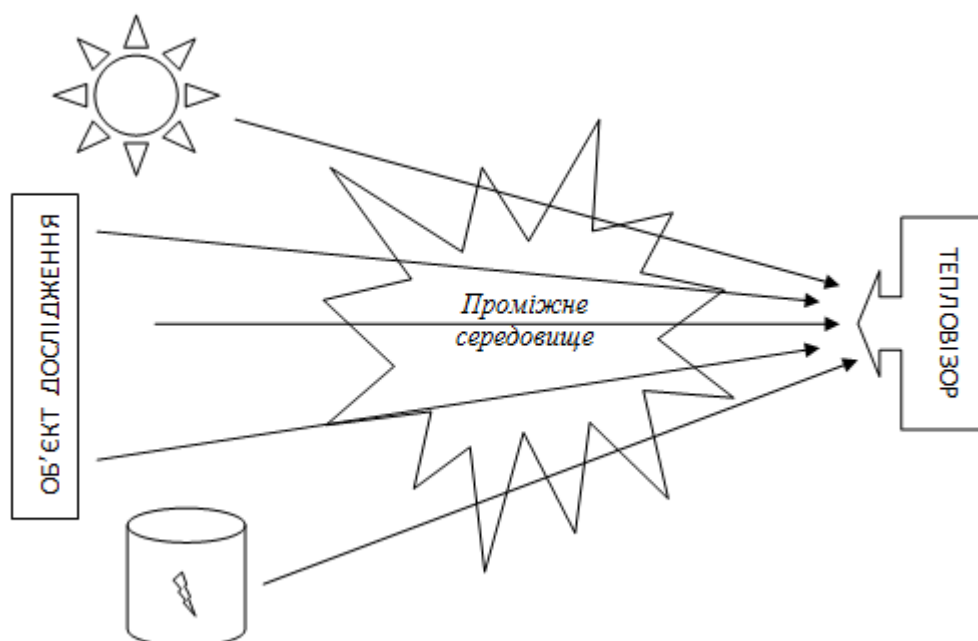


Рисунок 1.2 – Схема проведення ВТ за ІЧВ у реальних умовах експлуатації

Також значний вплив на результати має суб'єктивна складова похибки, що зумовлена правильністю виконання процедур вимірювань, розуміння фізичних основ дослідження, введення необхідних поправок на

випромінювальні властивості складних за формою та матеріалом об'єктів, вибору значень параметрів, що вводяться у систему тепловізора оператором (Рисунок 1.3). Тому важливе значення має рівень кваліфікації та підготовки персоналу, який працює з тепловізором. Адже основним завданням тепловізійного дослідження є не отримання якісного зображення – термограми, а коректних значень температури ТП об'єкта дослідження, тобто РТ, що дозволить провести кількісний аналіз результатів тепловізійного дослідження.

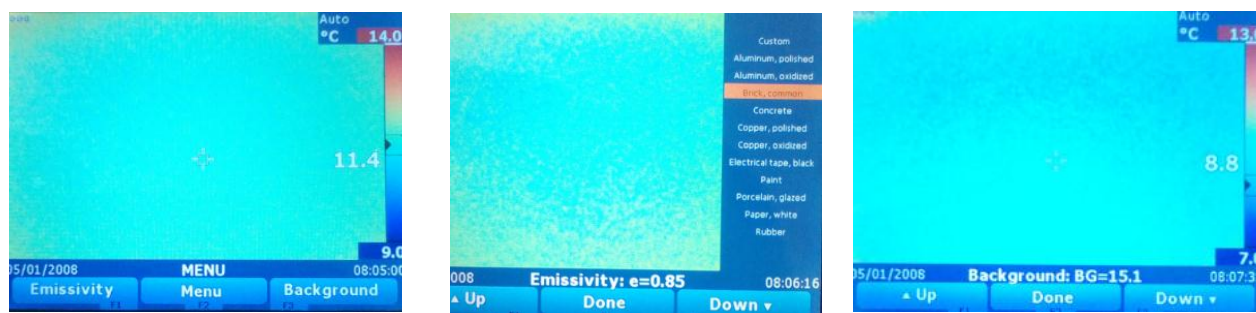


Рисунок 1.3 – Зображення дисплею тепловізора із можливістю вибору параметрів проведення тепловізійного дослідження

Відповідно, щоб забезпечити можливість підвищення точності ВТ за ІЧВ, необхідно вимірювати значення цих факторів та вводити поправки при опрацюванні вихідного сигналу тепловізора.

Існуючі методи їх визначення зводяться в основному до теоретичної оцінки, що часто ґрунтуються на використанні табличних даних, проведенні вимірювань за умов, коли мінімізується вплив даних факторів, або ж експериментальному визначенні кожного з них у лабораторних умовах, що не дозволяє відтворити реальні умови вимірювань. Їх застосування не забезпечує високоточного ВТ за ІЧВ у реальних умовах у будь-який момент часу. Розглянемо детально кожен із зазначених факторів та існуючі практичні методи визначення їх значень.

Щодо впливу випромінювальних властивостей поверхні об'єкта дослідження, то основною причиною істотної її дії на точність ВТ, є насамперед відсутність в умовах вимірювань достовірної інформації про

значення КВ поверхні об'єкта дослідження. При цьому, часто упускається той факт, що КВ характеризує не конкретний матеріал, а стан та властивості поверхні об'єкта дослідження в даних умовах. Водночас при вимірюваннях в основному користуються апріорною інформацією, запропонованою програмним забезпеченням тепловізора, що передбачає використання табличних даних про значення КВ саме для конкретних матеріалів.

Методи визначення значення КВ умовно поділяються на прямі (на основі кількості енергії) та непрямі (на основі закону Кірхгова за відбивною чи поглинальною здатністю) [49]. Обидва типи передбачають одночасне визначення температури досліджуваного об'єкта. До основних із них відносимо: метод «чорного тіла», метод «плями», метод багатоспектральної корекції випромінювальних характеристик поверхні, метод «пірометра», спектроболометричний метод, метод «підсвітки», метод вимірювання в поляризованому світлі, метод оптичних сталей, метод поглинання, тестові методи [50-53]. Проте, спільним недоліком усіх цих методів є те, що вони передбачають визначення КВ лише для певних об'єктів за конкретно визначених умов. Водночас жоден із них не дозволяє врахувати значення ФВ, що формує значення температури досліджуваного об'єкта, а відповідно і значення КВ, що визначається експериментальним шляхом.

Також у робочих умовах може бути присутнім інтенсивне сонячне випромінювання та інші потужні джерела випромінювання, зокрема, об'єкти з істотно відмінною температурою від температури об'єкта дослідження. При цьому значення КВ досліджуваного об'єкта відмінне від 1, тому згідно закону Кірхгофа для непрозорих об'єктів присутньою є здатність до відбивання ФВ, що діє на поверхню об'єкта дослідження [54]. Величину ФВ можуть формувати випромінювання сторонніх об'єктів (зокрема, Сонця [55], освітлювальних приладів, систем кондиціонування та опалення, об'єктів дослідження з температурою, відмінною від температури об'єкта дослідження, і т.д.), випромінювання інших частин об'єкта дослідження з відмінною температурою та випромінювання проміжного середовища [56].

Водночас при проведення вимірювань у системі тепловізора передбачено введення значення лише температури навколишнього середовища («background temperature»). Тому доцільним є врахування саме значення потоку відбитого ФВ на значення вихідного сигналу тепловізора.

До основних методів коректування впливу фону відносять: метод ефективних яскравостей [57], використання при вимірюваннях поляризаційного радіометра, двокутовий метод корекції (кути візування 0° та 60°), метод безпосереднього визначення ФВ, диференційний метод [51].

Кожен із представлених методів має свої недоліки: перший та третій не дозволяють розраховувати ФВ для об'єктів із різнорідною поверхнею, другий, четвертий та останній вимагають використання додаткового обладнання, та жоден із запропонованих методів не дозволяє врахувати сумарне значення ФВ, що потрапляє на ОПС тепловізора від усіх його складових.

Окрім того, у роботі [54] представлені способи зменшення впливу ФВ, а саме: екранування поверхні об'єкта дослідження, збільшення КВ поверхні досліджуваного об'єкта за рахунок, наприклад, покривання фарбою чи шаром матеріалу із більшим значенням КВ, проведення вимірювань за умови, коли температура ФВ наближається до температури об'єкта дослідження. Проте, ці способи мають обмежену сферу застосування.

Комбінування вищезазначених методів визначення ФВ та способів зменшення його впливу, можуть сприяти істотному зменшенню величини методичної похибки, проте доцільним було б розроблення такого методу, що передбачав би врахування сумарного потоку ФВ, властивого даним умовам при перетворенні вихідного сигналу у значення температури.

Останнім впливним фактором визначено пропускання проміжного середовища, адже часто дослідження проходять на відкритому повітрі або у приміщеннях із підвищеною вологістю, із забрудненим чи загазованим повітрям тощо. Внаслідок цього виникає необхідність врахування можливості послаблення випромінювання, а відповідно і зростання значення методичної

похибки. Значення КППС повинно враховувати поглинання та розсіювання середовища, у якому проводиться вимірювання.

Серед існуючих методів визначення КППС виділимо наступні: метод розрахунку передавальної функції атмосфери, метод багатоспектральної корекції, різновисотні методи дослідження підстилаючої поверхні, багатокутові методи огляду підстилаючої поверхні [51]. Незважаючи на їх різноманітність, найнадійнішим є експериментальне визначення в конкретних умовах.

Таким чином, достовірно знаючи параметри, що визначають результат функції перетворення вихідного сигналу окремого приймача матриці ПВ тепловізора у значення точкової температури, можна істотно підвищити точність результатів ВТ за ІЧВ в реальних умовах.

Саме тому виникає потреба у розробці такого методу ВТ та ГТ за ІЧВ, що забезпечуватиме визначення та врахування значення даних впливних факторів потоку випромінення, що потрапляє на окремий приймач матриці ПВ тепловізора, з метою підвищення точності вимірювання не лише ГТ, окремого значення точкової температури, але і РТ поверхні загалом. Це дозволить також виключити суб'єктивну складову похибки, зумовлену необхідністю оператора вибирати та вводити значення параметрів проведення дослідження.

Отже, ефективність застосування тепловізорів у промисловості та медицині залежить не тільки від їх метрологічних характеристик, програмного забезпечення при опрацюванні результатів дослідження, але й від можливості врахування вищерозглянутих впливних факторів та реалізації на цій основі методики ВТ та ГТ за ІЧВ.

1.6 Особливості проведення калібрування тепловізорів у калібрувальних лабораторіях

У Законі України «Про метрологію та метрологічну діяльність» № 1314-18 від 05.06.2014, що набрав чинності 01.01.2016, подано таке визначення ЗВТ: «це засоби вимірювань, вимірювальні системи, матеріальні міри, стандартні зразки та будь-які частини засобів вимірювань або

вимірювальних систем, якщо ці частини можуть бути об'єктом спеціальних вимог та окремого оцінювання відповідності». Таким чином, приходимо до висновку, що у визначенні ЗВТ, у нашому випадку тепловізора, є потреба зазначати основну нормовану метрологічну характеристику та умови оцінки її відповідності, які повинні бути враховані, а деякі з них і наперед задані приладу. Окрім того, внесення окремих вхідних даних обмежує функціонал тепловізора, адже позиціонує його лише як вимірювальну систему, опускаючи можливості його використання як засобу спостереження та аналізування. Також з визначення стає зрозумілим, що для визнання приладу ЗВТ необхідним є наявність спеціальних вимог до нього та окремого оцінювання відповідності.

Проаналізуємо також поняття калібрування та повірки ЗВТ, запропоновані цим законом. Згідно нього калібрування є «сукупністю операцій, за допомогою яких за заданих умов на першому етапі встановлюється співвідношення між значеннями величини, що забезпечуються еталонами з притаманними їм невизначеностями вимірювань, та відповідними показами з пов'язаними з ними невизначеностями вимірювань, а на другому етапі ця інформація використовується для встановлення співвідношення для отримання результату вимірювання з показу». При цьому повірка – це «сукупність операцій, що включає перевірку та маркування та/або видачу документа про повірку ЗВТ, які встановлюють і підтверджують, що зазначений засіб відповідає встановленим вимогам». Таким чином, зрозуміло, що повірка поняття ширше і включає до свого складу операції калібрування. Проте, повірка не обмежена лише операціями калібруванням та паперовим підтвердженням відповідності, а може включати і ряд інших операцій, адже сконцентрована не на метрологічних характеристиках ЗВТ, а на перевірці ЗВТ загалом із наступним підтвердженням відповідності встановленим вимогам.

Діюча нормативна база України, що стосується питань повірки та калібрування тепловізійної техніки обмежена двома документами: ДСТУ 3194:2005 [58] та МПУ 219/06-2008 «Інструкція. Метрологія. Тепловізори. Методика повірки». В даних документах поняття «калібрування» розглядається

лише в межах операцій повірки. Зазвичай повірка та калібрування тепловізорів відбувається в калібрувальній лабораторії згідно ДСТУ 3194:2005. За нормальних умов, похибка ЗВТ, що повіряється, від дії сукупності впливних факторів не має перевищувати 35 % границі допустимої основної похибки ЗВТ. Дані умови передбачені ГОСТ Р 8.619-2006 [19], де вказано, що окрім умов, зазначених у ГОСТ 8.395-80 [59], повинні враховуватися вимоги експлуатаційних документів на тепловізор конкретного типу. Окрім того, в ДСТУ 3194:2005 границі допустимих абсолютних похибок робочих ЗВТ мають бути не більше 8 °С у діапазоні від -50 °С до 961,78 °С. ВТ за ІЧВ реалізуються тепловізорами, які за результатами калібрування в калібрувальній лабораторії визнаються придатними.

Значення параметрів в нормальних умовах калібрування знаходяться в таких межах [58]:

- температура навколишнього повітря (20 ± 5) °С;
- відносна вологість повітря (65 ± 15) %;
- атмосферний тиск ($101,325 \pm 3,000$) кПа;
- напруга живлячої мережі ($220 \pm 4,4$) В;
- частота змінного струму ($50 \pm 0,5$) Гц;

Особливими додатковими умовами при калібруванні тепловізорів є:

- відсутність потужного ФВ, адже калібрування їх відбувається з використанням еталонного випромінювача у вигляді моделі АЧТ із КВ близьким до 1, тому при калібруванні фактор впливу ФВ нівелюється. Безумовно, що у промислових умовах для уникнення такого впливу намагаються проводити вимірювання у похмурий день, усунути вплив додаткових джерел енергії, у цехах та діагностичних кабінетах мінімізувати розміри віконних прорізів тощо;

- тепловізори, що калібруються, та інші засоби вимірювання, що використовуються під час калібрування, перед початком перевірки повинні знаходитися за температури (20 ± 5) °С не менше 6 годин;

- на тепловізор не повинні впливати: удари, вібрації, зовнішні електромагнітні поля, сторонні джерела випромінювань, що впливають на покази ЗВТ, пари кислот, лугів, а також гази, що викликають корозію [60].

Проведемо дослідження впливних факторів, які безпосередньо визначають результати калібрування в нормальних умовах. Потік випромінювання, що при цьому надходить на ОПС тепловізора описуємо виразом:

$$\Phi(\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\tau_n(\lambda, T_{amb.}) \cdot \varepsilon_{bb}(\lambda, T) \cdot C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_{bb}}} - 1)^{-1}) d\lambda + (\tau_n(\lambda, T_{amb.}) \cdot (1 - \varepsilon_{bb}(\lambda, T)) \cdot \Phi_n(\lambda, T_f)) \quad (1.5)$$

де $\tau_n(\lambda, T_{amb.})$ – КППС в нормальних умовах, значення якого наближається до 1;
 $\varepsilon_{bb}(\lambda, T)$ – КВ еталонного АЧТ, що використовується при калібруванні тепловізора в калібрувальній лабораторії;
 $\Phi_n(\lambda, T_f)$ – потік ФВ оточуючих предметів в нормальних умовах, що потрапляє на ОПС тепловізора, який калібрується, значення якого відповідає температурі оточуючого середовища (20±5) °С.

Але в робочих умовах значення впливних параметрів відрізняють від значень в нормальних умовах, яких дотримуються при калібруванні тепловізорів в калібрувальних лабораторіях. Також випромінювальні властивості поверхні реального об'єкта відрізняються від випромінювальних властивостей АЧТ.

Зрозуміло, що забезпечення нормальних умов в реальних умовах проведення тепловізійного дослідження є неможливим, вони істотно можуть різнитися від робочих умов експлуатації конкретних промислових об'єктів чи типових умов проведення діагностики об'єктів медицини.

Таким чином, при відхиленні умов від нормальних присутньою є додаткова похибка, що виникає додатково до основної похибки внаслідок відхилення якої-небудь із впливних величин від нормального її значення або внаслідок її виходу за межі нормальної області значень [61]. Зумовлено це тим, що у робочих умовах присутнім може бути істотне ФВ, підвищене значення вологості, наявність опадів, пилу у повітрі і т.д.. Окрім того, КВ досліджуваного об'єкта є меншим 1, його

значення часто визначити неможливо. Для прикладу зазначимо, що відхилення температури оточуючого середовища на кожні 10 °С спричинює додаткову похибку, значення якої дорівнює половині основної похибки ЗВТ [62].

Це призводить до того, що визначення реального значення температури за функцією калібрування тепловізора, встановленою в калібрувальній лабораторії в нормальних умовах, буде неможливим внаслідок впливу на інформативний сигнал низки впливних параметрів, які характерні для конкретних умов проведення тепловізійного дослідження. Випромінювальні властивості об'єкта, ФВ, пропускання проміжного середовища в робочих умовах відрізняються від значень цих впливних факторів в нормальних умовах. Дію впливних факторів на результати вимірювання проілюстровано на рисунку 1.4. Визначення значення температури відбувається згідно з функцією калібрування $S_{cal.}$, за якою у нормальних умовах значенню сигналу S_n відповідає значення температури T_n .

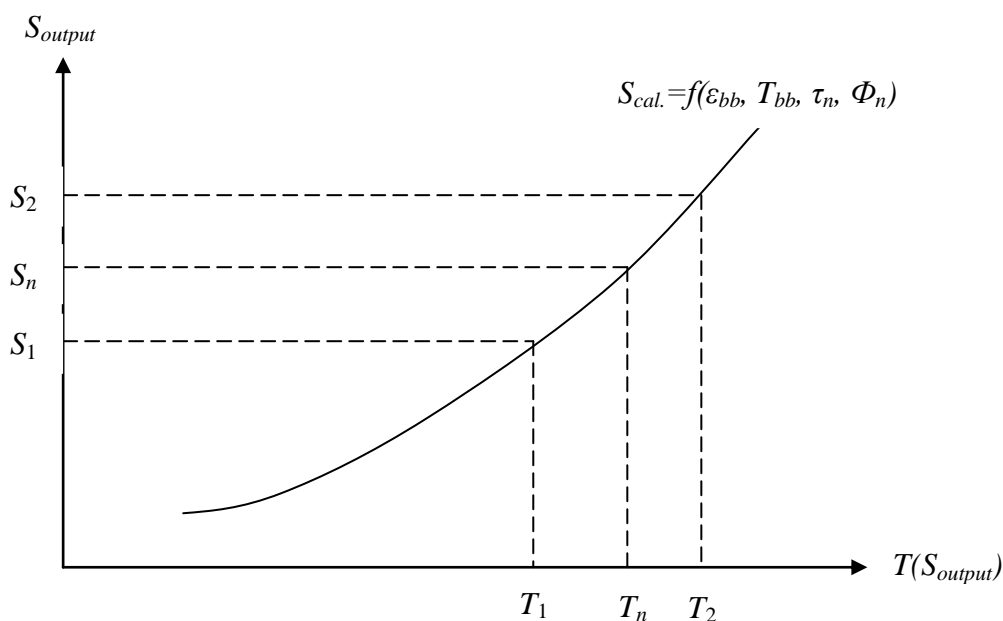


Рисунок 1.4 – Дія впливних факторів у робочих умовах на значення вимірюваної температури, яке визначається за калібрувальною функцією, встановленою в нормальних умовах

У процесі вимірювань в робочих умовах значення температури T_n визначається вже за значеннями вихідних сигналів S_1 та S_2 , що враховують вплив

факторів при даних умовах вимірювання. Тому при визначенні температури отримуємо величини T_1 та T_2 відповідно, що призводить до додаткової методичної похибки, спричиненої впливними факторами. При чому, як видно з рисунка, однакова величина відхилення значення вихідного сигналу $|S_n - S_1| = |S_n - S_2|$, але з різним знаком, призводить до зміни значення температури на різну величину $|T_n - T_1| > |T_n - T_2|$.

Отже, покази відкаліброваного за АЧТ у нормальних умовах тепловізора при застосуванні його для ВТ поверхні об'єкта в робочих умовах експлуатації будуть різнитися. Це визначає похибку ВТ за ІЧВ в умовах експлуатації [63] як різниці дійсного та виміряного значення температур.

Таким чином, для підвищення точності та достовірності вимірювань виникає потреба у калібруванні тепловізорів безпосередньо перед використанням на конкретному об'єкті, адже похибка вимірювання під впливом факторів робочих умов може становити десятки і навіть сотні градусів [64-66], та розробленні такої методики калібрування, яка забезпечуватиме врахування дії цих впливних факторів. Це є також обґрунтованим з точки зору, що необхідність проведення калібрування при експлуатації ЗВТ, на які не поширюється державний метрологічний нагляд, визначається їх користувачем. Відповідно виникає потреба у введенні поправки для забезпечення потрібної точності результатів вимірювання. На сьогодні це найнадійніший спосіб підвищення достовірності ВТ та ГТ за ІЧВ в робочих умовах експлуатації.

1.7 Аналіз нормативного забезпечення вимірювань температури та градієнта температури теплового поля об'єктів промисловості та медицини

Питання достовірної візуалізації результатів ВТ та ГТ за ІЧВ й надійності їх обробки особливо гостро постає у світлі нових напрямків роботи щодо удосконалення метрологічної системи України, а саме питань реалізації єдиної технічної політики у сфері метрології, створення нормативно-правових, нормативних, науково-технічних та організаційних основ забезпечення єдності вимірювань у державі [67].

Зважаючи на це, доцільно провести аналіз сучасного стану нормативного забезпечення вимірювань РТ ТП об'єктів промисловості та медицини з метою виявлення питань, які потребують доопрацювання, та обґрунтування доцільності удосконалення існуючого нормативно-технічного забезпечення.

Міжнародною організацією зі стандартизації ISO [68] сформовані стандарти, що стосуються ВТ та ГТ ТП об'єктів промисловості та медицини, подані в таблиці Г.1 додатків. Ці стандарти є передумовою появи уніфікованої термінології, формування стандартних процедур застосування тепловізійних систем, вимог до кваліфікації персоналу та застосування методу якісного дослідження для вирішення конкретних промислових завдань (у даному випадку, сфери машинобудування та будівництва).

В Міжнародній електротехнічній комісії ІЕС [69] питаннями термометричних вимірювань у промисловості займається група WG 5 (Температурні датчики та прилади) підкомітету SC 65B (Вимірювання та засоби контролю) технічного комітету TC 65 (Процеси вимірювання, контролю та автоматизації у промисловості). У сферу компетенції даної групи (включає 23 особи, із них 2 представника із Росії та жодного з України) входять питання стандартизації робочих характеристик промислових датчиків температури та приладів, включаючи контактну і безконтактну технології. Дана група істотно увагу приділяє питанням роботи термометрів випромінення (ТМВ), але питання використання тепловізорів поки відхилено, зокрема, через відсутність фахівців, що зазначено у примітках до вже закритого проекту PNW 65b-724 Ed. 1.0 Industrial inspecting thermal imagers (CD: 2009-12, IS: 2012-07). Проте, практичне значення термографічного методу все ж згадується у технічній специфікації ІЕС ІЕС/TS 60904-12 Ed. 1.0 Photovoltaic devices – Part 12: Infrared thermography of photovoltaic modules, щоправда, створеним уже технічним комітетом TC 82 (Сонячні фотоелектричні енергетичні системи). При цьому термографічний метод частково розглядається у нормативних документах із описом НК.

Щодо термографії у медицині, то це компетенція спільної із підкомітетом ISO/TC 121/SC 3 робочої групи JWG 8 (Клінічні термометри) підкомітету SC

62D (Електромедичне обладнання) технічного комітету ТС 62 (Електрообладнання в медичній практиці). В описі сфери діяльності SC 62D зазначено, що підкомітет займається розробкою конкретних міжнародних стандартів і технічних звітів для електричного устаткування, що використовується в медичній практиці. Ці документи охоплюють безпеку та/або ефективність роботи обладнання, а також пов'язані із цим термінологію, концепції, визначення і символи. Типи обладнання, що підпадають під сферу SC 62D, включають в себе обладнання, що використовується для діагностики пацієнтів, для моніторингу пацієнтів, для лікування або як допоміжний засіб при лікуванні хворих.

Група JWG 8 була створена для розробки лише двох стандартів ISO 80601-2-56: Medical electrical equipment – Part 2-56: Particular requirements for basic safety and essential performance of clinical thermometers for body temperature measurement та IEC 80601-2-59:2008 Medical electrical equipment – Part 2-59: Particular requirements for the basic safety and essential performance of screening thermographs for human febrile temperature screening. Другий із них стосується базової безпеки та суті виконання скринінгової термографії, призначеної до використання в індивідуальному порядку для проведення скринінгу температури людини у стані лихоманки при кімнатних умовах. При цьому встановлюються граничні значення лабораторних характеристик проведення випробувань для скринінгової термографії. Даний стандарт був узятий за основу при створенні ISO/TR 13154:2009 Medical electrical equipment – Deployment, implementation and operational guidelines for indentifying febrile humans using a screening thermograph, де в описі додано, що даний метод застосовується для попередження поширення інфекції.

Серед списку діючих рекомендацій Міжнародної організації законодавчої метрології OIML [70], що стосуються температурних вимірювань (їх близько 9), питань термографічних вимірювань стосується лише одна, а саме R 141-EN Procedure for calibration and verification of the main characteristics of thermographic instruments (2009), де вказано загальне призначення тепловізійних

приладів і визначено порядок їх калібрування, а також первинної і наступних перевірок (дотична до ГОСТ Р 8.619-2006 [19]).

Американське об'єднання випробувань та матеріалів ASTM International [71] займається створенням добровільних стандартів на основі консенсусу промислових компаній (її членів) із різних країн, тому питання використання термографії у промисловості не могло обійти сферу їх компетенції. Найвідоміші стандарти ASTM International з питань термографії стосуються або питань основних технічних характеристик тепловізійних систем, або практичних рекомендацій по застосуванню методу у конкретній сфері діяльності (таблиці 2.Г додатків).

Стандарт ASTM E1316-14 визначає термінологію, що використовується в стандартах, підготовлених E07 – Комітетом з НК. У переліку термографія не виділена окремо, а включена до інших технічних методів НК.

Стандарт ASTM E1213-14 стосується питання визначення здатності системи «спостережник-тепловізійна система» реєструвати мінімальну розрізнену різницю температур в залежності від просторової частоти, а стандарт ASTM E1311-14 мінімальну виявлену різницю температур залежно від кута зору. При цьому відмінність між цими різницями у тому, що перша є мірою роздільності, а друга видимості.

Стандарт ASTM E1543-14 включає визначення еквівалентної шуму різниці температур тепловізійних систем, що працюють у дальній ІЧ області (FLIR) або інших типів, що використовують оптико-механічний сканер (тобто все, окрім приладів із зарядовим зв'язком і піроелектричних відіконів). При цьому зазначено, що рекомендації стосуються умов проведення вимірювань при температурі 22 °С, а відхилення температури від зазначеної може призвести до погіршення точності та появи зсуву.

Інші стандарти, зазначені у таблиці 2.Г, стосуються порядку застосування методу ІЧ термографії для вирішення практичних завдань, а саме при виявленні дефектів у бетонному та асфальтовому покритті мостів, для моніторингу стану електричного та механічного обладнання (зокрема і тих, що знаходяться при

високих температурах, у русі чи під електричною напругою), в аерокосмічній галузі із метою виявлення дефектів елементів, виготовлених із композитних матеріалів під дією додаткового нагрівання (в рамках загального стандарту для НК та конкретно в окремому стандарті щодо використання термографічного методу), при визначенні теплового потоку та температури елементів огорожувальних конструкцій на місцях, для виявлення стану ізоляції каркасних будинків, місць протікання покриття тощо.

Нормативне забезпечення вимірювань РТ ТП об'єктів дослідження в Україні представлено міждержавними та державними стандартами, методиками метрологічної перевірки та виконання вимірювань, що відображено у таблиці Г.1 додатків [72].

Таким чином, у результаті проведення аналізу міжнародної нормативно-технічної документації та нормативно-технічних документів України із питань вимірювань РТ ТП об'єктів промисловості та медицини, виявлено, що акцент зроблено на узагальненні термінології та розробці метрологічного забезпечення тепловізорів як ЗВТ, використанні лише основ якісного аналізування термограм та використання тепловізорів в окремих галузях промисловості та сферах медицини. Також у міжнародних документах зазначено необхідність формування вимог до кваліфікації персоналу, відмічено відсутність фахівців на міжнародному рівні у сфері використання тепловізорів та зацентовано увагу на обов'язковості сертифікації фахівців з тепловізійного методу в рамках НК.

Щодо власне нормативно-технічного забезпечення України, то тут слід відмітити його застарілість щодо термінології, охоплення лише окремих сфер діяльності, відсутність єдиних підходів до реалізації вимірювань, недоопрацювання питань зменшення методичної похибки та відсутність методик опрацювання результатів вимірювання з використанням поняття непевність, а також часткову невідповідність сучасним міжнародним документам, представленим вище. Таким чином, враховуючи ці недоліки, доцільним є удосконалення методик виконання тепловізійних вимірювань та аналізування їх результатів на основі обґрунтування істотної дії впливних

факторів робочих умов експлуатації, розробка методик проведення додаткового калібрування на місцях та обробки отриманих результатів на основі поняття непевності.

1.8 Засади оцінювання непевності вимірювання температури та градієнту температури за інфрачервоним випроміненням

При застосуванні тепловізійної техніки одним із важливих критеріїв якості вимірювань є точність ВТ та ГТ, яка вказана виробниками в супровідній документації. При цьому слід зазначити, що точність результатів вимірювання є значно нижчою. Ця невідповідність спричинена тим, що в супровідній документації до тепловізорів вказане значення температурної чутливості або основної похибки ВТ, що відповідає інструментальній складовій похибки. До того ж, вона визначена в рамках проведення повірки та калібрування тепловизора в лабораторіях за нормальних умов. Відповідно її значення може істотно різнитися від значення, отриманого в умовах експлуатації.

Проблеми в оцінюванні точності результатів тепловізійних досліджень, що зумовлені технічними особливостями приладу, методикою проведення досліджень, рівнем кваліфікації персоналу, впливними факторами вимірювань, є істотною перешкодою в ефективному застосуванні тепловізорів для кількісної оцінки стану об'єктів та перебігу процесів і явищ, що вивчаються. Основні джерела виникнення непевності тепловізійних досліджень представлені в таблиці Д.1 додатків [73-74].

Міжнародні стандарти з питань розробки методик вимірювань передбачають оцінювання непевності в рамках кількісного опрацювання результатів вимірювань згідно нормативної документації [75].

За даними Міжнародного словника основних та загальних термінів з метрології (VIM) точність визначається як близькість виміряного значення величини до істинного значення вимірюваної величини (VIM 2.13) [76]. Числовим виразом міри точності згідно VIM прийнято визначати непевність.

Тому виробники тепловізійної техніки, вказуючи значення точності результатів вимірювання, невірно користуються діючою метрологічною термінологією.

Також згідно з міжнародним стандартом ISO/IEC 17025:2005 [77], впровадженим і в Україні, мірою довіри до результатів вимірювань, випробувань продукції та калібрування ЗВТ визнано поняття «непевність вимірювань», тобто для оцінювання якості результату вимірювання доцільно спиратися не на класичне поняття «похибка вимірювання», а на її ймовірнісні характеристики. Таким чином, непевність – «це невід’ємний параметр, що характеризує розсіяння значень величини, які приписують вимірюваній величині на підставі наявної інформації» (VIM 2.26).

Оцінка непевності результатів вимірювань є одним з основних етапів розробки методик виконання вимірювання різних фізичних величин, методик калібрування ЗВТ, а також використовується при оцінюванні результатів випробувань.

Непевність ВТ та ГТ за ІЧВ не можна визначити на підставі інформації, що надається виробниками або представлена у діючих методиках проведення тепловізійних досліджень. Таким чином, складаючи звіт про результати тепловізійного дослідження, дослідник стикається з проблемою необхідності подання кількісних характеристик якості результату так, щоб можна було правильно оцінити його точність. Без цього результати вимірювань не можна порівняти ні між собою, ні з довідковими величинами, наведеними, наприклад, у специфікаціях, стандартах чи інших нормативно-технічних документах [78-79]. Тому важливим є оцінювання вимірювань на основі концепції непевності. Саме тому виникає необхідність у розробці цілісної методики визначення непевності тепловізійних досліджень.

Висновки до розділу 1

Сучасні тепловізори володіють такими технічними характеристиками, які дозволяють використовувати їх для контролю температури широкого діапазону (від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1200\text{ }^{\circ}\text{C}$) з високою швидкістю (до 10^{-6} c) та можливістю

динамічної візуалізації. Їх застосування є актуальним в багатьох галузях промисловості та медичній діагностиці.

Але при застосуванні тепловізорів як засобів вимірювання температури та градієнта температури поверхонь об'єктів непевність результатів дослідження є високою внаслідок недосконалості нормативно-технічного забезпечення тепловізійної техніки, зокрема:

- 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. Як наслідок, відхилення від істинного значення температури може значно перевищувати значення похибки засобу вимірювання і становити десятки відсотків, адже похибка засобу вимірювання, що подається виробниками як основна похибка вимірювання температури відповідає лише інструментальній складовій похибки;

- у реальних умовах обмежене застосування існуючих методів підвищення точності вимірювання температури за інфрачервоним випроміненням з використанням тепловізора.

Аналіз показав, що це спричинено відсутністю єдиних наукових підходів до методів реалізації тепловізійних вимірювань у промисловості та медичних дослідженнях; необхідністю врахування дії впливних факторів умов експлуатації тепловізорів та доцільністю проведення додаткового калібрування в робочих умовах експлуатації (*in-situ calibration*); відсутністю методик виконання вимірювань у реальних умовах та методик опрацювання результатів тепловізійних вимірювань із використанням поняття «непевність»; низьким рівнем підготовки персоналу до проведення тепловізійних досліджень.

Тому метою роботи є 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, що

формуватимуть комплекс конкретної супровідної нормативно-методичної документації для ефективної реалізації тепловізійних досліджень.

На основі проведеного аналізу фізичних основ тепловізійних досліджень, особливостей застосування тепловізорів в промисловості та медицині для вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням, існуючих проблем процесу дослідження та нормативно-технічного забезпечення вимірювань розподілу температури теплового поля об'єктів промисловості та медицини сформульовано подальші завдання роботи:

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

2. Розробити метод вимірювання температури та градієнта температури в робочих умовах та методику додаткового калібрування тепловізорів на місцях в рамках визначення коефіцієнтів випромінення, пропускання проміжного середовища та фонового випромінення для отримання дійсних значень розподілу температури поверхні досліджуваного об'єкта.

3. Розробити методику калібрування тепловізора у робочих умовах експлуатації.

4. Розробити технічні засоби для реалізації методу вимірювання та методики калібрування тепловізора в робочих умовах проведення вимірювань.

5. Провести моделювання реалізації запропонованих методу та методик, експериментальні тепловізійні дослідження з метою оцінки ефективності запропонованого нормативно-технічного забезпечення.

6. Сформулювати нормативно-методичні документи щодо забезпечення організації та проведення тепловізійних досліджень, а саме програму навчання 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 об'єктів промисловості та медицини.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ОЦІНЮВАННЯ НЕПЕВНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ГРАДІЄНТА ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ОБ'ЄКТІВ ЗА ІНФРАЧЕРВОНИМ ВИПРОМІНЕННЯМ

У розділі розглянуто особливості аналізування та оцінювання непевності вимірювання температури та градієнта температури поверхні об'єкта з використанням тепловізора згідно ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement. Запропоновано методику оцінювання непевності типу А результатів тепловізійного вимірювання температури й градієнта температури поверхні об'єкта; інструментальної складової непевності типу В; непевності методу вимірювання температури типу В для вихідного сигналу приймача матриці приймачів випромінення тепловізора. Проведено моделювання окремих складових непевності залежно від впливу різних значень факторів робочих умов експлуатації тепловізора для об'єктів промисловості та медицини.

2.1 Засади формування підходу до аналізування та оцінювання непевності вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням

Формування підходу до оцінювання непевності ВТ та ГТ за ІЧВ проводиться на основі фізичних засад оптичної ТВ, положень міжнародних рекомендацій, викладених в ISO/IEC Guide 98-3:2008 [75], та згідно з вимогами Міжнародного стандарту ISO/IEC 17025:2005 [77].

На основі положень, викладених в цих документах, аналіз та оцінювання непевності тепловізійного дослідження проводиться згідно таких етапів [75]:

- формування рівняння вимірювань;
- аналіз вхідних величин і їх впливу на непевність;
- аналіз оцінювання вихідних величин і їх непевності;

- класифікація окремих складових непевності;
- формування бюджету непевності;
- моделювання оцінювання окремих складових непевності та їх аналізування.

2.2 Формування рівняння вимірювань температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням з урахуванням аналізу вхідних величин

Перший етап процесу оцінювання результатів вимірювань і його непевності включає формування рівняння вимірювання. Рівняння ВТ та ГТ за ГЧВ виражає залежність вихідної величини від вхідних величин, що впливають на отриманий результат вимірювання.

Для тепловізійного методу рівняння сприйняття випромінення ОПС тепловізора від точкового об'єкту поверхні відбувається на основі закону Планка, при цьому:

- інтенсивність випромінення точкового об'єкта з температурою T визначається на наступною формулою:

$$L_{p,q}(\lambda, T_{p,q}) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(k \cdot C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_{p,q}}} - 1 \right)^{-1} \right) d\lambda, \quad (2.1)$$

де k – коефіцієнт, що враховує відстань до об'єкта, кут, площу поверхні;

p – координата окремого мікроболометра матриці ПВ по вісі абсцис, що сприймає температуру точкового об'єкта;

q – координата окремого мікроболометра матриці ПВ по вісі ординат, що сприймає температуру точкового об'єкта.

- різниця інтенсивностей випромінення $\Delta L(\lambda, \Delta T)$ між двома точковими об'єктами з температурою T_{p+x} та T_{q+y} визначається наступним чином:

$$\Delta L(\lambda, \Delta T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(k \cdot C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_{p,q}}} - 1 \right)^{-1} \right) d\lambda - \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(k \cdot C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_{p+x,q+y}}} - 1 \right)^{-1} \right) d\lambda, \quad (2.2)$$

де ΔT – ГТ;

x – значення величини зміщення координати окремого мікроболометра матриці ПВ по вісі абсцис, що сприймає температуру іншого точкового об'єкта;

y – значення величини зміщення координати окремого мікроболометра матриці ПВ по вісі ординат, що сприймає температуру іншого точкового об'єкта.

Рівняння 2.1 та 2.2 носять ідеальний характер. У реальних умовах на інтенсивність випромінювання значний вплив здійснюють значення КВ досліджуваної поверхні, пропускання проміжного середовища, ФВ, а на значення вихідного сигналу $S_{p,q}(\lambda, T_{p,q})$ впливають ще й параметри ОПС тепловізора. При цьому вигляд рівняння вимірювання в реальних умовах проведення вимірювань є набуває наступного вигляду:

$$S_{p,q}(\lambda, T_{p,q}) = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \cdot \tau(\lambda, T_{amb.}) \times \left[\varepsilon(\lambda, T) \cdot C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_{p,q}}} - 1 \right)^{-1} + (1 - \varepsilon(\lambda, T)) \cdot C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1 \right)^{-1} \right] d\lambda + S_N, \quad (2.3)$$

де S_N – сигнал від шуму.

За допомогою тепловізійної техніки на термограмі разом із точковим значенням температури відразу можна отримати візуалізовану інформацію про

РТ по поверхні та оцінити значення ГТ між вибраними точками. Тому рівняння вимірювання для ГТ між двома точками умовно однорідної поверхні (формула (2.4)) та різнорідної поверхні (формула (2.5)) об'єкта дослідження в реальних умовах вимірювання виглядають таким чином:

- для однорідної поверхні з однаковим значенням КВ $\varepsilon(\lambda, T)$:

$$S(\lambda, \Delta T) = S_{p,q}(\lambda, T_{p,q}) - S_{p+x,q+y}(\lambda, T_{p+x,q+y}) =$$

$$= K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \cdot \tau(\lambda, T_{amb.}) \cdot \varepsilon(\lambda, T) \cdot \left[C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_{p,q}}} - 1 \right)^{-1} - \right. \\ \left. - C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_{p+x,q+y}}} - 1 \right)^{-1} \right] d\lambda; \quad (2.4)$$

- для різнорідної поверхні з різними значенням КВ для кожного значення температури $\varepsilon_{p,q}(\lambda, T_{p,q})$ та $\varepsilon_{p+x,q+y}(\lambda, T_{p+x,q+y})$ поверхні об'єкта дослідження:

$$S(\lambda, \Delta T) = S_{p,q}(\lambda, T) - S_{p+x,q+y}(\lambda, T) = K \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \cdot \tau(\lambda, T_{amb.}) \times$$

$$\times \left[\varepsilon_{p,q}(\lambda, T_{p,q}) \cdot C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_{p,q}}} - 1 \right)^{-1} + (1 - \varepsilon_{p,q}(\lambda, T_{p,q})) \times \right. \\ \times C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1 \right)^{-1} - \varepsilon_{p+x,q+y}(\lambda, T_{p+x,q+y}) \cdot C_1 \lambda^{-5} \times \\ \left. \times \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_{p+x,q+y}}} - 1 \right)^{-1} - (1 - \varepsilon_{p+x,q+y}(\lambda, T_{p+x,q+y})) \cdot C_1 \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1 \right)^{-1} \right] d\lambda. \quad (2.5)$$

Формування рівнянь ВТ та ГТ за ІЧВ дає змогу описати вплив різних факторів на значення вихідного сигналу ОПС тепловізора. На основі цих рівнянь вимірювань можна дослідити вплив окремих факторів на сумарну непевність ВТ та ГТ, розробити методику їх аналізування й методику оцінювання непевності ВТ та ГТ за ІЧВ.

2.3 Методика оцінювання непевності вимірювання температури та градієнта температури поверхні об'єкта за інфрачервоним випроміненням

Комбінована (сумарна) стандартна непевність ВТ та ГТ за ІЧВ визначається за наступною формулою [80]:

$$u_c(T) = \sqrt{u_A^2(T) + u_B^2(T)}, \quad (2.6)$$

де $u_A^2(T)$ – непевність типу А ВТ за ІЧВ;

$u_B^2(T)$ – непевність типу В ВТ за ІЧВ [76].

Таким чином, аналізування та оцінювання непевності вихідного сигналу ОПС тепловізора та значення вимірюваної температури й ГТ за ІЧВ включає в себе такі основні дві процедури [81].

Перша процедура – це оцінювання непевності за типом А $u_A^2(T)$ із використанням методів математичної статистики для опрацювання отриманих результатів вимірювань. Вихідними даними для обчислення непевності типу А є результати багаторазових ВТ та ГТ за ІЧВ, отриманих при проведенні вимірювань за однакових умов. Особливістю цієї процедури є можливість отриманням класичних в математичній статистиці оцінок параметрів сукупності вихідних даних, а саме: математичного сподівання, дисперсії, середнього квадратичного відхилення, кореляційного моменту тощо [82].

Друга процедура – це аналізування та оцінювання непевності за типом В $u_B^2(T)$, що проводиться іншими методами, відмінними від статистичного аналізу рядів спостережень [83]. Стандартну непевність за типом В визначають за апріорною інформацією про особливості ВТ та ГТ за ІЧВ з використанням конкретного тепловізора.

2.2.1 Оцінювання непевності типу А результатів вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням

Непевність типу А результатів ВТ та ГТ за ІЧВ можна оцінювати за вихідним сигналом ПВ $S(\lambda, T)$, а також за значенням РТ $T_{p,q}$, окремим точковим значенням температури T та значенням ГТ ΔT .

Найкращою доступною оцінкою результату проведеного вимірювання, для отримання якого проводиться n незалежних спостережень в однакових умовах, є середнє арифметичне значення цих n спостережень. Нижче наведено формули визначення середнього арифметичного значення:

- для вихідного сигналу $S(\lambda, T)$:

$$\overline{S(\lambda, T)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i(\lambda, T); \quad (2.7)$$

- для значення температури T :

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i; \quad (2.8)$$

- для ГТ ΔT :

$$\overline{\Delta T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_i. \quad (2.9)$$

При цьому дисперсію результатів спостережень, що оцінює розподіл ймовірностей також доцільно визначати:

- для вихідного сигналу $S(\lambda, T)$:

$$S_n^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (S_i(\lambda, T) - \overline{S(\lambda, T)})^2; \quad (2.10)$$

- для значення температури T :

$$T_n^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2; \quad (2.11)$$

- для ГТ ΔT :

$$\Delta T_n^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \overline{\Delta T})^2. \quad (2.12)$$

Звідси непевність типу А, як оцінка стандартного відхилення результатів ВТ та ГТ за ІЧВ, визначається наступним чином:

- для вихідного сигналу $S(\lambda, T)$:

$$u_A^2(S(\lambda, T)) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i(\lambda, T) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i(\lambda, T))^2}{n \cdot (n-1)}}; \quad (2.13)$$

- для значення температури T :

$$u_A^2(T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i)^2}{n \cdot (n-1)}}; \quad (2.14)$$

- для ГТ ΔT :

$$u_A^2(\Delta T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_i)^2}{n \cdot (n-1)}}. \quad (2.15)$$

Таким чином, формули (2.7)-(2.15) дозволяють оцінити непевність типу А вихідного сигналу ОПС та результатів ВТ й ГТ за ІЧВ, що може бути застосовано в методиках для оцінювання точності результатів калібрування та проведених ВТ й ГТ за ІЧВ [84].

2.2.2 Оцінювання складових непевності типу В вихідного сигналу приймача випромінення тепловізора при вимірюванні температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням

В якості даних для обчислення непевності за типом В тепловізійних вимірювань використовують таку апріорну інформацію:

- інформацію нормативних документів (ДСТУ та технічні умови на виріб, дані про методи і засоби вимірювань та випробувань, умови проведення випробувань, зовнішні впливні фактори і т.д.) [85-87];
- специфікації виробників тепловізійної техніки [88];
- дані попередніх вимірювань величин, що входять в рівняння вимірювання;
- відомості про вид розподілу ймовірностей;
- дані, засновані на досвіді дослідника або загальних знаннях про поведінку і властивості приладів та зразків [89-90];
- непевності констант і довідкових даних [92];
- дані повірки та калібрування тощо.

Для ТВ при оцінювання непевності типу В необхідно враховувати певні особливості.

Перша із них пов'язана із тим, що аналізування та оцінювання непевності типу В доцільно проводити для значення вихідного сигналу ОПС тепловізора. Зумовлено це тим, що ВТ та ГТ за ІЧВ відносяться до непрямих вимірювань. Значення енергії випромінення пропорційне значенню температури об'єкта та перетворюється тепловізором у вихідний електричний сигнал, пропорційний напрузі, струму або опору в залежності від принципу дії матриці ПВ. При цьому значення сигналу кожного приймача матриці ПВ має чітко визначену

фізико-математичну залежність із значенням температури поверхні об'єкта. Тому представлення фізичного виразу значення температури та подальші розрахунки щодо оцінювання величини непевності пов'язані із труднощами побудови відповідного математичного виразу. Окрім того, у разі роботи із значенням температури при оцінюванні непевності з'являється додатковий впливний фактор – значення вихідного сигналу, величина якого є похідною від значення температури. А оскільки перейти від значення сигналу до значення температури можна за допомогою коефіцієнта перетворення, то результати оцінювання непевності вихідного сигналу можна переносити на значення непевності вимірювання температури. Перейти від непевності вихідного сигналу до непевності температури можна шляхом знаходження модуля

$$\text{похідної функції перетворення } f: u_B(T) = \left| \frac{\partial f}{\partial S(\lambda, T)} \right| \cdot u_B(S(\lambda, T)).$$

Друга особливість стосується необхідності проведення класифікації складових непевності типу В, що представлені у формулі (2.16), а саме:

- інструментальної складової непевності ВТ та ГТ $u_{B(instr.)_j}(S(\lambda, T))$;
- непевності методу ВТ та ГТ за ІЧВ $u_{B(method.)_k}(S(\lambda, T))$.

Така класифікація вводиться на основі положень VIM, де введено поняття інструментальної складової непевності та непевності методу вимірювання, в залежності від першопричин їх виникнення.

Тому непевність типу В визначатиметься згідно формули:

$$u_B(S(\lambda, T)) = \sqrt{u_{B(instr.)_j}^2(S(\lambda, T)) + u_{B(method.)_k}^2(S(\lambda, T))}. \quad (2.16)$$

Розглянемо детально кожен зі складових непевності типу В.

2.2.3 Аналіз інструментальної складової непевності типу В вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням

Інструментальна складова непевності типу В визначається властивостями ЗВТ і виникає у результаті використання вимірювального приладу.

Інструментальну складову непевності типу В ВТ та ГТ за ІЧВ, як правило, оцінюють шляхом калібрування або тестування тепловізора в калібрувальній лабораторії за допомогою еталонного АЧТ або еталонного ТМВ. Ця складова обумовлена характеристиками конструктивних елементів тепловізора. Для її оцінки доцільно визначити функціонально-технічні параметри тепловізора, зміна яких впливає на точність результатів вимірювань. До основних із них відносимо:

- шуми матриці ПВ $u(U_{noise})$;
- зміни спектральної чутливості ОПС, нелінійність перетворення $u(R(\lambda))$;
- температурний вплив оточуючого середовища $u(T_{amb.})$;
- зміни температурної чутливості ПВ $u(\Delta T)$;
- зміни просторової чутливості $u(\Delta S)$.

Тому цю складову непевності типу В від впливу вищезазначених чинників описуємо наступним чином:

$$u_{B(instr.)}(S(\lambda, T)) = \sqrt{\sum_{j=1}^J u_{B(instr.)j}^2(S(\lambda, T))} \quad (2.17)$$

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

Розглянемо докладніше вплив цих чинників на непевність вимірювань.

Під час ВТ, особливо нижче за 500 °С, на точність ВТ значно впливають шуми матриці ПВ, зумовлені фізичними процесами, що відбуваються у ПВ, оскільки їх значення можуть бути співмірними із значенням корисного сигналу.

Наявність шумів ускладнює виявлення слабких сигналів низькотемпературних джерел випромінення, а також призводить до виникнення відхилень при вимірюваннях параметрів сигналу: амплітуди, частоти, фази, часу появи імпульсів випромінення [93].

Основними складовими шуму матриці ПВ тепловізора є такі види шумів [94]:

- струмовий флікер-шум S_{Nf} ;
- тепловий шум Найквіста S_{NT} ;
- генераційно-рекомбінаційний шум (дробовий шум) S_{Nd} .

Сигнал на виході матриці ПВ можна охарактеризувати середнім квадратичним значенням флуктуації сумарного сигналу:

$$S_N = \sqrt{S_{Nf}^2 + S_{NT}^2 + S_{Nd}^2} = \sqrt{\frac{A \cdot \bar{I}^2 R_d^2}{f} \cdot \Delta f + 4 \cdot k \cdot T_d \cdot R_d \cdot \Delta f_{ef} + 2 \cdot e \cdot \bar{I} \cdot R_d^2 \cdot \Delta f_{ef}}, \quad (2.18)$$

де A – стала, що залежить від матеріалу матриці ПВ ($A = 3 \cdot 10^{-12} \dots 3 \cdot 10^{-7}$);

\bar{I} – середнє значення струму ПВ;

f – середнє значення частоти в смузі частот;

R_d – опір ПВ;

T_d – температура матриці ПВ;

e – заряд електрона ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл).

Значення кожної складової сигналу шуму залежить від виду ПВ [93]:

- струмовий шум є присутнім в усіх видах ПВ. Вплив цього шуму на корисний сигнал є значним лише на низьких частотах менше 1 кГц;
- тепловий шум пропорційний до значення активного опору ПВ і істотно впливає насамперед на теплові детектори;

- генераційно-рекомбінаційний шум властивий фотоелектричним ПВ з р-п переходами, зокрема фотодіодам.

Для зменшення впливу шумів застосовують охолодження рідким азотом N_2 , але це значно ускладнює конструкцію тепловізора та збільшує його габаритні розміри.

На основі аналізу сучасних матричних ПВ можна виділили такі характеристики матриці ПВ різних видів [94].

Термоелектричні ПВ можна охарактеризувати так [95]:

- неселективність, чутливість слабо залежить від довжини хвилі у діапазоні випромінювання від 0,75 до 20 мкм;
- функціонування у робочому режимі при кімнатній температурі без охолодження;
- можливість вимірювання низьких температур від $-50^\circ C$ та високих температур до $1200^\circ C$.

Властивості фотоелектричних матриць ПВ можна охарактеризувати так:

- висока швидкодія;
- висока чутливість, але у відповідних спектральних інтервалах;
- висока виявна здатність, нелінійність спектральної чутливості [96].

У реальності функція перетворення ОПС тепловізора має нелінійний характер [97]. Сприйняття випромінювання ПВ відбувається селективно у різних спектральних інтервалах. ПВ має різну спектральну чутливість $R_{ПВi}(\lambda)$ до випромінювання з різними довжинами хвиль. Спектральна чутливість пов'язує спектральну густину енергії випромінювання на цій довжині хвилі та спектральний відгук матриці ПВ в залежності від зміни напруги, струму, опору на сприйняте випромінювання.

Крім того, на чутливість $R_{ПВi}(\lambda)$ впливає спектральне пропускання оптичної системи тепловізора $\varphi(\lambda)$, зокрема лінз та дзеркал. Спектральне оптичне пропускання оптичних фільтрів, які виділяють випромінювання у різних

спектральних діапазонах, характеризується функцією пропускання $o(\lambda)$. Тому спектральну чутливість можна описати таким чином [25]:

$$R(\lambda) = R_{ПВ}(\lambda) \cdot o(\lambda) \cdot \varphi(\lambda). \quad (2.19)$$

В робочих умовах експлуатації результати вимірювання можуть визначатися також температурним впливом $u(T_{amb.})$ на тепловізор температури оточуючого середовища. Цей вплив є суттєвим в умовах високотемпературних виробництв та на відкритому повітрі при впливі на тепловізор сонячного випромінення.

Температурна чутливість дорівнює найменшому значенню різниці температур, що можуть бути розрізнені внаслідок обмеженої роздільної здатності цифрового каналу конкретного тепловізора. Зміна температурної чутливості тепловізора спричинює відповідну складову непевності ВТ та ГТ.

На зміну спектральної чутливості впливає спектральна і температурна залежність потужності випромінення від об'єкта, оптичних елементів системи та ПВ.

Згідно досліджень, проведених в [98] можна припустити, що вищерозглянуті параметри характеризуються рівноймовірним законом розподілу, тому непевність для кожного з них визначатиметься за формулою:

$$u_{B(instr.)_j}(S(\lambda, T)) = \frac{u_j}{\sqrt{12}}, \quad (2.20)$$

де $u_{B(instr.)_j}(S(\lambda, T))$ – інструментальна складова непевності типу В за окремим параметром;

u_j – значення непевності від впливу окремої характеристики тепловізора.

В літературі, в загальному, ця складова непевності оцінюється згідно виразу [89]:

$$u_{B(instr.)}(S(\lambda, T)) = \frac{\Delta_{instr.}}{\sqrt{3}}, \quad (2.21)$$

де $\Delta_{instr.}$ – основна похибка ВТ та ГТ тепловізором, вказана в технічній документації до ЗВТ.

Нині розвиток мікропроцесорної техніки, розробка сучасних детекторів і накопичений світовий досвід у цій сфері відкривають нові можливості для розвитку ТВ і підвищення точності ВТ та ГТ за ІЧВ.

Інструментальна похибка вимірювання тепловізорів нині сягає менше 2%, а значення температурної чутливості – менше 0,005 °C [99].

Значення інструментальної складової непевності ВТ та ГТ за ІЧВ тепловізорів різних моделей за даними фірм-виробників вказана в таблиці Е.1 додатків. Значення характеристики точності ВТ та ГТ за ІЧВ подано за даними фірм-виробників. Під характеристикою точності виробники вказують значення абсолютної похибки визначення температури та абсолютне значення температурної чутливості.

Отже, аналіз інструментальної складової непевності типу В ВТ та ГТ за ІЧВ показав, що значення цієї складової непевності не перевищує 1,5%, а значить є задовільним для більшості вимог тепловізійних вимірювань об'єктів промисловості та медицини.

2.2.4 Аналіз складової непевності типу В методу вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням

Непевність типу В від методу вимірювання є найскладнішою складовою оцінювання непевності [100].

Виникнення цієї складової непевності зумовлено насамперед неврахуванням впливу факторів, що передбачені математичним виразом рівняння вимірювання (формула (2.4)).

Часто єдиною доступною інформацією під час оцінювання стандартної непевності є існуючі знання про фізичний світ, умови проведення вимірювання та фактори впливу, тобто реальні результати дослідження відсутні. Саме у цьому випадку доцільно використовувати непевність типу В від методу вимірювання.

Непевність методу ВТ та ГТ за ІЧВ зумовлена факторами, що впливають із рівняння Планка (формула (2.1)):

- невідомим значенням КВ поверхні досліджуваного об'єкта;
- впливом пропускання проміжного середовища;
- впливом відбитого ФВ.

Розглянемо ці фактори докладніше.

КВ $\varepsilon(\lambda, T)$ є мірою кількості енергії випромінення, яке випромінюється даною поверхнею, порівняно з енергією випромінення, що випромінюється АЧТ при тій самій температурі. Відповідно значення КВ для поверхні кожного конкретного об'єкта є індивідуальним, залежним від ряду факторів (довжини хвилі, температури випромінення, кута випромінення, стану, форми та матеріалу поверхні) та знаходиться в межах $0 < \varepsilon(\lambda, T) < 1$. Ускладнює це питання також і взаємна функціональна залежність температури та КВ об'єкта – оцінка значення одного параметра вимагає інформації про значення іншого. Отже, точне визначення дійсної температури об'єкта неможливе без достовірної інформації про значення КВ його поверхні. Відсутність цієї інформації спричинює складову непевності $u(\varepsilon(\lambda, T))$.

Навколоземний шар атмосфери на території промислових підприємств характеризується наявністю в повітрі хімічних сполук, дрібних частинок цементного пилу, можливою присутністю атмосферних опадів у вигляді туману, дощу або снігу. Аналогічна проблема може виникати і при медичних

експрес-дослідженнях, наприклад, під час епідемій. Ці фактори впливають на проходження випромінювання крізь проміжне середовище [101]:

- випромінювання поглинається присутніми в проміжному середовищі газами;
- проміжне середовище послаблює випромінювання від об'єкта дослідження внаслідок розсіювання на частинках, молекулах та аерозолях, присутніх в ньому;
- проміжне середовище додає власне випромінювання.

Отже, при ВТ та ГТ за ІЧВ тепловізором вплив проміжного середовища між об'єктом та тепловізором на ефективний потік випромінювання об'єкта дослідження є також однією з причин виникнення цієї складової непевності $u(\tau(\lambda, T_{amb.}))$.

У реальних непрозорих об'єктів КВ менший від одиниці і коефіцієнт відбивання ρ визначається за законом Кірхгофа як $\rho = 1 - \varepsilon$ [54]. Внаслідок цього, при ВТ та ГТ за ІЧВ виникає складова непевності, зумовлена наявністю відбитого від поверхні досліджуваного об'єкта ФВ сторонніх об'єктів, яке складається з відбитого від досліджуваної ділянки об'єкта випромінювання інших частин самого об'єкта, випромінювання сторонніх об'єктів та оточуючого середовища. Особливо необхідно відмітити вплив відбитого випромінювання Сонця, яке вважається абсолютно чорним випромінювачем з температурою близько 6000 К та максимумом випромінювання на довжині хвилі 0,48 мкм. ФВ діє лише на поверхневий шар об'єкта товщиною в декілька мікрон, не спотворюючи внутрішньої температури. Тому потік теплового випромінювання самого об'єкта та ефективний потік випромінювання (і, як наслідок, КВ та ефективний КВ поверхні) різняться між собою. При безконтактному ВТ за ІЧВ це викликає складову непевності $u(T_f)$, зумовлену впливом відбитого ФВ.

Відповідно складова непевності типу В, спричинена особливостями методу ВТ та ГТ за ІЧВ, описується таким чином:

$$u_{B(\text{method.})}(S(\lambda, T)) = \sqrt{\sum_{l=1}^L u_{B(\text{method.})_l}(S(\lambda, T))} = \sqrt{C'_{\varepsilon(\lambda, T)}{}^2 u^2(\varepsilon(\lambda, T)) + C'_{\tau(\lambda, T_{amb.})}{}^2 u^2(\tau(\lambda, T_{amb.})) + C'_{T_f}{}^2 u^2(T_f)} \quad (2.22)$$

де $C'_{\varepsilon(\lambda, T)}$ – коефіцієнт чутливості від впливу випромінювальної здатності поверхні досліджуваного об'єкта;

$C'_{\tau(\lambda, T_{amb.})}$ – коефіцієнт чутливості від впливу пропускання проміжного середовища;

C'_{T_f} – коефіцієнт чутливості від впливу ФВ.

Відповідні коефіцієнти чутливості, які визначаються як частинні похідні від сигналу для окремого впливного фактора зі збереженням знака інтеграла згідно [102], представлені наступними формулами:

$$C'_{\varepsilon(\lambda, T)} = \frac{\partial(S(\lambda, T))}{\partial \varepsilon(\lambda, T)} \longrightarrow \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_1 \tau(\lambda, T_{amb.}) \left(\frac{1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} - \frac{1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1 \right)} \right) d\lambda; \quad (2.23)$$

$$C'_{\tau(\lambda, T_{amb.})} = \frac{\partial(S(\lambda, T))}{\partial \tau(\lambda, T_{amb.})} \longrightarrow \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} -C_1 \left(\frac{\varepsilon(\lambda, T) - 1}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1 \right)} - \frac{\varepsilon(\lambda, T)}{\lambda^5 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \right) d\lambda; \quad (2.24)$$

$$C'_{T_f} = \frac{\partial(S(\lambda, T))}{\partial T_f} \longrightarrow C'_{T_f} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} -C_1 C_2 \tau(\lambda, T_{amb.}) \frac{e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} \cdot (\varepsilon(\lambda, T) - 1)}{\lambda^6 T_f^2 \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1 \right)^2} d\lambda. \quad (2.25)$$

Саме вони описують залежність вихідного значення сигналу від вхідних значень оцінок впливних факторів.

За умови рівномірного закону розподілу відхилень дійсної функції від номінальної відносні непевності оцінюються за виразами [103]:

$$u(\varepsilon(\lambda, T)) = \frac{\Delta\varepsilon(\lambda, T)}{\sqrt{3}}; \quad (2.26)$$

$$u(\tau(\lambda, T_{amb.})) = \frac{\Delta\tau(\lambda, T_{amb.})}{\sqrt{3}}; \quad (2.27)$$

$$u(T_f) = \frac{\Delta T_f}{\sqrt{3}}, \quad (2.28)$$

де $\Delta\varepsilon(\lambda, T)$, $\Delta\tau(\lambda, T_{amb.})$, ΔT_f – границі, в яких знаходяться значення показників впливних факторів (або максимальні значення відповідних абсолютних відхилень).

Оскільки проведений в Розділі 1 аналіз показав, що впливні фактори мають значний вплив на точність ВТ за ІЧВ, то доцільним є моделювання непевності згідно запропонованої методики.

2.2.5 Формування бюджету непевності вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням тепловізором

На основі проведеного аналізу нами сформований бюджет непевності ВТ та ГТ за ІЧВ поверхні об'єкта (таблиця Ж.1 додатків) [84].

Загальним результатом при оцінці непевності є визначення розширеної непевності (границь інтервалу непевності):

$$U_p(S(\lambda, T)) = k_p \cdot u_c(S(\lambda, T)), \quad (2.29)$$

де k_p – коефіцієнт розширення.

При цьому в середині інтервалу непевності знаходиться результат вимірювання досліджуваної величини, а отримане значення розширеної непевності вимірювань характеризує значення розсіювання істинного значення визначеної величини щодо результату вимірювання цієї величини, отриманого на основі оцінки даних про вхідні величини рівняння вимірювання. Згідно ЕА-4/02 М:2013 [104] розширена непевність – величина, що визначає інтервал навколо результату вимірювань, в межах якого з відповідною ймовірністю знаходиться частина значень, які з достатньою підставою могли б бути приписані вимірюваній величині. При цьому коефіцієнт охоплення k_p при оцінюванні розширеної непевності вибирають у відповідності з рекомендаціями, зазначеними в [104].

У випадках, коли вимірюваній величині може бути приписаний нормальний розподіл ймовірностей, коефіцієнт охоплення k_p визначається як квантиль нормованого нормального розподілу при рівні довіри P .

При цьому коефіцієнт охоплення визначається при заданій ймовірності або за формулою $k_p = t_{P=0,95}(v_{eff})$, використовуючи таблиці розподілу Стьюдента. При нормальному законі: $k_p = 2$, при $P = 0,95$; $k_p = 3$, при $P = 0,99$.

Таким чином, розроблена методика дає можливість проводити оцінку непевності результатів тепловізійних вимірювань пересічним користувачам тепловізорів на основі інформації, отриманої від виробників й лабораторій, та нескладних розрахунків за запропонованими формулами. Це у свою чергу сприятиме розширенню сфер ефективного використання тепловізорів, де важливим є кількісний аналіз точності вимірної температури та ГТ, а не лише якісна оцінка порядку РТ по поверхні.

2.4 Моделювання складових непевності вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням

Для дослідження характеру та значень непевності методу ВТ та ГТ за ІЧВ в залежності від впливних факторів нами було проведено її моделювання для відносних значень непевності.

Оскільки основним рівнянням фізичного процесу випромінення теплової енергії при проведенні тепловізійного дослідження є формула Планка (формула (2.1)), то моделювання проводимо, виходячи з припущення про одиничні значення площі досліджуваної поверхні, спектральної чутливості окремих ПВ ОПС тепловізора $R(\lambda)$ та коефіцієнта перетворення K у формулі (2.3) для вихідного сигналу.

Таким чином, значення вихідного сигналу у робочих умовах експлуатації визначаються лише під впливом зміни КВ $\varepsilon(\lambda, T)$, КППС $\tau(\lambda, T_{amb.})$ та ФВ, що характеризується температурою фону T_f , тому формула видозміниться до такого вигляду:

$$S(\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda, T_{amb.}) \left[\begin{array}{l} \varepsilon(\lambda, T) \cdot C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} + \\ + (1 - \varepsilon(\lambda, T)) \cdot C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1)^{-1} \end{array} \right] d\lambda. \quad (2.30)$$

Значення впливних факторів, що використовувалися у процесі моделювання для об'єктів промисловості, наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Значення впливних факторів, що використовувалися при моделюванні непевності ВТ та ГТ за ІЧВ для об'єкта промисловості

№	Назва впливного фактора	Значення впливного фактора
1	КВ поверхні досліджуваного об'єкта	0,75
		0,85
		0,95
2	КППС	0,95
		0,97
		0,99
3	Значення температури фону	0 °С
		25 °С
		100 °С
		250 °С

Дослідження непевності методу ВТ та ГТ за ІЧВ проводилося в температурному діапазоні $-20 \div 470$ °С та для таких значень максимальних відхилень відповідних впливних факторів: $\Delta\varepsilon(\lambda, T) = 0,03$, $\Delta\tau(\lambda, T_{amb.}) = 0,05$, $\Delta T_f = 3$ °С.

Як наслідок, отримуємо 33 можливі комбінації впливних факторів при відповідних значеннях температури досліджуваного об'єкта.

Результати розрахунку для значень впливних факторів при окремих значеннях температури представлено в таблиці 3.1 додатків.

Представимо графіки залежності окремих значень вихідного сигналу при дії різних значень впливних факторів та за умови відсутності їх впливу (Рисунок 2.1).

При цьому бачимо, що значення сигналу під дією впливних факторів відхиляється від ідеального значення, відповідно і значення температури під дією впливних факторів теж буде різнитися від істинного значення.

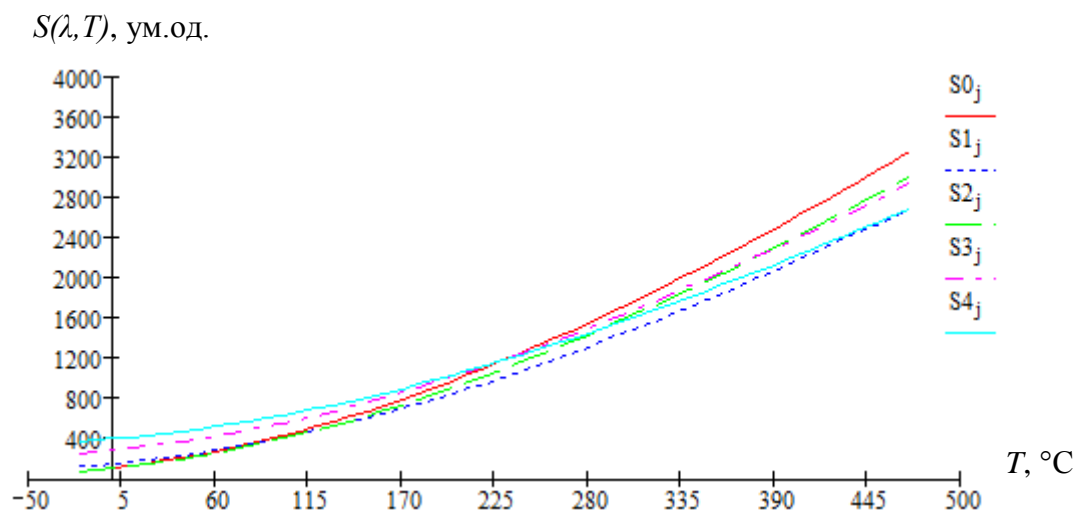


Рисунок 2.1 – Графіки функціональної залежності вихідного сигналу від значень температури досліджуваного об'єкта за умов:

$S0_j$ – відсутність дії впливних факторів;

$S1_j$ – $\varepsilon = 0,85$, $\tau = 0,95$, $T_f = 100^\circ\text{C}$;

$S2_j$ – $\varepsilon = 0,95$, $\tau = 0,97$, $T_f = 0^\circ\text{C}$;

$S3_j$ – $\varepsilon = 0,85$, $\tau = 0,99$, $T_f = 250^\circ\text{C}$;

$S4_j$ – $\varepsilon = 0,75$, $\tau = 0,97$, $T_f = 250^\circ\text{C}$.

Для прикладу проаналізуємо графіки лише для граничних значень кожного впливного фактора.

На рисунках 2.2 та 2.3 представлено криві залежності значення відносної непевності для вибраних значень КВ досліджуваної поверхні.

З рисунку 2.2 випливає, що при зменшенні КВ відбувається зростання значення відносної похибки, при чому при вищих температурах відхилення зростає.

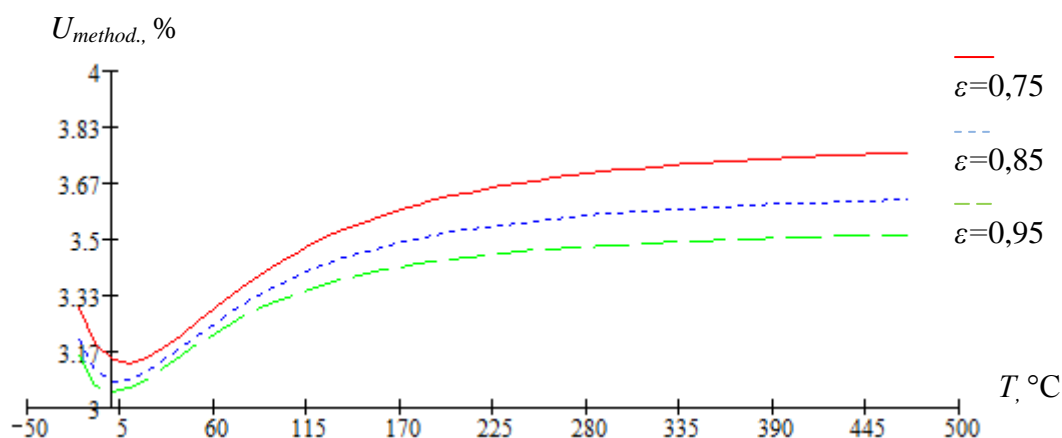


Рисунок 2.2 – Графік залежності відносної непевності від КВ для діапазону температури $-20 \div 470 \text{ } ^\circ\text{C}$ при $T_f = 0^\circ\text{C}$ та $\tau = 0,95$

Водночас із рисунку 2.3 стає зрозумілим, що при наближенні значення температури поверхні об'єкта дослідження (більше $170 \text{ } ^\circ\text{C}$) та температури фону, вплив КВ поверхні на величину непевності нівелюється.

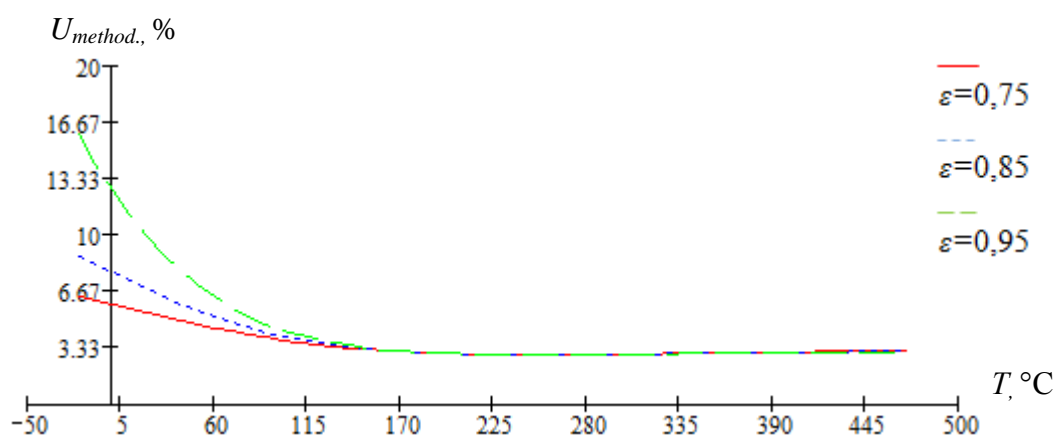


Рисунок 2.3 – Графік залежності відносної непевності від КВ для діапазону температури $-20 \div 470 \text{ } ^\circ\text{C}$ при $T_f = 250^\circ\text{C}$ та $\tau = 0,99$

На рисунках 2.4 та 2.5 представлено криві залежності значення відносної непевності для вибраних значень температури фону.

З рисунку 2.4 випливає, що низькі значення температури фону за умов низьких значень КВ та КППС призводять до зростання непевності дослідження

при значеннях температури поверхні, що перевищує значення температури фону.

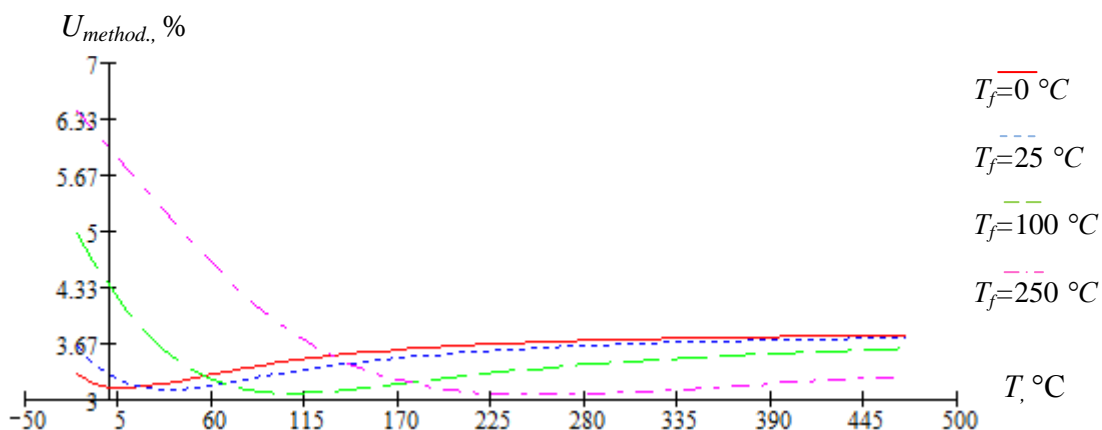


Рисунок 2.4 – Графік залежності відносної непевності від температури фону для діапазону температури $-20\div 470$ °C при $\varepsilon = 0,75$ та $\tau = 0,95$

На рисунку 2.5 бачимо типову залежність, згідно якої зі збільшенням температури фону збільшується і значення відносної непевності, але лише до моменту досягнення рівності зі значенням температури досліджуваного об'єкта, як і на рисунку 2.3.

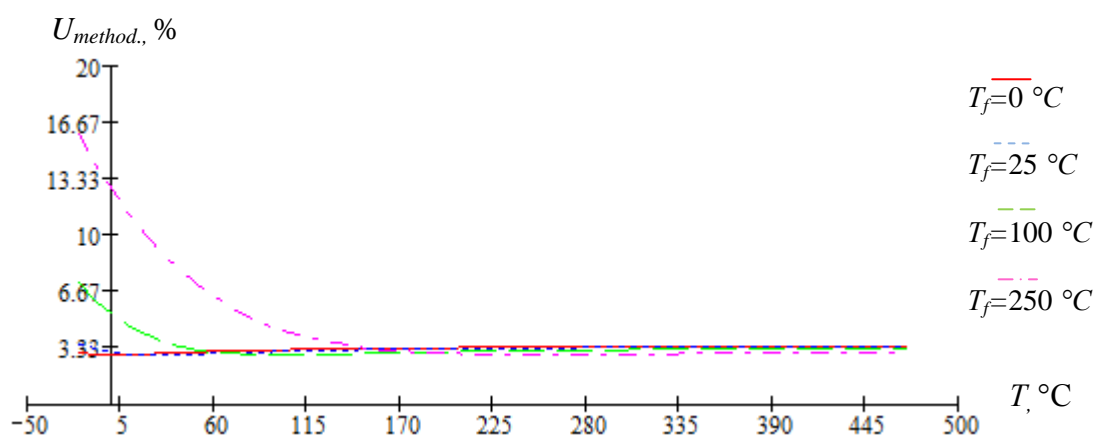


Рисунок 2.5 – Графік залежності відносної непевності від температури фону для діапазону температури $-20\div 470$ °C при $\varepsilon = 0,95$ та $\tau = 0,99$

Особлива ситуація характерна для кривих залежності відносної непевності від значення КППС (Рисунки 2.6 та 2.7).

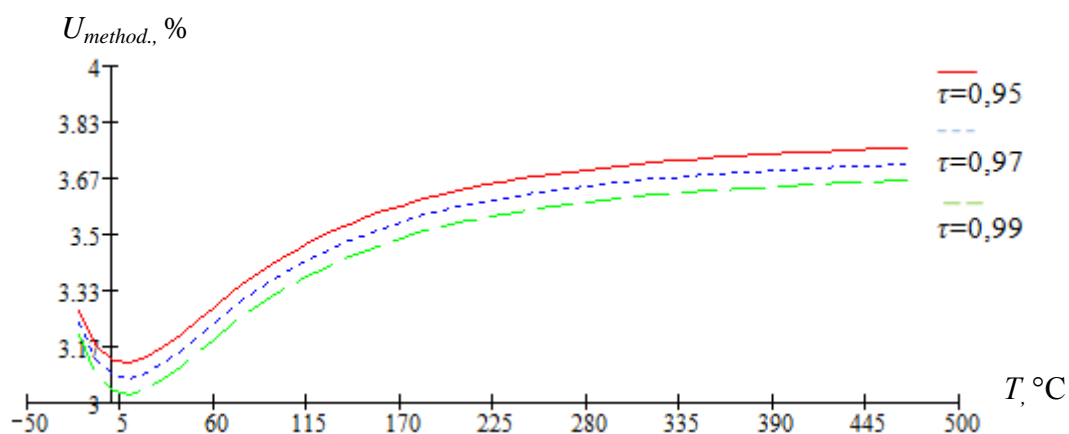


Рисунок 2.6 – Графік залежності відносної непевності від КППС для діапазону температури $-20 \div 470$ °C при $\varepsilon = 0,75$ та $T_f = 0$ °C

З рисунку 2.6 видно, що зі зростанням значення КППС відбувається зменшення відносної непевності ВТ.

Згідно рисунку 2.7 при високих значеннях температури фону та КВ значення КППС не впливає на значення відносної непевності.

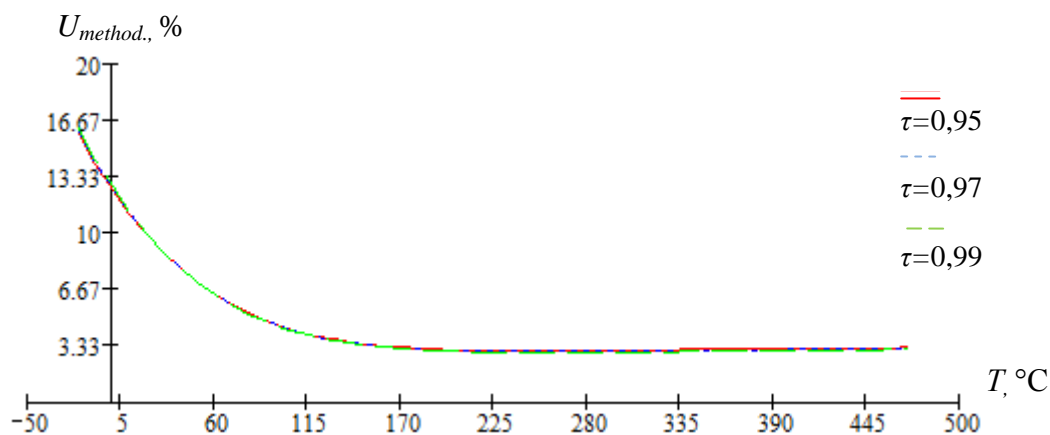


Рисунок 2.7 – Графік залежності відносної непевності від КППС для діапазону температури $-20 \div 470$ °C при $\varepsilon = 0,95$ та $T_f = 250$ °C

Значення впливних факторів, що використовувалися у процесі моделювання для об'єктів медицини, представлено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення впливних факторів, що використовувалися при моделюванні непевності ВТ та ГТ за ІЧВ для об'єкта медицини

№	Назва впливного фактора	Значення впливного фактора
1	КВ поверхні досліджуваного об'єкта	0,96 0,97 0,98
2	КППС	0,97 0,98 0,99
3	Значення температури фону	-10 °С 22 °С 32 °С

Дослідження непевності методу ВТ та ГТ за ІЧВ проводилося в температурному діапазоні 24,4÷34,4 °С (температура поверхні шкіри людини коливається для різних ділянок тіла в таких межах [105]) та для таких значень максимальних відхилень відповідних впливних факторів: $\Delta\varepsilon(\lambda, T) = 0,01$, $\Delta\tau(\lambda, T_{amb.}) = 0,01$, $\Delta T_f = 1$ °С, зважаючи на презиційність вимірювань у медицині та необхідність реєстрації відхилення у соті і навіть тисячні частки градуса.

Для об'єкта медицини також для прикладу проаналізуємо графіки граничних значень кожного впливного фактора із 27 можливих комбінацій.

На рисунках 2.8 та 2.9 представлено криві залежності значення відносної непевності для вибраних значень КВ досліджуваної поверхні.

З рисунку 2.8, як і для об'єкта промисловості, впливає, що при зменшенні КВ відбувається зростання значення відносної непевності, при чому при вищих температурах відхилення зростає.

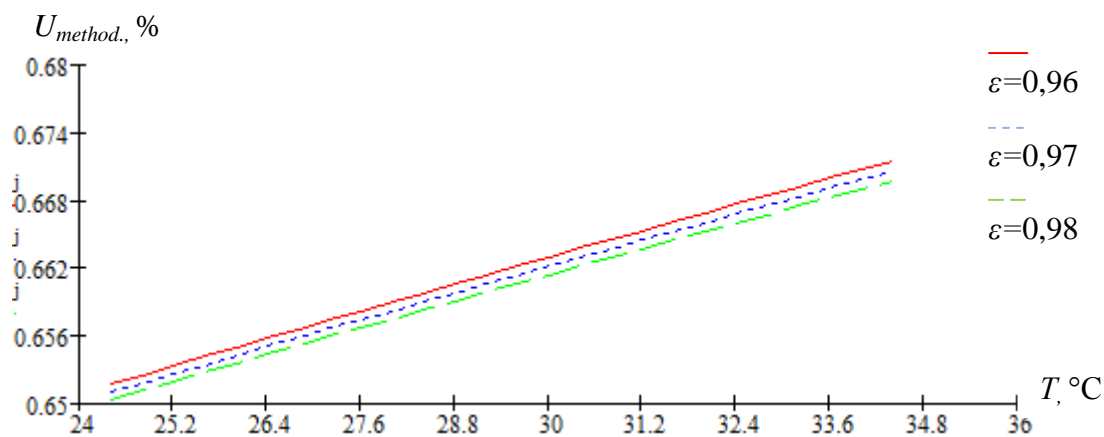


Рисунок 2.8 – Графік залежності відносної непевності від КВ для діапазону температури $24,4 \div 34,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ при $T_f = -10 \text{ } ^\circ\text{C}$ та $\tau = 0,97$

Теж саме впливає і з рисунку 2.9. Також з рисунку 2.9 видно, що при наближенні значення температури поверхні об'єкта дослідження до температури фону, значення відносної непевності зменшується.

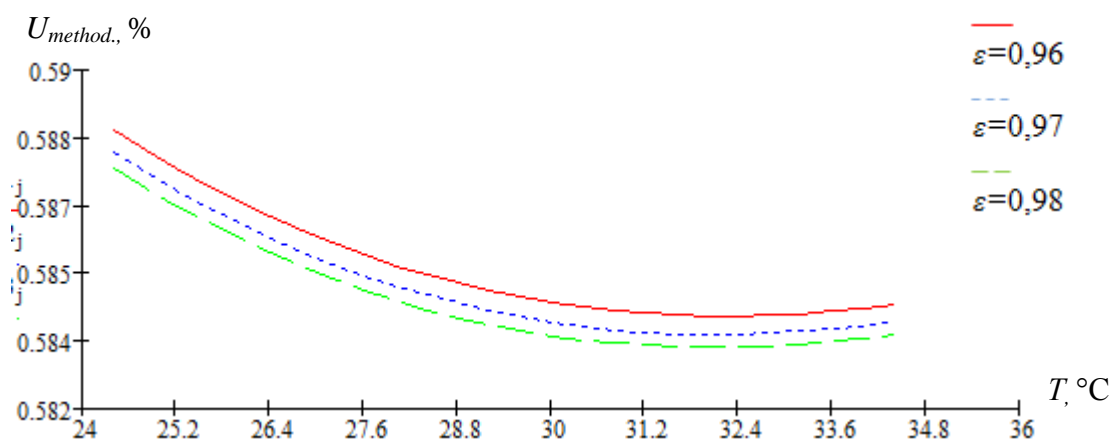


Рисунок 2.9 – Графік залежності відносної непевності від КВ для діапазону температури $24,4 \div 34,4 \text{ } ^\circ\text{C}$ при $T_f = 32 \text{ } ^\circ\text{C}$ та $\tau = 0,99$

На рисунках 2.10 та 2.11 представлено криві залежності значення відносної непевності від зміни температури фону.

З рисунків 2.10 та 2.11 випливає, що низькі значення температури фону в межах визначеного діапазону значень КВ та КППС призводять до істотного зростання непевності дослідження.

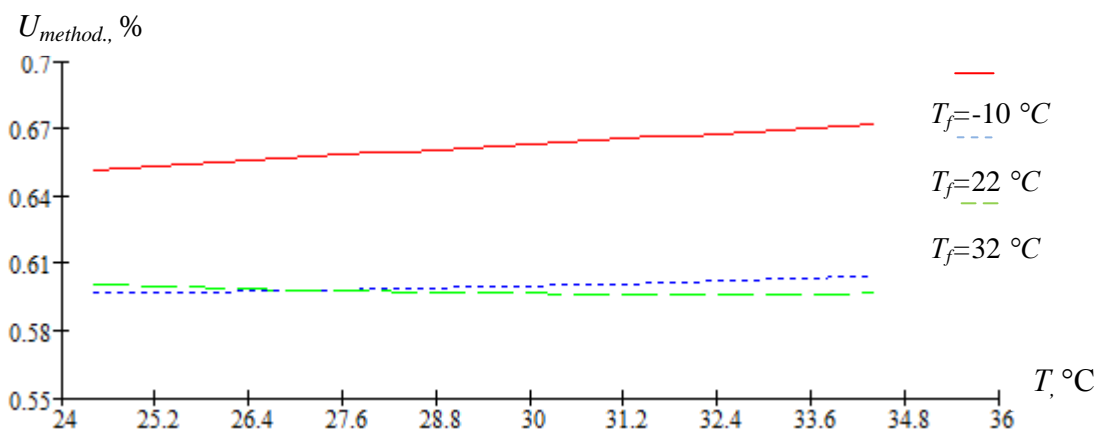


Рисунок 2.10 – Графік залежності відносної непевності від температури фону для діапазону температури $24,4 \div 34,4$ °C при $\varepsilon = 0,96$ та $\tau = 0,97$

На рисунках 2.12 та 2.13 представлено криві залежності значення відносної непевності від зміни значення КППС.

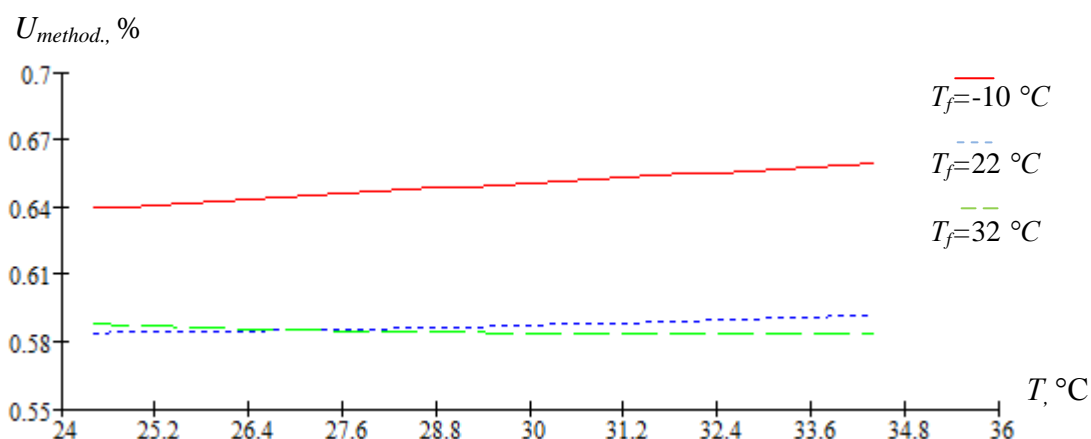


Рисунок 2.11 – Графік залежності відносної непевності від температури фону для діапазону температури $24,4 \div 34,4$ °C при $\varepsilon = 0,95$ та $\tau = 0,99$

З рисунку 2.12 видно, що зі зростанням значення КППС відбувається зменшення відносної непевності ВТ.

Теж саме впливає і з рисунку 2.13. Також рисунок 2.13 ще раз підтверджує, що при наближенні значення температури поверхні об'єкта дослідження до температури фону, значення відносної непевності зменшується.

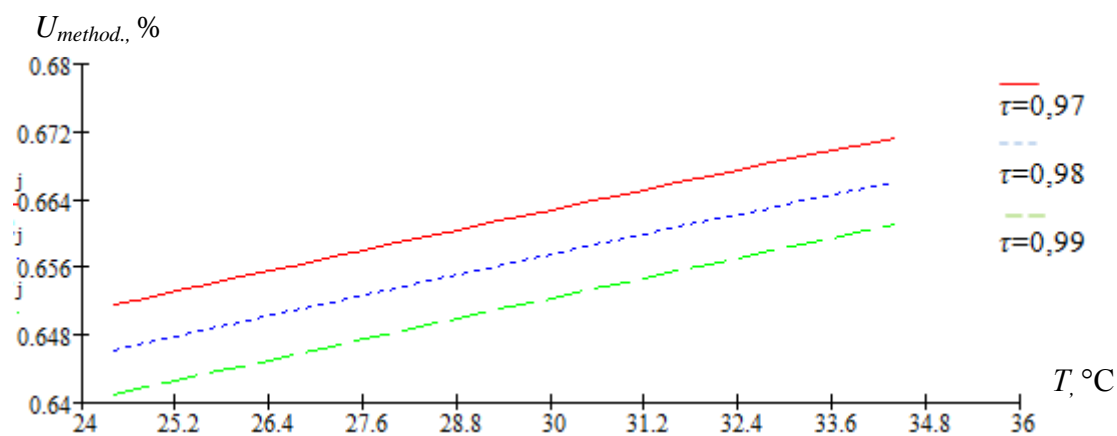


Рисунок 2.12 – Графік залежності відносної непевності від КППС для діапазону температури $24,4 \div 34,4$ $^\circ\text{C}$ при $\varepsilon = 0,96$ та $T_f = -10$ $^\circ\text{C}$

На основі результатів аналізу інформації, представленої на графіках та таблиці 3.1, приходимо до висновку, що значення непевності при вимірюванні відповідного значення температури змінюється у результаті коливання значень впливних факторів за певними принципами, визначення яких забезпечує можливість отримання інформації про можливі відхилення значень РТ при тепловізійних дослідженнях у реальних умовах.

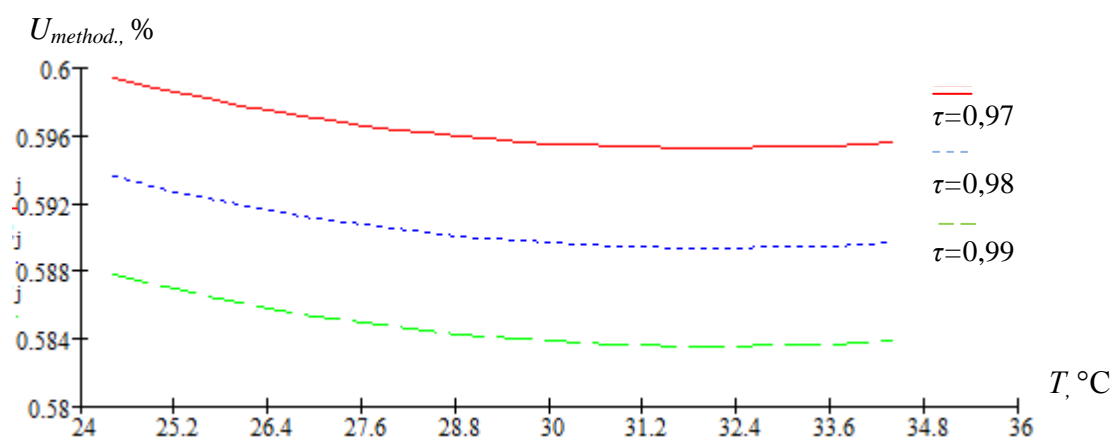


Рисунок 2.13 – Графік залежності відносної непевності від КППС для діапазону температури $24,4 \div 34,4$ $^\circ\text{C}$ при $\varepsilon = 0,98$ та $T_f = 32$ $^\circ\text{C}$

Побудова графіків та таблиць залежності значення відносної непевності у результаті моделювання дозволить 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.

Таким чином, точність ВТ та ГТ за ІЧВ істотно знижується за рахунок непевності методу ВТ та ГТ за ІЧВ, адже змінюється від дослідження до дослідження у результаті зміни впливних факторів у реальних умовах.

Висновки до розділу 2

У 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 згідно положень Міжнародного словника основних та загальних термінів з метрології VIM та внаслідок домінуючого характеру окремих факторів на точність вимірювання температури та градієнта температури, нами запропоновано поділ непевності типу В на дві складові, а саме інструментальну складову та складову непевності методу проведення тепловізійних досліджень.

Запропонована методика дає змогу на основі аналізування та оцінювання непевності для вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням розробити заходи по їх зменшенню, а також забезпечує формування основ методу вимірювання температури та градієнта 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.

Перевагами реалізації концепції «непевності» для тепловізійних досліджень можна вважати наступне:

- довіра до результатів тепловізійних вимірювань;
- забезпечення їх порівнюваності;
- за результатами вимірювань можна сформувати інформацію про якість вимірювань;
- інформація про кількісний результат впливу кожного з розглянутих факторів підвищує надійність випробувальних та вимірювальних процедур;
- оцінювання непевності тепловізійних досліджень дозволяє гармонізувати процедури, калібрування та вимірювань із міжнародними вимогами;
- вартість проведення робіт по вимірюванню температури тепловізором може бути зменшена, якщо при оцінці непевності буде обґрунтовано, що вплив тих або інших факторів, які визначають сумарне значення непевності, є незначним і, відповідно, не потрібно додаткових витрат на їх контролювання.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ГРАДІЄНТА ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ІНФРАЧЕРВОНИМ ВИПРОМІНЕННЯМ В РОБОЧИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЕПЛОВІЗОРА

Розроблено двоспектральний метод вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням та методику додаткового калібрування тепловізора в робочих умовах експлуатації (“in-situ”), що дозволило врахувати дію впливних факторів на результати вимірювання температури та градієнта температури. Проведено аналіз можливості використання смужових фільтрів для забезпечення реалізації вимірювань у двох спектральних смугах за принципом «смуга в смугі». Для реалізації методу вимірювання та методики додаткового калібрування запропоновано використання еталонного площинного сірого випромінювача. Сформульовано вимоги до площинного сірого випромінювача та запропоновано можливі варіанти його конструкції. Проведено моделювання розроблених методу та методики.

3.1 Розроблення методу вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням в робочих умовах експлуатації тепловізора для поверхні об’єктів промисловості та медицини

Як зазначено у розділі 1 та підтверджено моделюванням у розділі 2 в результаті дії впливних факторів на вихідний сигнал температури та ГТ тепловізора, а також внаслідок різниці між нормальними умовами, в яких калібрується тепловізор, та реальними робочими умовами проведення тепловізійного дослідження у промисловості та медицині, виникає значна непевність результатів тепловізійних досліджень [106], а значить і результатів аналізування термограм, що може привести до хибних висновків та прийняття

помилкових рішень. Для вирішення цієї проблеми запропоновано метод ВТ та ГТ за ІЧВ та методику додаткового калібруванням тепловізора в робочих умовах експлуатації.

Результатом реалізації методу має стати визначення значень впливних факторів та подальше використання цієї інформації при опрацюванні вихідних сигналів матриці ПВ тепловізора, що виключатиме потребу у додатковому калібруванні тепловізора на місцях. При розробці даного методу враховувалися особливості визначення вихідного сигналу окремого приймача матриці ПВ тепловізора для робочих умовах згідно формул (2.3)-(2.5).

При реалізації методу оперуємо трьома основними впливними величинами: КВ, КППС, ФВ. При цьому значення жодної із цих величин не є наперед відомим. Водночас зрозуміло, що на значення КВ, КППС та значення ФВ при проведенні конкретного вимірювання за заданих умов вплинути неможливо. Можна лише припустити, що для проміжку часу проведення вимірювань їх значення є сталими.

Також відомо, що у тепловізорі наперед визначена функція перетворення значення вихідного сигналу кожного ПВ у значення дійсної температури поверхні об'єкта дослідження в нормальних умовах, тобто конкретному значенню вихідного сигналу ПВ відповідає конкретне значення температури. При цьому всі приймачі матриці ПВ мають однаковий вид функції перетворення $f(S_{p,q}(T)) = f(S_{p+x,q+y}(T))$. Вид залежності обирається виробником. Зважаючи на те, що для функціонування тепловізора має бути забезпечена лінійна залежність між вхідним сигналом потоку випромінювання та вихідним сигналом окремого приймача матриці ПВ, то доцільним є використання формул Сакума-Хатторі, які дозволяють забезпечити лінійну залежність перетворення сигналу в ОПС тепловізора, що показано при моделюванні у підрозділі 3.5.

Зважаючи на це, нами запропоновано метод визначення температури, ГТ та значень впливних факторів в двох спектральних смугах. Для визначення значень впливних факторів в реальних умовах нами пропонується

використання еталонного засобу, а саме площинного сірого випромінювача (ПСВ), із наперед заданим значенням КВ, який має сталу спектральну та температурну залежність. Це забезпечуватиме можливість за значенням відбитого випромінення визначати значення впливних факторів. Алгоритм визначення впливних факторів, температури та градієнта температури поданий на рисунку 3.1 та складається з двох етапів.



Рисунок 3.1 – Послідовність виконання операцій методу ВТ та ГТ за ІЧВ

Перший етап передбачає визначення значення температури фону T_f та КППС τ_w . Визначення проводиться за результатами опрацювання вихідних сигналів приймачів матриці ПВ в двох спектральних смугах. Джерелом сигналів випромінення є еталонний ПСВ з відомим значенням температури T_{gb} та КВ ε_{gb} . Оскільки ми використовуємо еталонний ПСВ, то він має мати визначені шляхом калібрування значення КВ й температури випромінення поверхні. Відповідно у рівнянні вихідного сигналу вони приймаються за константи, що дає змогу винести їх за межі інтеграла в рівнянні, яке описує фізичний процес. Значення температури оточуючих об'єктів і КППС є невідомими, проте також приймаються як сталі величини у робочому температурному та спектральному діапазонах.

Таким чином, вихідний сигнал окремого приймача матриці ПВ тепловізора $S_{gb}(\lambda)$ при проведенні ВТ та ГТ поверхні еталонного ПСВ матиме вигляд:

$$S_{gb}(\lambda) = \tau_w (\varepsilon_{gb} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_{gb}}} - 1)^{-1} d\lambda + (1 - \varepsilon_{gb}) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1)^{-1} d\lambda). \quad (3.1)$$

У даному рівнянні невідомими залишаються дві величини: температура фону, що визначає значення потоку ФВ, та КППС. Тому доцільно сформулювати систему двох рівнянь для визначення цих величин.

Для цього доцільно проводити вимірювання потоку випромінення у двох спектральних смугах. При цьому для зменшення впливу спектральних залежностей впливних факторів вважаємо за доцільне обрати таке взаємне розташування спектральних смуг, за якого одна робоча спектральна смуга $\lambda_{12} \div \lambda_{22}$ буде знаходитися в межах другої $\lambda_{11} \div \lambda_{21}$, за принципом «смуга в смузі». Особливості реалізації такої можливості розглянуто у наступному підрозділі 3.2 цього розділу.

Використання принципу «смуга в смузі» дає можливість сформулювати систему двох рівнянь вихідних сигналів ПВ. Ще раз зазначимо, що умови навколишнього середовища вважаються незмінними протягом проміжку часу, необхідного для проведення вимірювання сигналів потоку випромінення для різних спектральних смуг.

Для реалізації вимірювань по визначенню значення КППС та температури фону передбачено виконання наступних дій:

1. Забезпечуємо нагрівання еталонного ПСВ до температури T_{gb} , що максимально наближена до потенційної температури функціонування об'єкта дослідження.

2. Визначаємо вихідні сигнали окремих приймачів матриці ПВ для еталонного ПСВ у ширшій спектральній смузі $\lambda_{11} \div \lambda_{21}$.

3. Визначаємо вихідні сигнали окремих приймачів матриці ПВ для еталонного ПСВ у вузьчій спектральній смузі $\lambda_{12} \div \lambda_{22}$.

4. Складаємо систему рівнянь для вихідних сигналів у двох спектральних смугах із невідомими значеннями КППС й температури фону та відомими значеннями КВ й температури еталонного ПСВ:

$$\begin{cases} S_{p,q}^{11}(\lambda) = \tau_w(\varepsilon_{gb} \int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{21}} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_{gb}}} - 1)^{-1} d\lambda + (1 - \varepsilon_{gb}) \int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{21}} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1)^{-1} d\lambda) \\ S_{p,q}^{21}(\lambda) = \tau_w(\varepsilon_{gb} \int_{\lambda_{12}}^{\lambda_{22}} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_{gb}}} - 1)^{-1} d\lambda + (1 - \varepsilon_{gb}) \int_{\lambda_{12}}^{\lambda_{22}} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1)^{-1} d\lambda) \end{cases} \quad (3.2)$$

Також пропонуємо опис даної системи рівнянь через формулу Сакума-Хатторі-Віна II, яка використовується в якості функції калібрування тепловізора для уникнення використання інтеграла та відповідно спрощення порядку розрахунку впливних факторів:

$$\begin{cases} S_{p,q}^{11}(\lambda) = \tau_w \cdot (\varepsilon_{gb} \cdot C_{11} \cdot e^{\frac{-C_2}{A_{11}T_{gb}+B_{11}}} + (1 - \varepsilon_{gb}) \cdot C_{11} \cdot e^{\frac{-C_2}{A_{11}T_f+B_{11}}}) \\ S_{p,q}^{21}(\lambda) = \tau_w \cdot (\varepsilon_{gb} \cdot C_{22} \cdot e^{\frac{-C_2}{A_{22}T_{gb}+B_{22}}} + (1 - \varepsilon_{gb}) \cdot C_{22} \cdot e^{\frac{-C_2}{A_{22}T_f+B_{22}}}) \end{cases}, \quad (3.3)$$

де C_{11} , A_{11} , B_{11} – коефіцієнти, які визначаються за результатами калібрування за реперними точками в спектральній смузі $\lambda_{11} \div \lambda_{21}$;

C_{22} , A_{22} , B_{22} – коефіцієнти, які визначаються за результатами калібрування за реперними точками в спектральній смузі $\lambda_{12} \div \lambda_{22}$.

5. Розв'язуємо цю систему рівнянь та отримуємо значення τ_w та T_f , що характерні для заданих умов дослідження об'єкта і вважаються незмінними протягом періоду проведення подальших вимірювань у даному температурному діапазоні.

Таким чином, розраховані значення КППС та температури фону надалі використовуються для визначення температури та ГТ поверхні об'єкта дослідження.

Другий етап передбачає визначення точкових значень температури $T_{p,q}$ та відповідних їм КВ $\varepsilon_{p,q}$ об'єкта дослідження. Їх визначають шляхом опрацювання вихідних сигналів окремих приймачів матриці ПВ тепловізора, що формуються внаслідок перетворення потоку випромінення від об'єкта дослідження з точковими значеннями температур $T_{p,q}$ та відповідними КВ $\varepsilon_{p,q}$ в двох спектральних смугах $\lambda_{11} \div \lambda_{21}$ та $\lambda_{12} \div \lambda_{22}$. Отже, для реалізації вимірювань згідно другого етапу передбачено виконання наступних дій:

1. Визначаємо вихідний сигнал окремого ПВ для об'єкта дослідження у спектральній смузі $\lambda_{11} \div \lambda_{21}$.

2. Визначаємо вихідний сигнал окремого ПВ для об'єкта дослідження у спектральній смузі $\lambda_{12} \div \lambda_{22}$.

3. Складаємо систему рівнянь з відомими значеннями КППС та температури фону й невідомими значеннями КВ та точкових температур поверхні об'єкта дослідження:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{p,q}^{12}(\lambda) = \tau_w(\varepsilon_{p,q}) \int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{21}} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_{p,q}}} - 1)^{-1} d\lambda + (1 - \varepsilon_{p,q}) \int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{21}} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1)^{-1} d\lambda \\ S_{p,q}^{22}(\lambda) = \tau_w(\varepsilon_{p,q}) \int_{\lambda_{12}}^{\lambda_{22}} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_{p,q}}} - 1)^{-1} d\lambda + (1 - \varepsilon_{p,q}) \int_{\lambda_{12}}^{\lambda_{22}} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1)^{-1} d\lambda \end{array} \right. \quad (3.4)$$

Аналогічно пропонуємо вираження даної системи рівнянь через формулу Сакума-Хатторі-Віна II:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{p,q}^{12}(\lambda) = \tau_w \cdot (\varepsilon_{p,q} \cdot C_{11} \cdot e^{\frac{-C_2}{A_{11}T_{p,q} + B_{11}}} + (1 - \varepsilon_{p,q}) \cdot C_{11} \cdot e^{\frac{-C_2}{A_{11}T_f + B_{11}}}) \\ S_{p,q}^{22}(\lambda) = \tau_w \cdot (\varepsilon_{p,q} \cdot C_{22} \cdot e^{\frac{-C_2}{A_{22}T_{p,q} + B_{22}}} + (1 - \varepsilon_{p,q}) \cdot C_{22} \cdot e^{\frac{-C_2}{A_{22}T_f + B_{22}}}) \end{array} \right. \quad (3.5)$$

4. Розраховуємо точкові значення температури в межах РТ досліджуваної поверхні $T_{p,q}$ та відповідні КВ $\varepsilon_{p,q}$.

5. Забезпечуємо візуалізацію РТ ТП поверхні об'єкта дослідження з врахування впливних факторів за дійсними значеннями температури поверхні.

За умов програмної реалізації запропонований метод може бути взятий за основу при формуванні методики виконання ВТ та ГТ за ІЧВ поверхні об'єктів дослідження у промисловості та медицині. Застосування програмного забезпечення для обчислення значень впливних факторів, температури та ГТ за вихідними сигналами окремих приймачів матриці ПВ забезпечує визначення дійсних значень температури для кожної точки поверхні об'єкта дослідження згідно роздільної здатності тепловізора. Як результат, ми маємо змогу отримувати термограму із розподілом дійсних температур по ТП поверхні

об'єкта дослідження та проводити кількісний аналіз результатів тепловізійного дослідження.

3.2 Розроблення методики додаткового калібрування тепловізора в робочих умовах експлуатації

За умови неможливості проведення вимірювань у двох спектральних смугах та відсутності програмної реалізації запропонованого методу доцільним є застосування додаткового калібрування існуючих моделей тепловізорів в робочих умовах, щоб забезпечити можливість врахування впливних факторів робочих умов проведення тепловізійного дослідження.

Як зазначено в Розділі 1, в нормальних умовах, за яких проводиться калібрування тепловізорів, та в робочих умовах їх експлуатації, значення впливних факторів (КВ, ФВ та КППС) відрізняються, що суттєво впливає на функцію перетворення тепловізора і дає відхилення при вимірюванні сигналу. При цьому еталонним випромінювачем при калібруванні є еталонне АЧТ, відкаліброване у встановленому законодавством порядку, значення КВ якого є сталим та наближається до 1. При проведенні калібрування у лабораторії забезпечуються умови, де значення впливних факторів нормовані та мінімізовані. Але в реальних умовах експлуатації вплив КВ, ФВ та КППС має непередбачуваний характер. Тому для врахування дії впливних факторів ми пропонуємо при проведенні додаткового калібрування теж використовувати ПСВ.

Додаткове калібрування можна реалізувати шляхом вимірювання тепловізором трьох значень температури та розрахунку за вихідними сигналами нових значень коефіцієнтів C , A , B у функції перетворення. Нові значення коефіцієнтів враховуватимуть дію впливних факторів на функцію перетворення окремих приймачів матриці ПВ тепловізора, що дозволить підвищити точність визначення температури та ГТ ТП поверхні об'єкта дослідження.

Цей підхід передбачає визначення нових параметрів функції калібрування тепловізора в робочих умовах проведення вимірювань на прикладі формули

Сакума-Хатторі-Віна II, що забезпечить можливість коригування значень вихідного сигналу ПВ тепловізора [107].

Даний підхід включає виконання наступних дій:

1. Забезпечуємо нагрівання еталонного ПСВ до трьох різних температур у межах робочого діапазону температур тепловізора, що максимально близькі до значення температури досліджуваного об'єкта.

2. Для кожного значення температури проводимо вимірювання потоку випромінювання від ПСВ, припускаючи, що умови проведення вимірювань залишаються незмінними.

3. Складаємо систему рівнянь для вихідних сигналів тепловізора для трьох значень температури:

$$\begin{cases} S_1(\lambda, T_{gb_1}) = C \cdot e^{\frac{-C_2}{AT_{gb_1} + B}} \\ S_2(\lambda, T_{gb_2}) = C \cdot e^{\frac{-C_2}{AT_{gb_2} + B}} \\ S_3(\lambda, T_{gb_3}) = C \cdot e^{\frac{-C_2}{AT_{gb_3} + B}} \end{cases} \quad (3.6)$$

Припускається, що дані коефіцієнти за замовчанням відображають дію впливних факторів на результат вимірювання.

4. Розв'язуємо систему рівнянь та отримуємо відповідні значення коефіцієнтів C , A , B .

5. Перепрограмуємо функцію калібрування тепловізора та проводимо ВТ та ГТ для поверхні об'єкта дослідження.

Цей підхід виключає необхідність введення у користувацькому меню параметрів проведення дослідження, проте передбачає потребу у проведенні перепрограмування функції калібрування щоразу при зміні умов проведення дослідження.

При цьому непевність калібрування буде оцінюватися за непевністю типу В від методу, що передбачає визначення коефіцієнтів чутливості для кожного параметра функції, а саме:

- для температури ПСВ:

$$C'_{T_{gb}} = \frac{\partial(S(\lambda, T))}{\partial T_{gb}} = A \cdot C \cdot C_2 \cdot \frac{e^{\frac{-C_2}{B+A \cdot T}}}{(B + A \cdot T)^2}, \quad (3.7)$$

- для коефіцієнта C :

$$C'_C = \frac{\partial(S(\lambda, T))}{\partial C} = e^{\frac{-C_2}{B+A \cdot T}}, \quad (3.8)$$

- для коефіцієнта A :

$$C'_A = \frac{\partial(S(\lambda, T))}{\partial A} = C \cdot C_2 \cdot T \cdot \frac{e^{\frac{-C_2}{B+A \cdot T}}}{(B + A \cdot T)^2}, \quad (3.9)$$

- для коефіцієнта B :

$$C'_B = \frac{\partial(S(\lambda, T))}{\partial B} = C \cdot C_2 \cdot \frac{e^{\frac{-C_2}{B+A \cdot T}}}{(B + A \cdot T)^2}. \quad (3.10)$$

Також може бути застосований інший підхід, що передбачає використання основ алгоритму методу ВТ та ГТ за ІЧВ, проте зважаючи на відсутність доступу до інформації про сигнал окремого приймача матриці ПВ, алгоритм методу можна використовувати за умови, що дослідження проводиться для умовно однорідної ділянки. Тоді значення сигналу

відповідатиме потоку випромінення точкового значення температури ділянки поверхні дослідження із визначеним значенням КВ, тобто друга система рівнянь методу вимірювання видозміниться до наступного вигляду:

$$\begin{cases} S_{12}(\lambda) = \tau_w \cdot \left(\varepsilon \cdot \int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{21}} C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} d\lambda + (1 - \varepsilon) \cdot \int_{\lambda_{11}}^{\lambda_{21}} C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1 \right)^{-1} d\lambda \right) \\ S_{22}(\lambda) = \tau_w \cdot \left(\varepsilon \cdot \int_{\lambda_{12}}^{\lambda_{22}} C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} d\lambda + (1 - \varepsilon) \cdot \int_{\lambda_{12}}^{\lambda_{22}} C_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_f}} - 1 \right)^{-1} d\lambda \right) \end{cases} \quad (3.11)$$

Також пропонуємо вигляд даної системи рівнянь з використанням формули Сакума-Хатторі-Віна II:

$$\begin{cases} S_{12}(\lambda) = \tau_w \cdot \left(\varepsilon \cdot C_{11} \cdot e^{\frac{-C_2}{A_{11}T+B_{11}}} + (1 - \varepsilon) \cdot C_{11} \cdot e^{\frac{-C_2}{A_{11}T_f+B_{11}}} \right) \\ S_{22}(\lambda) = \tau_w \cdot \left(\varepsilon(\lambda, T) \cdot C_{22} \cdot e^{\frac{-C_2}{A_{22}T+B_{22}}} + (1 - \varepsilon) \cdot C_{22} \cdot e^{\frac{-C_2}{A_{22}T_f+B_{22}}} \right) \end{cases} \quad (3.12)$$

Отримавши дані про значення КППС, температуру фону та КВ, вводимо їх у користувацькому меню тепловізора.

Обмеження такого підходу полягає у необхідності проведення додаткового калібрування при зміні умов дослідження та для ділянок поверхні одного і того ж об'єкта за умови визнання їх різнорідними.

Порядок розробки методики додаткового калібрування тепловізора в робочих умовах в рамках методики виконання вимірювань РТ за ІЧВ представлено у роботі [108]. Розроблена нами методика обмежена порядком виконання вимірювань з додатковим калібруванням та не передбачає визначення порядку роботи по її затвердженню [109].

Таким чином, методика стосується особливостей застосування тепловізорів у робочих умовах експлуатації із врахуванням потреби у додатковому їх калібруванні безпосередньо перед застосуванням, що дозволить

врахувати вплив умов, відмінних від умов, які забезпечуються у калібрувальних лабораторіях [110].

3.3 Обґрунтування вибору спектральних смуг для реалізації двосмугового вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням

Як зазначено у підрозділі 3.1 метод ВТ та ГТ за ІЧВ в умовах експлуатації можна реалізувати за допомогою вимірювання потоку випромінення у двох спектральних смугах. При цьому одна робоча спектральна смуга повинна знаходитися в межах другої.

Даний принцип проведення тепловізійних вимірювань називаємо «смуга в смугі». Його суть графічно відображена на рисунку 3.2.

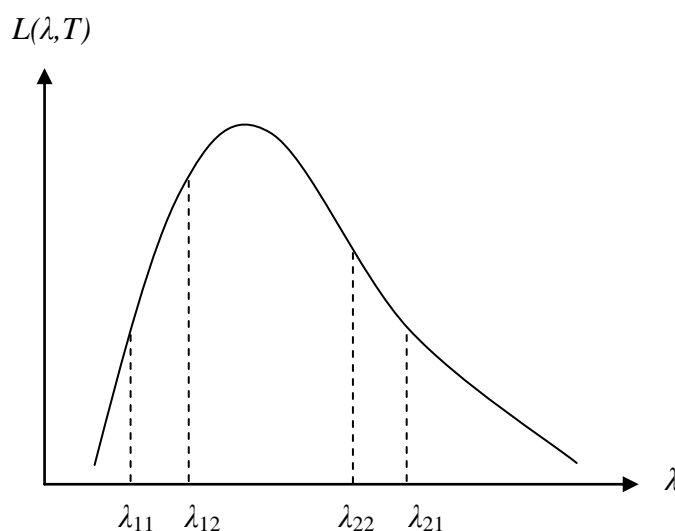


Рисунок 3.2 – Робочі спектральні смуги за принципом «смуга в смугі» на прикладі інтенсивності випромінення згідно закону Планка

Це може бути досягнуто такими шляхами:

- з використанням тепловізорів, що працюють у декількох спектральних діапазонах [111] або ж проведення вимірювань з використанням двох тепловізорів, що працюють у різних спектральних діапазонах (наприклад, IRE Cooled IR Cameras – IRE-320M і IRE-640M/BB);

- з використанням додаткового смугового фільтра для зменшення пропускної здатності робочого спектрального діапазону оптичної системи тепловізора.

При цьому слід пам'ятати, що має бути забезпечена однозначність визначення, а саме виконання таких умов:

$$S(\Delta\lambda_1, T, \Delta T) > S(\Delta\lambda_2, T, \Delta T) \text{ та } \frac{S(\Delta\lambda_1, T_1, \Delta T)}{S(\Delta\lambda_2, T_1, \Delta T)} > \frac{S(\Delta\lambda_1, T_2, \Delta T)}{S(\Delta\lambda_2, T_2, \Delta T)}. \quad (3.13)$$

За умови використання вікон прозорості атмосфери 3÷5 мкм або 8÷14 мкм можна обрати такі спектральні смуги:

- 8÷14 мкм та 8÷10 мкм або 8÷12 мкм, або 10÷12 мкм, або 12÷14 мкм;
- 3÷5 мкм та 3÷4 мкм або 4÷5 мкм.

Для діапазону температур від -20 до 470 °С, який передбачено при дослідженні об'єктів промисловості і медицини у даній роботі, доцільно обрати діапазон 8÷14 мкм. Відповідно, ми повинні працювати з наступними значеннями вузької спектральної смуги – 8÷10 мкм або 8÷12 мкм, або 10÷12 мкм, або 12÷14 мкм.

Оскільки розроблення нормативно-технічного забезпечення ВТ та ГТ за ІЧВ у даній роботі проводяться для об'єктів промисловості та медицини, то граничним значенням довжини хвилі вузького діапазону взято значення довжини хвилі в 10 мкм. Зумовлено це тим, що максимум випромінення поверхні тіла людини при кімнатній температурі припадає на довжину хвилі близько 10 мкм згідно із законом зміщення Віна [112]. Тому спектральна смуга 8÷10 мкм є оптимальною при реалізації запропонованого методу ВТ та ГТ за ІЧВ як для об'єктів промисловості, так і медицини.

При проведенні розрахунків значень вихідного сигналу приймача матриці ПВ тепловізора у діапазонах 8÷14 мкм та 8÷10 мкм відмінність між значеннями сигналу виявилася достатньою та зростаючою при збільшенні температури поверхні досліджуваного об'єкта для ідеального значення вихідного сигналу

тепловізора згідно закону Планка. Результати розрахунків представлено на рисунку 3.3.

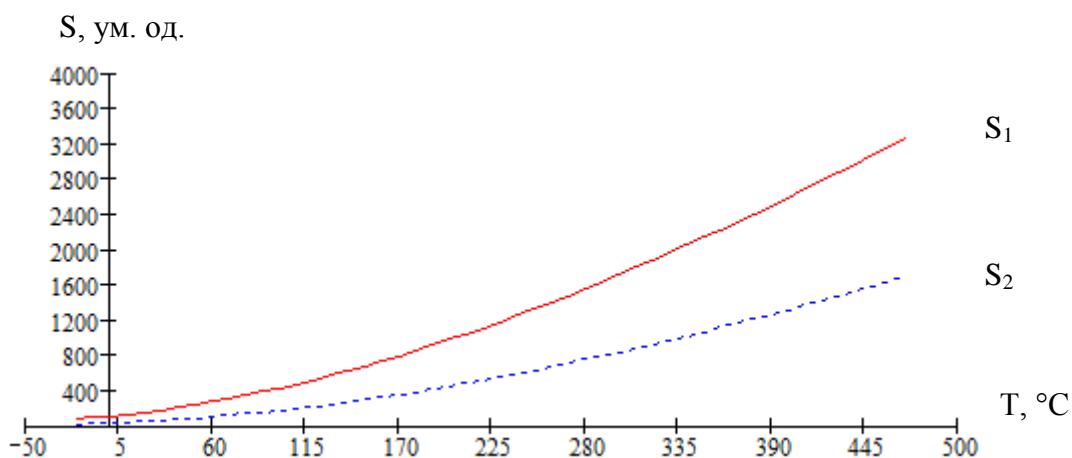


Рисунок 3.3 – Графіки значення вихідного сигналу S_1 та S_2 приймача випромінення тепловізора за формулою Планка для спектральних смуг $8\div 14$ мкм та $8\div 10$ мкм відповідно

Розглянемо найдешевші та найоптимальніші в робочих умовах варіанти реалізації принципу «смуга в смузі», а саме заміну лінзи та використання фільтра.

Для реалізації методу можна використати германієву захисну меніскову лінзу (Рисунок 3.4) із просвітлюючим покриттям (DLC/BBAR) на $8\div 10$ мкм.



Рисунок 3.4 – Германієва захисна меніскова лінза [113]

У таблиці 3.1 наведено технічні характеристики германієвої захисної меніскової лінзи.

Для формування спектральних смуг за принципом «смуга в смузі» доцільним є застосування багатошарового фільтра, який отримується у

результаті послідовного напилення шарів тонких плівок з різними значеннями спектральних коефіцієнтів пропускання. Відповідна комбінація цих шарів дозволяє отримати смуговий фільтр необхідної ширини та розташування по спектру довжин хвиль.

Таблиця 3.1 – Специфікація германієвої захисної меніскової лінзи

Назва характеристики	Опис характеристики
Матеріал	Германій
Діаметр, мм	105 (+0/-0.2)
Центральна товщина, мм	8 (± 0.2)
Припуск на фокальну довжину, %	± 2
Якість полірування, scr/dig	60/40

Що стосується використання багатошарових фільтрів, то готове рішення порядку нанесення шарів для звуження спектральної смуги пропускання, запропоновано при розробці детекторів Eagle Long Wave Infrared (LWIR) 640 x 512 Integrated Detector Cooler Assembly (IDCA) для високопродуктивних тепловізорів, що працюють у діапазоні 8÷10 мкм [114]. Для них запропоновано використання комбінації таких матеріалів – Mercury/Cadmium/Telluride (MCT). Проте, вартість виготовлення таких фільтрів є надто високою.

Можливі матеріали для побудови базової моделі конфігурації багатошарового фільтра пропускання у спектральній смузі 8÷10 мкм подано в таблиці 3.2. Згідно з [115] матеріалом основи для напилення при розробці смугового фільтра в смузі 8÷10 мкм може бути силіцій та германій.

Результат загальної процедури нанесення шарів запропонованих матеріалів представлено на рисунку 3.5.

Комбінування товщини та послідовності їх нанесення дозволяє отримати багатошаровий фільтр пропускання у спектральній смузі 8÷10 мкм.

Таблиця 3.2 – Можливі матеріали для побудови базової моделі конфігурації багат шарового фільтра пропускання у спектральній смузі $8\div 10$ мкм

№	Матеріал покриття та його індекс	Товщина, мкм
1	PbTe (1.73)	$\lambda/4$ та $\lambda/2$
2	PbF ₂ (1.4)	$\lambda/4$
3	Si (3.42)	$\lambda/4$
4	LaF ₃ (1.4)	$\lambda/4$
6	Основа наплення – Ge/Si	Вибирається залежно від товщини покриття

Отже, виконання вимірювань за принципом «смуга в смузі», тобто одночасні спостереження окремих зображень досліджуваного об'єкта у різних спектральних смугах, зможуть дати якомога більше інформації про досліджуваний об'єкт на тлі оточуючого середовища.

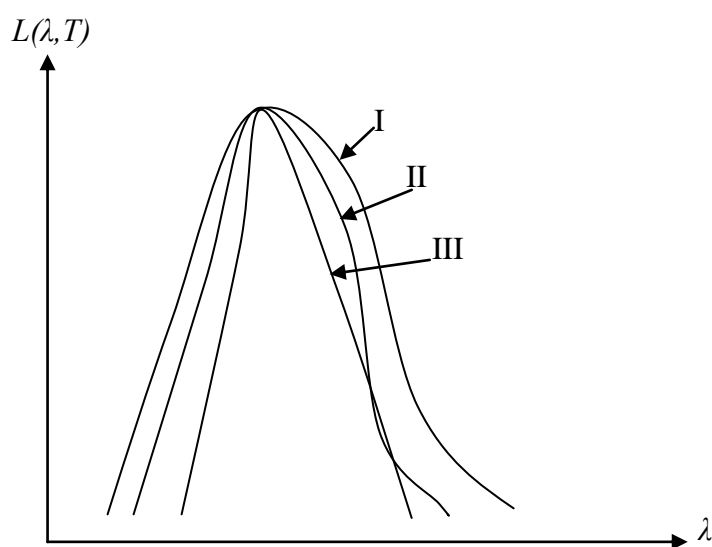


Рисунок 3.5 – Графік пропускання багат шарового фільтра на довжинах хвиль $8\div 14$ мкм на прикладі нанесення трьох шарів комбінації запропонованих матеріалів для звуження спектральної смуги до $8\div 10$ мкм

Це у свою чергу дозволить зменшити неоднозначність при його дешифруванні, а дослідження функцій розподілу КВ та відбиття у вузько-спектральних діапазонах дозволить отримати інформацію про хімічний, фізичний та біологічний стан досліджуваного об'єкта [116]. Таким чином,

реалізація тепловізійних досліджень у двох спектральних смугах дозволяє не тільки підвищити точність визначення РТ, але і розширює можливості тепловізійних досліджень загалом.

3.4 Розроблення конструкції площинного сірого випромінювача

3.4.1 Обґрунтування доцільності застосування сірого випромінювача для розроблених методу вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням та методики додаткового калібрування тепловізора в робочих умовах експлуатації

Оскільки застосування тепловізійної техніки в промисловості та медицині набирає все більшої популярності, то відповідно зростає потреба у підвищенні точності результатів ВТ та ГТ за ІЧВ. Але, як зазначено у розділі 1, в робочих умовах експлуатації відсутня достовірна інформація про точне значення КВ об'єкта дослідження, може бути присутнім значне ФВ та змінюватися КППС, що істотно впливатиме на точність ВТ та ГТ за ІЧВ.

Реалізувати запропонований нами метод ВТ та ГТ за ІЧВ з використанням випромінювача типу АЧТ не можливо, оскільки припускається, що значення КВ АЧТ $\varepsilon \approx 1$. Водночас частка відбитого випромінення прямує до нуля, оскільки коефіцієнт відбивання $\rho \rightarrow 0$. При цьому наш метод передбачає врахування відбитого випромінення, що прирівнюється до відбитого ФВ.

Окрім того, в [117] ASTM зазначає, що розмір досліджуваної поверхні для ТМВ повинен забезпечувати отриманням ТМВ 99 % усієї енергії випромінення досліджуваного об'єкта.

Таким чином, ще однією проблемою АЧТ є відносно малий розмір випромінювальної поверхні, що не дозволяє проводити вимірювання на значних відстанях від АЧТ та забезпечити імітацію умов проведення дослідження в реальних умовах [118]. Це зумовлює потребу у використанні площинного випромінювача. При цьому слід пам'ятати, що цільовий розмір випромінюючої поверхні, необхідний для забезпечення процесу вимірювання

конкретним тепловізором, залежить від оптичної системи цього тепловізора. Для ТМВ основною характеристикою, що визначає розмір випромінюючої поверхні, є відношення $D:S$ (відстані до площі досліджуваного об'єкта) [119], яке безпосередньо можна застосувати і до тепловізорів.

Саме тому для реалізації запропонованого методу ВТ та ГТ за ІЧВ тепловізором в умовах експлуатації ми пропонуємо застосовувати ПСВ, значення КВ якого $\varepsilon < 1$ та є сталим в заданому діапазоні довжин хвиль $\Delta\lambda$ та температури ΔT , а саме $\varepsilon(\Delta\lambda, \Delta T) = const$. Здатність «сірої» поверхні відбивати ФВ доцільно використати для реалізації запропонованого методу та обчислення значень впливних факторів, зокрема ФВ та КППС.

Окрім того, як зазначено в розділі 1, для калібрування тепловізорів у калібрувальних та повірочних лабораторіях використовують також еталонні випромінювачі типу АЧТ, КВ яких прямує до 1, а точніше знаходиться в межах $0,96 \div 0,99$ [28].

У міжнародних стандартах ISO 10012 Системи менеджменту якості. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання, ISO 17025 [77], а також у стандартах, що стосуються ТВ, таких як стандарти міжнародного товариства SAE AMS (зокрема, вимоги до аерокосмічних матеріалів), 2750D «Пірометрія» і посібник із використання термопар MNL-12 американського суспільства по випробуванню матеріалів, є рекомендації, що пропонують проводити калібрування ЗВТ безпосередньо за тих же умов, у яких він використовується та за яких проводитимуться вимірювання для об'єкта дослідження [110]. Таким чином, зростає зацікавленість у можливості забезпечення калібрування безпосередньо перед виконанням вимірювань [120]. Такий вид калібрування позначається терміном “in-situ calibration” та дозволяє реалізовувати вимірювання динамічних теплових процесів [121-122].

Також необхідно відзначити, що умови калібрування в лабораторіях відповідають нормальним умовам, які передбачають проведення вимірювань та застосування АЧТ при конкретних значеннях таких параметрів, як температура навколишнього середовища, відносна вологість повітря, атмосферний тиск,

напруга живлячої мережі, частота змінного струму (конкретні їх значення вказано у підрозділі 1.6). Зокрема, обов'язковою умовою їх застосування є також відсутність потужного ФВ, що забезпечується усуненням сонячного випромінення (екранування, зашторення вікон) та випромінення ламп освітлення.

В реальних же умовах значення вищерозглянутих параметрів істотно різняться від значень у нормальних умовах. Окрім того, при використанні такого еталонного АЧТ в робочих умовах виникає потреба у додаткових розрахунках, що забезпечують врахування інструментального дрейфу, пов'язаного із транспортуванням [118]. Тому виникає потреба у розробці випромінювача, що може працювати у робочих умовах та успішно забезпечити можливість реалізації і методики калібрування тепловізора на місцях.

Окрім того, вартість АЧТ також є однією із перешкод успішного та доступного його використання для кожного професійного користувача тепловізійної техніки. Спроби розробки дешевшого випромінювача з «модульованим» значенням випромінювальної здатності та аналіз існуючих рішень представлено у [111, 123-125], що ще раз підтверджує необхідність та можливість розробки й використання випромінювача, відмінного від моделі АЧТ.

3.4.2 Формування вимог до сірого випромінювача

На основі вищезазначеної інформації нами сформульовано вимоги до сірого випромінювача [126]:

- площинний характер конструкції, що дозволяє імітувати поверхню об'єкта дослідження та забезпечити достатній розмір досліджуваної поверхні, який відповідає вимогам ОПС конкретного тепловізора;
- КВ поверхні в певному температурному та спектральному діапазонах є сталим $\varepsilon(\Delta\lambda, \Delta T) = const$ і $\varepsilon(\Delta\lambda, \Delta T) < 1$ [127];
- випромінювальні властивості випромінювача є сталими в часі $\varepsilon(t) = const$;

- сумарний коефіцієнт відбивання поверхні відповідає наступним вимогам – $\rho(\Delta\lambda, \Delta T) > 0$, $\rho(\Delta\lambda, \Delta T) = const$;
- забезпечення однорідності температури випромінюючої поверхні;
- робочий спектральний діапазон $\Delta\lambda - 8 \div 14$ мкм;
- робочий діапазон температур ΔT в межах ІЧ області випромінювання $273 \div 800$ К.

Оптимальним у забезпеченні дотримання всіх умов, зазначених вище, є метал або ж сплав металів [128].

3.4.3 Способи формування випромінювальної здатності поверхні площинного сірого випромінювача

Значення потоку випромінювання від випромінювача можна змінювати як за допомогою зміни температури випромінюючої поверхні, так і за рахунок підбору конкретного матеріалу та геометричних характеристик поверхні випромінювання.

Виділимо три основні способи формування значення КВ практично будь-якої поверхні:

- 1) нанесення покриття з різним значенням КВ (зокрема, навіть фарбуванням поверхні можна досягнути значення КВ до 0,95);
- 2) механічна обробка поверхні, що забезпечує отримання різної шорсткості поверхні (для металів шліфувана поверхня має випромінювальну здатність від 0,02 до 0,5 залежно від виду [129], а при зміні шорсткості може наближатися до значення КВ АЧТ);
- 3) зміна геометрії поверхні.

Для металів додамо ще один спосіб – це окиснення поверхні металу, що забезпечує зростання КВ до 0,8. Проте, процес окиснення є фактично безперервним та нерівномірним у часі, що призводить до зростання невизначеності за рахунок відсутності достовірних знань про значення КВ у конкретний момент часу за даних умов [130].

На нашу думку, оптимальними є механічна обробка та зміна геометрії поверхні. Саме формування 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 із високим значенням теплопровідності [128]. Також порожнини забезпечують отримання «вірогіднішого» значення температури порівняно із плоскими поверхнями [120], тому оптимальним буде поєднання площинності випромінювача зі зміною геометрії його поверхні.

Можливу реалізацію даного підходу запропоновано у [128], де обґрунтовано доцільність створення 3D структур на поверхні у формі паралельних порожнин, представлених на рисунку 3.6.

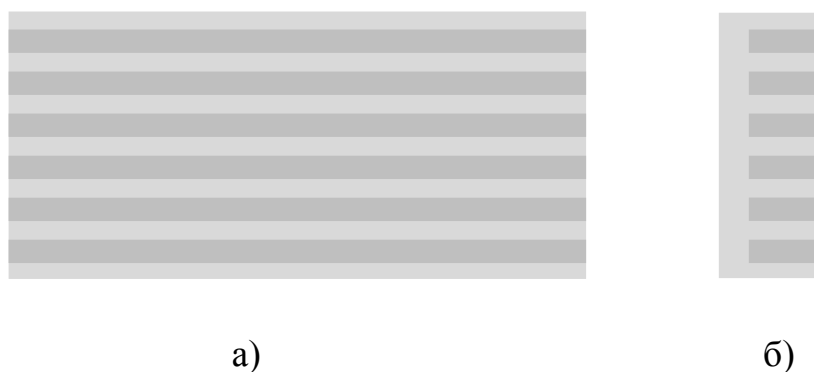


Рисунок 3.6 – Поверхня ПСВ із висвердленими паралельними порожнинами:

а) вигляд зверху; б) вигляд збоку

Ми ж пропонуємо для зміни геометрії висвердлювати порожнини у формі конуса або з забезпечувати друк такої поверхні на 3D принтері (Рисунок 3.7). Доцільність використання такої форми зумовлена властивістю конуса забезпечувати багаторазове відбивання випромінення, що потрапляє у його порожнину.

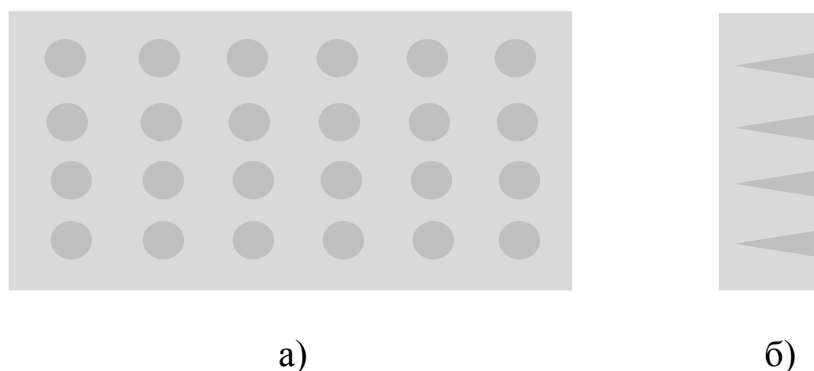


Рисунок 3.7 – Поверхня ПСВ із висвердленими конусами:

а) вид зверху; б) вид збоку

Таким чином, можна забезпечити підвищення та сталість значення КВ поверхні $\varepsilon_{surface}$ матеріалу ПСВ за рахунок зменшення значення коефіцієнта відбивання плоскої поверхні. Математично це підтверджується наступною формулою [128]:

$$\varepsilon_{cone} = \frac{\varepsilon_{surface}}{1 - (1 - \varepsilon_{surface}) \cdot F}, \quad (3.14)$$

де F – геометричний фактор;

R – радіус конуса, мм;

H – глибина конуса, мм.

При цьому значення геометричного фактора визначається як [131]:

$$F = 1 - \frac{R}{\sqrt{H^2 + R^2}}. \quad (3.15)$$

Таким чином, значення КВ поверхні ПСВ із конусами можна змінювати за рахунок вибору різномірних матеріалів поверхні випромінювача, зміни кількості висвердлених конусних порожнин та зміни радіуса й глибини конусів.

Функціональну залежність значення КВ від конкретно вибраного матеріалу та варіанта обробки можна відображати коефіцієнтом форми k_F . Його можна представити як функцію від радіуса конуса R , його глибини H та кількості висвердлених конусів n_{sq} на одиницю площі:

$$k_F = f(R, H, n_{sq}). \quad (3.16)$$

Для визначення значення КВ поверхні ПСВ із висвердленими конусами потрібно проводити експериментальні дослідження, наприклад «методом пірометра» [50] із застосуванням контактного термометра при одночасному вимірюванні контактної та безконтактної температури поверхні згідно формули:

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{S_c(\lambda, T)}{S_{non-c}(\lambda, T)}, \quad (3.17)$$

де $S_c(\lambda, T)$ – вихідний сигнал контактного термометра;

$S_{non-c}(\lambda, T)$ – вихідний сигнал безконтактного ВТ.

3.4.4 Забезпечення стабільності температури поверхні площинного сірого випромінювача

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

- для низьких температур в діапазоні до 30 °С з можливістю забезпечення безпосереднього контакту між об'єктом дослідження й випромінювачем та теплообміну між ними – без наповнювача та підігріву

(наприклад, для тепловізійних досліджень будівель та інших об'єктів низькотемпературних процесів із можливістю кріплення ПСВ до поверхні);

- в іншому випадку – з різними наповнювачами.

Для забезпечення відповідного значення температури та її однорідності для ПСВ можуть бути використані такі види наповнювачів:

- дистильована вода – за умови роботи із температурами вище температури замерзання води та нижче температури її кипіння – умовно $0 < T < 100$ °С;

- масляний наповнювач – оптимальний температурний діапазон – $-25 \div 250$ °С;

- соляна ванна – при роботі із температурами $200 \div 500$ °С [118].

Водночас при повірці ПСВ будь-якої конструкції згідно ЕА-10/13 [132] доцільно контролювати такі характеристики як однорідність, стабільність, точність відтворення значення КВ, час виходу в робочий режим.

Розглянемо формування цих конструкцій докладніше.

3.4.5 Конструкція площинного сірого випромінювача без наповнювача

Розглянемо конструкцію ПСВ без наповнювача.

Нами проведено обґрунтування вибору конструкції випромінювача на основі аналізу існуючих моделей. Відома з літератури конструкція випромінювача «сіре тіло» моделі 975 [133] з діаметром випромінюючої поверхні від 20 до 65 мм та КВ не менше 0,95. Він є портативним джерелом випромінювання, призначеним для калібрування ТМВ і тепловізорів з використанням еталонного пірометра. Значення його температури встановлюється за допомогою регулятора, що має незалежний індикатор із вбудованим в робочу порожнину контактним датчиком, який показує істинне значення температури в діапазоні $50 \div 350$ °С. Але недоліком цієї конструкції є малі розміри випромінюючої поверхні та велике значення КВ, а також необхідність використання еталонного пірометра.

Відома також конструкція випромінювача «сіре тіло» [134], призначеного для відтворення ІЧВ, однозначно пов'язаного із температурою випромінювальної поверхні і її лакофарбного покриття. Він виконаний у вигляді плоского паралелепіпеда з теплопровідного матеріалу. Його великі протилежні грані є випромінюючими поверхнями (одна випромінююча поверхня пофарбована фарбою з відомим КВ, а інша поверхня розділена на прямокутні ділянки, пофарбовані різними фарбами) і мають розміри, що більші розмірів поля зору вимірювального пристрою на відстані проведення вимірювання. При цьому паралелепіпед заповнений рідиною з відомою температурою кипіння, поміщений в нетеплопровідну нішу з боковими стінками на петлях і жалюзі, що не зачиняються, для виключення негативного впливу умов навколишнього середовища.

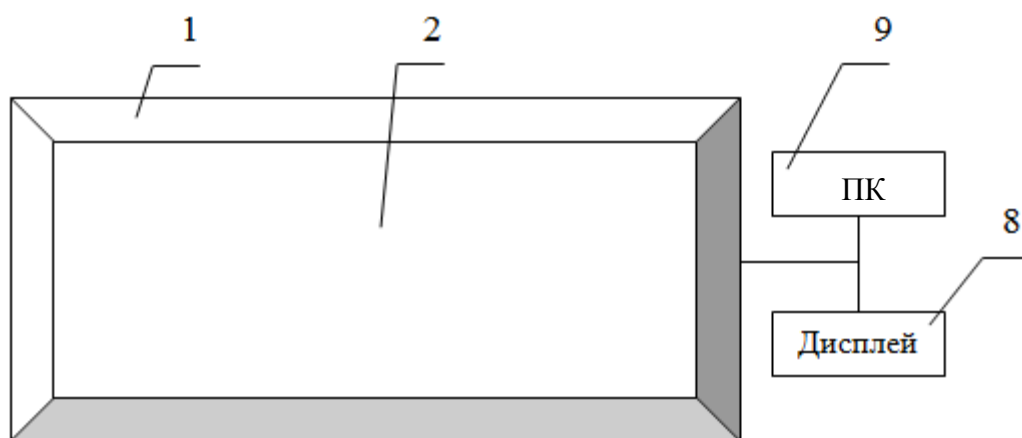
Цей випромінювач забезпечує однаковий рівень нагріву як поверхні випромінювача, так і досліджуваної поверхні. Окрім того, він дозволяє визначити коефіцієнт пропускання траси, що у нашій конструкції інтерпретовано як визначення КППС.

Недоліком такого технічного рішення є обмежена сфера його використання для дослідження КВ фарб проведенням експерт-аналізу досліджуваних фарб або інших покриттів шляхом порівняння з іншими фарбами (покриттями), випромінювальні характеристики яких відомі. Їх наносять на одну спільну поверхню з однаковою температурою.

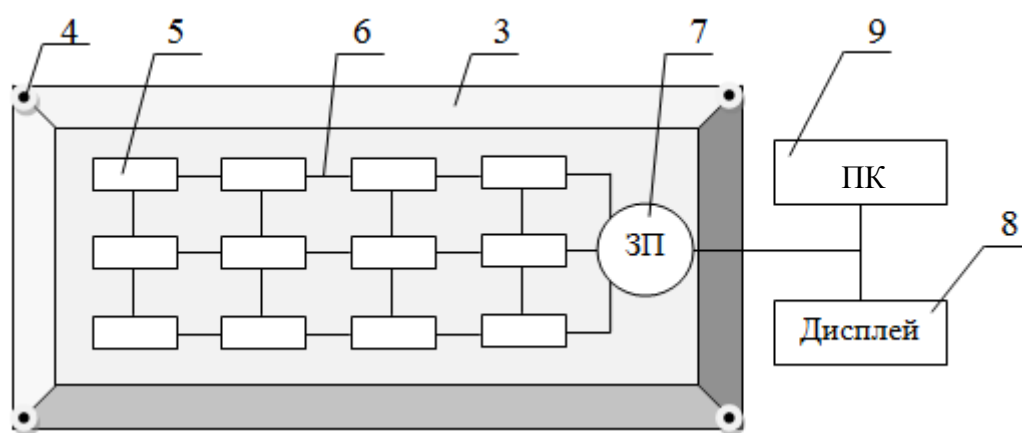
Окрім того, недоліком обох зазначених конструкцій є висока вартість технічного засобу та процесу його обслуговування.

На рисунках 3.8 а-в зображено схему конструкції запропонованого ПСВ.

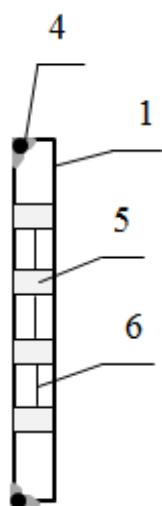
За будовою ПСВ виконаний у вигляді плоскої пластини із матеріалу високої теплопровідності, випромінююча поверхня якої за розмірами повинна бути більшою розмірів поля зору вимірювального пристрою на відстані проведення вимірювання.



а)



б)



в)

- 1 – Плоска пластина з теплопровідного матеріалу
- 2 – Верхня грань плоскої пластини, яка є випромінюючою поверхнею
- 3 – Нижня грань плоскої пластини із резиновим покриттям
- 4 – Кріплення
- 5 – Сенсори
- 6 – Інформаційні канали
- 7 – Портативний запам'ятовуючий пристрій (ЗП)
- 8 – Дисплей
- 9 – персональний комп'ютер (ПК)

Рисунок 3.8 – Схема конструкції ПСВ:

а) – вид зверху; б) – вид знизу; в) вид у розрізі

На нижній грані цієї пластини розташовані кріплення із резиновим покриттям по периметру (для забезпечення кращого прилягання до поверхні та ізоляції внутрішньої поверхні ПСВ під час проведення вимірювань) та сенсори.

Кріплення ПСВ повинні забезпечувати максимальне прилягання сенсорів до об'єкта дослідження для забезпечення проходження процесів теплообміну з мінімальними втратами. Сенсори пов'язані між собою за допомогою інформаційних каналів, з яких інформація надходить на портативний запам'ятовуючий пристрій. При цьому, у [120] зазначено, що сенсори повинні знаходитися на відстані 1 мм від поверхні випромінювача та за умови, що покриття поверхні повинно мати товщину приблизно 50 мкм. Завдяки цьому різниця між значенням температури поверхні та значенням температури, яку вимірює сенсор, є такою, що може бути знехтувана.

З портативного запам'ятовуючого пристрою інформація потрапляє на дисплей та при можливості на персональний комп'ютер, звідки ми отримуємо дані про готовність випромінювача до роботи та максимальну наближеність його температури до температури поверхні досліджуваного об'єкта. Водночас інформація, що потрапляє через інформаційні канали на запам'ятовуючий пристрій може оброблятися у вигляді двох потоків, а саме усередненого значення температури поверхні та її розподілу.

Ця конструкція забезпечує відсутність потреби у нагрівачому елементі та наповнювачі для підтримки стабільного значення температури. Це дозволяє проводити ВТ та ГТ з використанням тепловізора в робочих умовах безпосередньо перед його використанням.

Таким чином, такий ПСВ дозволяє максимально відтворювати випромінювальні властивості реальної випромінювальної поверхні об'єкта дослідження.

3.4.6 Конструкція площинного сірого випромінювача з наповнювачем

У разі необхідності використання наповнювача ПСВ конструктивно включатиме у себе дві основні частини: блок нагрівача і блок регулятора температури. Нагрівач забезпечує ізотермічність випромінювальної поверхні ПСВ при різних значеннях температури. Він включає в себе герметичну ізольовану посудину, радіатор, електричний нагрівач і змішувач, які працюють від двигуна постійного струму. У посудину заливається наповнювач, рівень якого можна контролювати за допомогою індикатора, розташованого на панелі пристрою. Змішувач використовується для того, щоб забезпечити розподіл нагрітого наповнювача в ємності та рівномірне значення температури в усіх точках випромінювальної поверхні. Розмір та конструкція радіатора визначаються розміром та конструкцією випромінювальної поверхні.

Для забезпечення точного регулювання температури радіатора та для підтримки значення температури на необхідному рівні нагрівач під'єднують до блока регулятора температури. Система контролю блока регулятора включає сенсори температури, цифрові термометри, мікропроцесор та відповідне програмне забезпечення. Для доступу до системи контролю достатнім є вивід інформації на дисплей та використання кнопок для вибору значення температури.

Таким чином, ПСВ забезпечує виконання основного завдання запропонованого методу ВТ та ГТ за ІЧВ та методики додаткового калібрування тепловізора в робочих умовах експлуатації, а саме підвищення точності вимірювання температури окремих точок поверхні об'єкта дослідження та ГТ шляхом врахування впливу випромінювальної здатності досліджуваного об'єкта, ФВ та пропускання проміжного середовища.

3.5 Моделювання реалізації методу вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням

Моделювання реалізації методу ВТ та ГТ за ІЧВ розпочинаємо із визначення параметрів A , B та C формули Сакума-Хатторі-Віна II у програмному забезпеченні MathCad.

Для цього необхідно побудувати систему із трьох рівнянь для вихідних сигналів ПВ тепловізора.

В якості вхідних значень температури при розрахунку вихідного сигналу обираємо реперні точки із МТШ-90 [135]. Оскільки діапазон температури поверхні об'єктів промисловості і медицини, що досліджувався у підрозділі 2.4, становить $-20 \div 470$ °С, то в якості реперних точок вибираємо:

- потрійну точку води 273,16 К;
- точку затвердіння індію 429,7485 К;
- точку затвердіння цинку 692,677 К.

Розрахунки проводимо для обох спектральних смуг. Знайдені значення параметрів формули Сакума-Хатторі-Віна II представлено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати розрахунку коефіцієнтів функції перетворення тепловізора для двох спектральних смуг

Коефіцієнт	Спектральна смуга 8÷14 мкм	Спектральна смуга 8÷10 мкм
A	$7,9073104048087525824 \cdot 10^{-6}$	$7,71148936658804944258 \cdot 10^{-6}$
B	$3,7155308829880404250 \cdot 10^{-4}$	$1,8667068840212758334 \cdot 10^{-6}$
C	32469,370527381664501	19147,502445274749045

Далі визначаємо значення вихідних сигналів при проведенні ВТ та ГТ при конкретних значеннях впливних факторів об'єктів дослідження. Значення вхідних величин вихідного сигналу для об'єктів промисловості та медицини представлено в таблиці 3.4. Усі розрахунки проведено із точністю 10^{-7} .

Таблиця 3.4 – Значення вхідних величин вихідного сигналу для об'єктів промисловості та медицини

Вхідні величини	Об'єкт промисловості	Об'єкт медицини
Температура об'єкта, °С	22,00	34,00
КВ	0,89	0,97
КППС	0,95	0,99
Температура фону, °С	18,00	18,00

При цьому припускається, що значення КВ ПСВ становить 0,95 та має таке ж значення температури поверхні як і об'єкт дослідження за незмінних умов навколишнього середовища.

Проводимо розрахунки для об'єкта промисловості.

У результаті розв'язання першої системи рівнянь згідно формули (3.3) методу ВТ та ГТ, отримуємо наступні значення КППС та значення температури фону: $\tau_w = 0,9499963$ та $T_f = 18,0023388$ °С. Тобто відносне значення відхилення від дійсних значень становлять відповідно $-3,947368 \cdot 10^{-4} \%$ та $8,0329082 \cdot 10^{-4} \%$.

Вводимо отримані результати у другу систему рівнянь згідно формули (3.5). При цьому порівнюємо значення вихідних сигналів у двох спектральних смугах для вхідних та розрахованих значень КППС та температури фону.

Різниця значень сигналів для ширшого та вузького спектральних каналів становить відповідно $-6,2028724 \cdot 10^{-6} \%$ та $5,4398047 \cdot 10^{-4} \%$.

У результаті розв'язання цих систем рівнянь за дійсним та розрахованим значеннями КППС та температури фону, отримали значення діапазону температур – $22,00029 \div 22,00033$ °С та 0,89 для КВ поверхні.

Таким чином, розраховане значення КВ дорівнює дійсному значенню, а для значення температури відносні відхилення склали $-0,98245125 \cdot 10^{-6}$ - $1,1180756 \cdot 10^{-6} \%$.

Проводимо розрахунки для об'єкта медицини.

У результаті розв'язання першої системи рівнянь згідно формули (3.3) отримуємо наступні значення КППС та значення температури фону: $\tau_w = 0,9900054$ та $T_f = 17,9938915$ °С. Тобто відносне значення відхилення від дійсних значень становлять $-5,4545455 \cdot 10^{-4}$ % та $-2,0981034 \cdot 10^{-3}$ %.

Вводимо отримані результати у другу систему рівнянь згідно формули (3.5). У результаті розв'язання цих систем рівнянь за дійсними та розрахованими значеннями КППС та температури фону значення діапазону температур склали від $34,1500024$ °С до $34,1500025$ °С, а значення КВ поверхні – $0,97$.

Таким чином, розраховане значення КВ дорівнює дійсному значенню, а для значення температури відносні відхилення склали $7,8137719 \cdot 10^{-7}$ - $8,1393458 \cdot 10^{-7}$.

Отже, даний приклад підтвердив, що алгоритм запропонованого методу ВТ та ГТ за ІЧВ поверхні об'єкта дослідження тепловізором в робочих умовах експлуатації дає можливість отримувати результати, збіжні із дійсними значеннями температури та впливних факторів.

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

Для цього розрахуємо значення вихідного сигналу за відсутності дії впливних факторів або введення оператором одиничних значень КВ та КППС, а також значення вихідного сигналу із дією впливних факторів. Далі визначимо за вихідним сигналом із дією впливних факторів значення температури, що отримуватиме оператор на дисплеї тепловізора за умови використання вихідного сигналу за відсутності дії впливних факторів, та порівняємо їх із дійсними значеннями температури.

Моделювання проводимо при різних значеннях впливних факторів:

- для об'єктів промисловості $\varepsilon = 0,75; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95; 0,99$, $\tau = 0,9; 0,93; 0,95; 0,97; 0,99$; 1, $T_f = -10; 0; 21; 50; 100; 250$ °С, діапазон температури T поверхні об'єкта $-20 \dots 470$ °С;

- для об'єктів медицини $\varepsilon = 0,96; 0,97; 0,98$, $\tau = 0,9; 0,93; 0,95; 0,97; 0,99$; 1, $T_f = -20; 0; 10; 22; 35; 50$ °С, діапазон температури T поверхні об'єкта $24 \dots 39$ °С.

Приклад моделювання для вибраних значень температури відображено у таблиці 3.5 для об'єктів промисловості та 3.6 для об'єктів медицини. При цьому комбінування значень впливних факторів для конкретного значення температури є випадковим.

В останньому рядку таблиць 3.5 та 3.6 вказано результати моделювання для мінімального значення температури досліджуваного об'єкта за умови максимального впливу факторів для визначення максимально можливого відхилення результатів вимірювання температури від дійсного значення у вибраних діапазонах вхідних величин вихідного сигналу.

Таблиця 3.5 – Результати моделювання реалізації методу для окремих значень вхідних величин для об'єктів промисловості

Дійсне значення температури, °С	Значення впливних факторів			Розраховане значення температури, °С	Абсолютне відхилення розрахованого та дійсного значення, °С	Відносне відхилення розрахованого та дійсного значення (для К/°С)
	ε	τ	T_f , °С			
-20	0,8	0,9	21	-15,39998	4,60002	1,81711/-23,0001
10	0,95	0,93	250	28,86472	18,86472	6,66245 /188,6472
30	0,99	0,95	-10	26,28278	-3,71722	-1,2262/-12,39073
100	0,75	0,97	0	78,14206	-21,85794	-5,85768/-21,85794
250	0,9	0,99	100	235,95531	-14,04469	-2,68464/-5,61788
470	0,85	1	50	423,54312	-46,45688	-6,25135/-9,88444
-20	0,75	0,9	250	80,57106	100,57106	39,72785/502,8553

Відповідно для об'єктів промисловості для заданих умов проведення дослідження використання методу ВТ та ГТ за ІЧВ дозволяє підвищити точність вимірювання більше, ніж у 10 разів у порівнянні з інструментальною похибкою, що вказується в супровідній технічній документації до тепловізорів.

Таблиця 3.6 – Результати моделювання реалізації методу для окремих значень вхідних величин для об'єктів медицини

Дійсне значення температури, °С	Значення впливних факторів			Розраховане значення температури, °С	Абсолютне відхилення розрахованого та дійсного значення, °С	Відносне відхилення розрахованого та дійсного значення (для К/°С)
	ε	τ	T_f , °С			
24	0,97	0,9	10	16,97496	-7,02504	-2,36414/-29,271
27	0,96	0,93	50	23,28917	-3,71083	-1,23633/-13,74381
30	0,98	0,95	-20	25,83623	-4,16377	-1,3735/-13,87923
33	0,96	0,97	0	29,81441	-3,18559	-1,04053/-9,6533
36	0,97	0,99	35	35,2752	-0,7248	-0,23444/-2,01333
39	0,98	1	22	38,6834	-0,3166	-0,10143/-0,81179
24	0,96	0,9	50	18,46559	-5,53441	-1,8625/-23,06004

Відповідно для об'єктів медицини для заданих умов проведення дослідження використання методу ВТ та ГТ за ІЧВ дозволяє підвищити точність вимірювання до 2 разів у порівнянні з інструментальною похибкою, що вказується в супровідній технічній документації до тепловізорів.

Висновки до розділу 3

У даному розділі розроблено двоспектральний метод вимірювання температури та градієнта 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 та градієнта температури поверхні об'єкта

дослідження, а саме: випромінення поверхні досліджуваного об'єкта, пропускання проміжного середовища та відбивання випромінення фону.

Проведено аналіз вибору конкретних значень довжин хвиль для спектральних смуг за принципом «смуга в смугі» 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. У результаті моделювання виявлено, що їх застосування дозволяє проводити вимірювання точкового значення температури поверхні об'єкта дослідження із точністю 10^{-6} °С, тобто алгоритм запропонованого методу ВТ та ГТ за ІЧВ поверхні об'єкта дослідження тепловізором в робочих умовах експлуатації дає можливість отримувати результати, збіжні із дійсними значеннями температури та впливних факторів. 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.

Застосування запропонованих методу та методики у реальних умовах сприятиме підвищенню точності практичних вимірювань, адже забезпечить істотне зменшення методичної непевності шляхом врахування впливу на результати вимірювання температури та градієнта температури випромінювальних властивостей об'єкта дослідження, пропускання проміжного середовища та відбивання фонового випромінення.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ Й ВИЗНАЧЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ ТА РОЗРОБЛЕННЯ НОРМАТИВНО-МЕТОДИЧНИХ ДОКУМЕНТІВ

4.1 Експериментальні дослідження вимірювань температури та визначення розподілу температури тепловізором в умовах експлуатації

Проведено експериментальні дослідження по ВТ та визначенню РТ поверхні за випроміненням об'єктів промисловості та медицини.

Дослідження проводилися для наступної групи об'єктів:

- 1) АЧТ JQ200MYZ2B Kelvin з діапазоном температур від 0 °С до 200 °С та вагою 14,5 кг;
- 2) тренувальна ціль С.А. 1875 BANC DIDACTIQUE THERMOGRAPHIE Chauvin Arnoux із можливістю нагрівання до 60 °С із різнорідними покриттями;
- 3) охолоджувальна система лабораторної установки;
- 4) котельня студентського гуртожитку;
- 5) долоня людини.

При проведенні досліджень використовувався тепловізор FLUKE TiR32 з наступними технічними характеристиками:

- діапазон вимірюваних температур: $-20 \div 150$ °С;
- точність ВТ ± 2 % або ± 2 °С (залежно від того, що є більшим при номінальному значенні температури 25 °С);
- розмір ІЧ детектора 320×240, матриця фокальної площини Focal-Plane Array (FPA), неохолоджуваний мікроболометр;
- температурна чутливість $\leq 0,05$ °С при 30 °С температури цілі;
- робочий спектральний діапазон – $8 \div 14$ мкм.

Для подальшої обробки термограм використовувалося програмне забезпечення SmartView.

Для кожного об'єкта дослідження вимірювання проводилися за різних умов навколишнього середовища.

Перевірка точності ВТ проводилася контактним термометром Checktemp 1 Digital Thermometer-НІ98509 by Hanna з наступними технічними характеристиками – діапазон вимірюваних температур $-50\div 150$ °С, точність ВТ – $\pm 0,2$ °С при $-30\div 120$ °С та $\pm 0,3$ °С при $-50\div -30$ °С та $120\div 150$ °С.

На рисунках 4.1-4.4 відображені результати проведених вимірювань до (Рисунки 4.1 а – 4.4 а) та після (Рисунки 4.1 б – 4.4 б) уточнення значень впливних факторів з використанням засад методу ВТ та ГТ за ІЧВ з використанням тепловізора в умовах експлуатації.

У результаті тепловізійних досліджень для АЧТ згідно засад методу ВТ та ГТ за ІЧВ в умовах експлуатації було виявлено відхилення значення КВ на 0,01, КППС на 0,01 та температури фону на 0,3 °С (Рисунок 4.1).

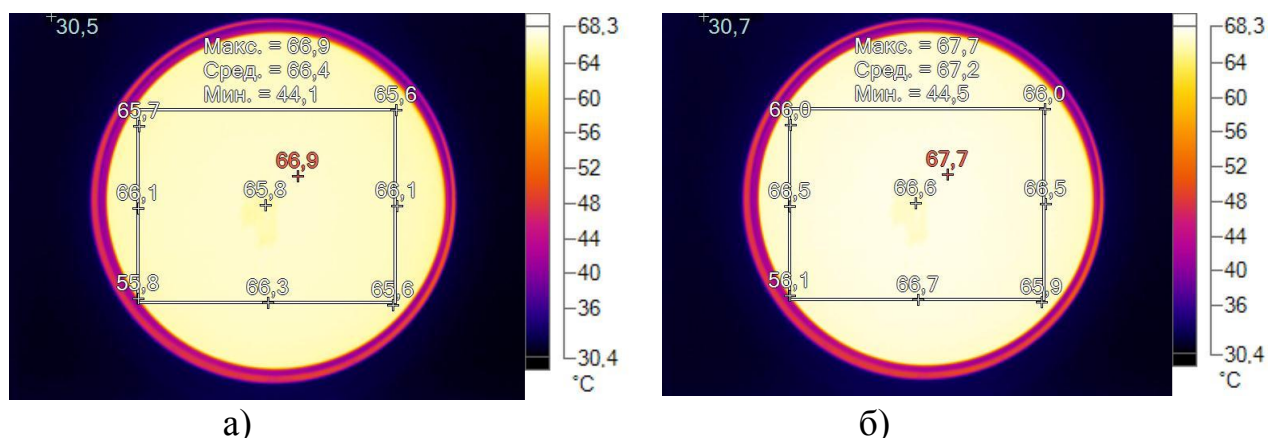


Рисунок 4.1 – Термограми АЧТ:

а) – до уточнення; б) – після уточнення

Результати перевірки температури досліджуваних точок АЧТ контактним термометром представлені у таблиці 4.1.

Після уточнення значень впливних факторів з використанням засад методу ВТ та ГТ за ІЧВ в умовах експлуатації для тренувальної цілі було виявлено відхилення значення КВ на 0,02 та температури фону на 0,1 °С, що подано на рисунку 4.2.

Результати перевірки температури досліджуваних точок тренувальної цілі контактним термометром представлені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.1 – Таблиця результатів експериментальних досліджень для АЧТ

Назва точки	Значення температури до уточнення, °С	Значення температури після уточнення, °С	Показання контактного термометра, °С
Центральна точка	65,8	66,6	66,5
P0	65,7	66,0	65,9
P1	66,1	66,5	66,4
P2	55,8	56,1	55,9
P3	65,6	66,0	65,9
P4	66,1	66,5	66,3

Для АЧТ та тренувальної цілі значення КВ умовно приймалося однаковим для значення всієї поверхні досліджуваного об'єкта.

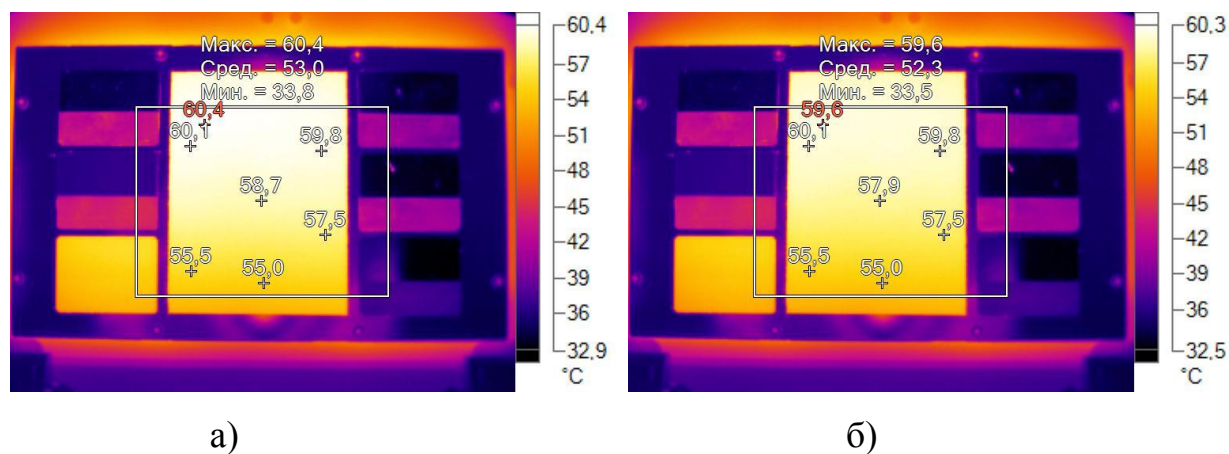


Рисунок 4.2 – Термограми тренувальної цілі:

а) – до уточнення; б) – після уточнення

В охолоджувальній системі лабораторної установки для різних елементів системи характерні різні значення КВ. Для охолоджувальній системі лабораторної установки за результатами уточнення значень впливних факторів з використанням засад методу ВТ та ГТ за ІЧВ в умовах експлуатації було

виявлено відхилення значення КВ на 0,05 та температури фону на 0,3 °С для центральної точки, що показано на рисунку 4.3.

Таблиця 4.2 – Таблиця результатів експериментальних досліджень для тренувальної цілі

Назва точки	Значення температури до уточнення, °С	Значення температури після уточнення, °С	Показання контактного термометра, °С
Центральна точка	58,7	57,9	58,1
P0	60,1	60,1	60,0
P1	55,5	55,5	55,5
P2	59,8	59,8	55,9
P3	57,5	57,5	57,5
P4	55,0	55,0	55,0

Результати перевірки температури досліджуваних точок охолоджувальної системи контактним термометром представлені у таблиці 4.3.

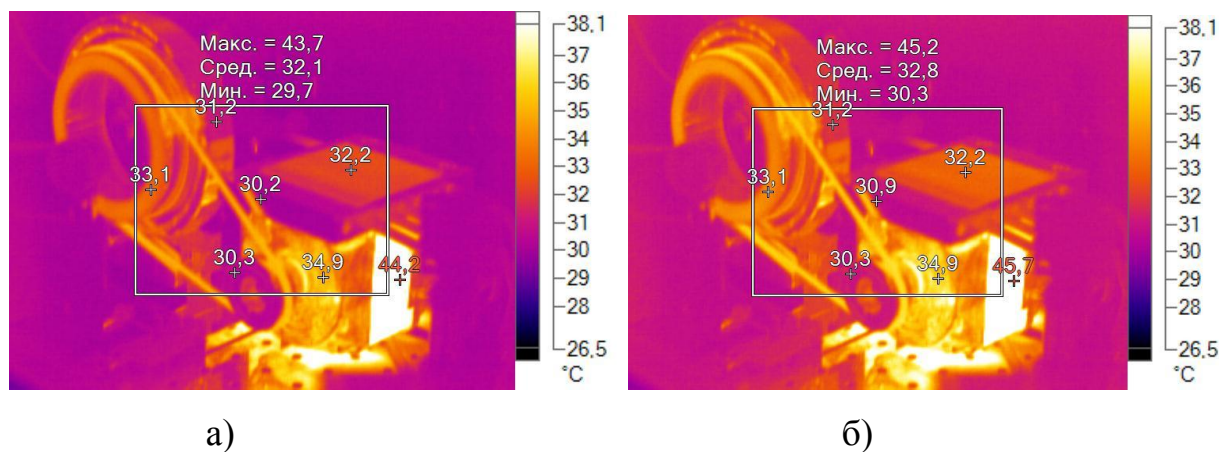


Рисунок 4.3 – Термограми охолоджувальної системи лабораторної установки:

а) – до уточнення; б) – після уточнення

За термограмами проведення тепловізійного дослідження та результатами перевірки контактним термометром бачимо, що результати виходять за межі допустимої похибки $\pm 0,2$ °С контактного термометра на $\pm 0,1$, що може бути

зумовлено робочим станом установки без контролю процесу зміни її температури.

Таблиця 4.3 – Таблиця результатів експериментальних досліджень для охолоджувальної системи лабораторної установки

Назва точки	Значення температури до уточнення, °С	Значення температури після уточнення, °С	Показання контактного термометра, °С
Центральна точка	30,2	30,9	30,6

Для котельні студентського гуртожитку у результаті уточнення значень впливних факторів з використанням засад методу ВТ та ГТ за ІЧВ в умовах експлуатації було виявлено відхилення значення КВ на 0,01, КППС на 0,02 і температури фону на 0,5 °С, що показано на рисунку 4.4.

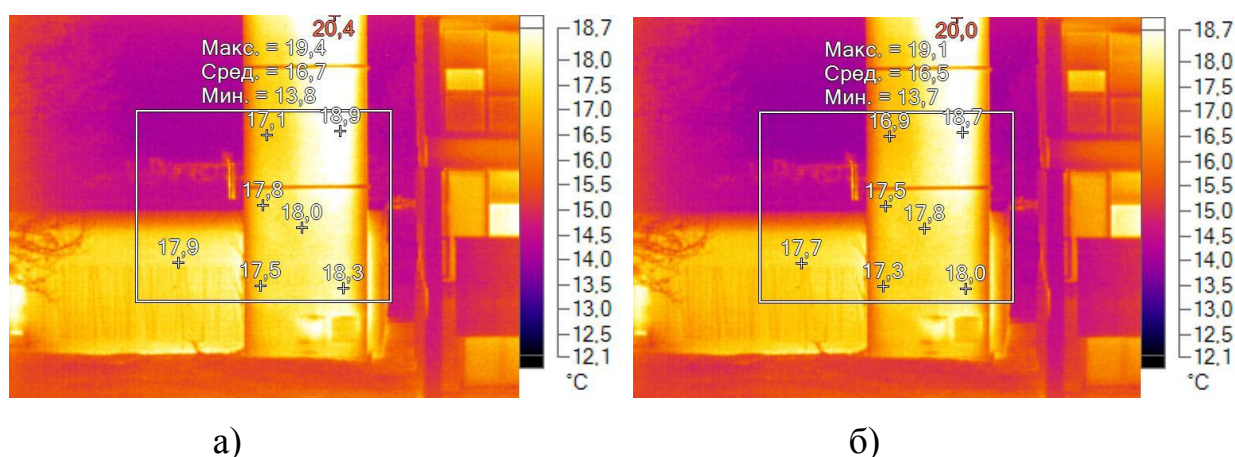


Рисунок 4.4 – Термограми котельні студентського гуртожитку:

а) – до уточнення; б) – після уточнення

Перевірку РТ досліджуваних точок не проводили. Контактним термометром визначили лише значення температури на висоті витягнутої руки. Воно становить 17,3 °С. Порівняння значень температури для котельні студентського гуртожитку до та після уточнення значень впливних факторів з

використанням засад методу ВТ та ГТ за ІЧВ в умовах експлуатації представлено у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – 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 у результаті уточнення значень впливних факторів з використанням засад методу ВТ та ГТ за ІЧВ в умовах експлуатації було виявлено відхилення значення КВ на $-0,01$ та температури фону на $-0,5$ °С. При чому, зміна температури фону ніякого впливу на значення температури не мала, оскільки неістотно відрізнялася від значення температури поверхні долоні, що показано на рисунку 4.5.

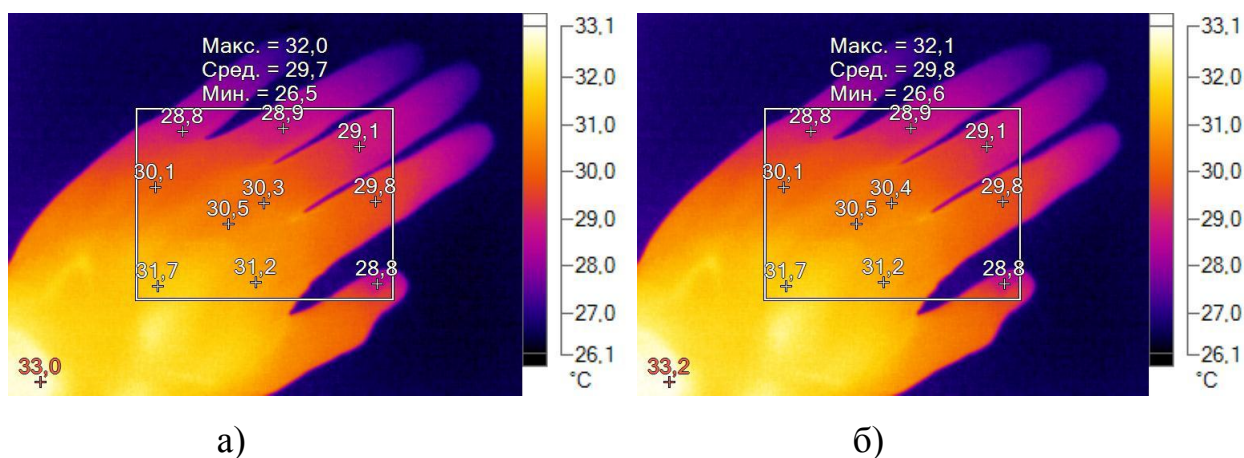


Рисунок 4.5 – Термограми долоні людини:

а) – до уточнення; б) – після уточнення

Перевірку РТ досліджуваних точок не проводили. Контактним термометром визначили лише значення температури у центральній точці – 30,4 °С.

Порівняння значень температури для долоні людини до та після уточнення представлено у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Таблиця результатів експериментальних досліджень для долоні людини

Назва точки	Значення температури до уточнення, °С	Значення температури після уточнення, °С	Показання контактного термометра, °С
Центральна точка	30,3	30,4	30,4

Таким чином, у результаті виконання експериментальних досліджень було підтверджено, що впливні фактори вихідного сигналу зумовлюють виникнення відхилення між дійсним та вимірним значенням температури, тому доцільно використовувати метод ВТ та ГТ за ІЧВ в умовах експлуатації, оскільки навіть помилка у десять градусів визначення температури в окремих галузях промисловості та медицини є критичними.

4.2 Експериментальні дослідження використання спектральних фільтрів при вимірюваннях температури тепловізором

Проведено експериментальні дослідження використання спектральних фільтрів при ВТ тепловізором.

При проведенні досліджень використовувався тепловізор FLUKE Ti25 з наступними технічними характеристиками:

- діапазон вимірюваних температур: -20÷350 °С;
- точність ВТ ± 2 % або ± 2 °С;
- розмір ІЧ детектора 160×120, матриця фокальної площини Focal-Plane Array (FPA), неохолоджуваний мікроболометр;

- температурна чутливість $\leq 0,1$ °С;
- робочий спектральний діапазон – $7,5 \div 14$ мкм.

Дослідження проводилося для металевої поверхні із покриттям. Використовувалося постійне джерело підігріву та забезпечувалася підтримка умовно стабільного значення температури поверхні у проміжку часу, необхідному для проведення дослідження без та з використанням фільтрів.

Вхідні параметри дослідження залишили за замовчуванням ($\varepsilon = 0,95$; $\tau = 1$; $T_f = 22$ °С), оскільки їх вплив нівелюється при порівнянні значень вихідних сигналів ПВ при обох вимірюваннях.

Приклади отриманих термограм подано на рисунку 4.6.

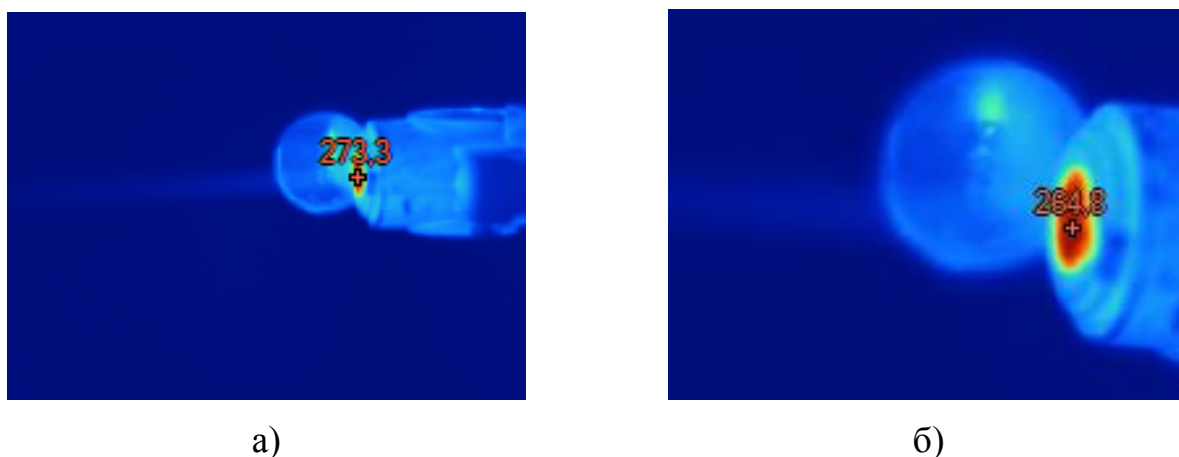
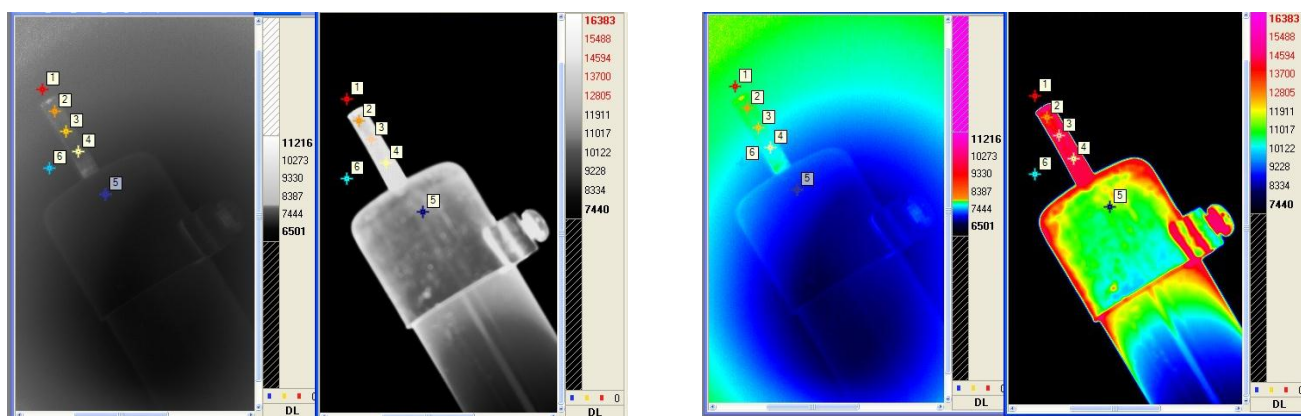


Рисунок 4.6 – Термограми металевої поверхні: а) – без фільтра;
б) з використанням спектрального фільтра на $8 \div 11$ мкм

Для аналізування результатів тепловізійного дослідження проведено моделювання вихідних сигналів ПВ тепловізора без та з використанням вказаного фільтра. При моделюванні припускалося, що точкове значення температури поверхні металевої пластини, отримане на термограмі без використання фільтра є дійсним значенням.

У результаті проведених розрахунків обчислили відхилення від значення температури за умови відповідності значень обох сигналів, – воно дорівнює $86,4478$ °С, тобто складає понад 15 % від дійсного значення.

Ще один приклад результатів тепловізійного дослідження за принципом «смуга в смузі» подано на рисунку 4.7. Ліва частина зображень а) та б) – термограми, отримані тепловізором з використанням фільтра, а права частина – без використання фільтра. Зміна відтінків, що відповідають визначеному діапазону температур, також підтверджує істотну відмінність значень температури, отриманих у різних спектральних діапазонах.



а)

б)

Рисунок 4.7 – Термограми металевої поверхні:

а) – чорно-біла палітра; б) кольорова палітра

Таким чином, експериментальні дослідження використання фільтрів при ВТ тепловізором та результати моделювання підтвердили можливість використання фільтрів при реалізації ВТ та ГТ за ІЧВ поверхні об'єкта дослідження в умовах експлуатації за принципом «смуга в смузі».

4.3 Формування методики розрахунку тепловтрат будинку за результатами тепловізійного дослідження

У результаті проведення експериментальних досліджень та теоретичного аналізу ефективності використання тепловізійного методу при визначенні тепловтрат будівель розроблено методику розрахунку тепловтрат будівлі та їх грошової оцінки [136].

Методика розроблена для вирішення питань економії енергоресурсів, визначення енергоефективності та підвищення теплового захисту будівель та може застосовуватися при проведенні тепловізійних досліджень теплоізоляційного шару всередині та назовні будівлі. Це дозволить, насамперед:

- віднести будівлю до того чи іншого класу енергетичної ефективності в рамках розробки її енергетичного паспорту (за результатами екстраполяції результатів поточного огляду на весь період нагріву [137]);

- провести розрахунок теплотехнічних характеристик будівлі та перевірити їх на відповідність діючим будівельним та санітарним нормам;

- перевірити якість роботи підрядних організацій із будівництва, модернізації, реконструкції чи ремонту будівлі;

- виявити містки холоду, місця пошкодження чи відсутності теплоізоляційного шару, інфільтрації повітря, невідповідності конструктивного шару проектній документації, накопичення вологи тощо, що власне і є причинами зростання втрат теплоти, та розробити рекомендації щодо їх усунення.

Загалом результати тепловізійного дослідження теплоізоляційного шару будівлі є підтвердженням його якості в рамках відповідності встановленим вимогам [138].

Положення будівельних нормативних документів щодо теплових характеристик будівлі мають використовуватися при проектуванні, будівництві, реконструкції й капітальному ремонті (термомодернізації), при складанні енергетичного паспорту, визначенні витрат паливно-енергетичних ресурсів для опалення будинків розрахунково-аналітичним методом, проведенні енергетичного обстеження будівель тощо. При цьому враховується, що конструкції сучасних багатошарових огорожень характеризуються розподілом функцій між окремими матеріальними шарами. У загальному випадку огорожувальна конструкція складається з конструктивного (несучого шару), теплоізоляційного, а також паро- або гідроізоляційних, внутрішнього і

зовнішнього фактурних шарів. Відносно режиму теплопередачі основними є конструктивний і теплоізоляційний шари. Конструктивним зазвичай є шар зі щільного матеріалу, що відповідно володіє значною теплопровідністю і низькою проникністю для водяної пари і повітря. Матеріал теплоізоляційного шару пористий, рихлий, а значить із низькою теплопровідністю та добре пропускає водяну пару і повітря [139]. Тому пошкодження або наявність неякісного теплоізоляційного шару істотно відображається на величині втрат теплоти із поверхні огорожувальних конструкцій будівлі.

В ідеальних умовах кількість теплоти, що має споживатись будівлею, а відповідно і кількість теплоти, що втрачається нею, залежить від теплотехнічних якостей огорожувальних конструкцій та від температури зовнішнього повітря. Фактично ці величини залежать не лише від згаданих вище факторів, які відносяться до основних, а і від другорядних: швидкості вітру, роботи вентиляційних систем, недосконалості засобів генерації та розподілу теплоти тощо.

Нормативне споживання теплоти визначається шляхом проведення розрахунків за діючими методиками, передбаченими чинним законодавством. Найдоцільніше використовувати методики, представлені у ДБН В.2.6-31:2006 «Теплова ізоляція будівель» та ДСТУ Н Б А.2.2-5:2007 «Настанова з розробки енергетичного паспорта». Проте не слід забувати, що вони опираються на розрахункове визначення питомих тепловитрат на опалення будинку, що часто ототожнюють із порядком розрахунку теплових втрат будинку. Ці поняття варто чітко розмежовувати.

Згідно з пунктом 5.3 ДСТУ Н Б А.2.2-5:2007 визначаються загальні тепловтрати будинку, що включають, окрім тепловтрат через огорожувальні конструкції (тобто через теплоізоляційну оболонку будинку), ще і тепловтрати за рахунок інфільтрації та вентиляції. Згідно даного стандарту порядок розрахунку наступний.

Загальні тепловтрати будинку Q_k , кВт·год, визначаються за формулою (4.1):

$$Q_k = \aleph_1 \cdot K_b \cdot D_d \cdot F_{\Sigma}, \quad (4.1)$$

де $\aleph_1=0,024$ – розмірний коефіцієнт;

D_d – кількість градусо-днів опалювального періоду, що нормативно визначаються залежно від температурної зони експлуатації;

F_{Σ} – загальна площа внутрішньої поверхні зовнішніх огорожувальних конструкцій, м²;

K_b – загальний коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційної оболонки будинку, Вт/(м²·К).

При цьому загальний коефіцієнт теплопередачі є сумою приведенного коефіцієнта теплопередачі теплоізоляційної оболонки будинку та умовного коефіцієнта теплопередачі, що враховує тепловтрати за рахунок інфільтрації та вентиляції.

У свою чергу приведений коефіцієнт теплопередачі теплоізоляційної оболонки будинку залежить від орієнтації огорожень за сторонами світу, площі відповідних конструкцій, їх приведених опорів теплопередачі та загальної площі поверхонь будівлі.

У даному стандарті також передбачене визначення опору теплопередачі для нетипових огорожувальних конструкцій, але до їх переліку відносять лише теплі горища, техпідпілля та засклені лоджії і балкони, а порядок визначення величини опору теплопередачі зведений до корегування нормативних або мінімально допустимих значень для відповідної поверхні. Такий порядок не підходить для поверхонь із невідомими властивостями або дефектами. Тобто виникає проблема визначення втрат теплоти для конструкції, про властивості яких ми не маємо інформації.

Втрати теплоти через огорожувальні конструкції приміщень будівлі визначаються згідно додатку 9 СНіП 2.04.05-91 «Отопление, вентиляция и кондиционирование».

Порядок, передбачений у цих нормах та правилах, при розрахунках опирається на значення опору теплопередачі, що нормативно визначений згідно ДБН В.2.6-31. Основною формулою при розрахунку вважається наступна:

$$Q = A \cdot (T_{cal.} - T_{ext}) \cdot (1 + \sum \beta) \cdot n / R, \quad (4.2)$$

де A – розрахункова площа огорожувальних конструкцій, м²;

R – опір теплопередачі огорожувальної конструкції, м²·К/Вт (приведений згідно СНіП 23-02-2003 та окремо для підлог на ґрунті);

$T_{cal.}$ – розрахункова температура повітря, К;

T_{ext} – розрахункова температура зовнішнього повітря для холодного періоду року при розрахунку втрат теплоти через зовнішні огороження або температура повітря більш холодного приміщення – при розрахунку втрат теплоти через внутрішні огороження, К;

β – додаткові втрати теплоти у частках від основних втрат;

n – коефіцієнт, що визначається залежно від положення зовнішньої поверхні огорожувальної конструкції відносно зовнішнього повітря (згідно СНіП 23-02-2003).

При цьому зазначається, що втрати теплоти через огорожувальні конструкції виробничих приміщень зі значними надлишками теплоти доцільно розраховувати із врахуванням променевого теплообміну між джерелом теплоти та конструкцією, тобто ще більше розширити розрахунки.

Дані методики оптимально задовольняють умови складного теплообміну, адже враховують в рамках використання приведенного та умовного коефіцієнтів теплопередачі всі три види передачі теплоти, а саме: кондукцію (через теплопровідність матеріалу), конвекцію (через теплопередачу) та випромінювання (через тепловіддачу). Таким чином, за умови наявності всіх невідомих у формулах такі алгоритми дають можливість визначити базове

значення тепловтрат через огорожувальні конструкції для конкретного приміщення та будівлі загалом.

Зрозуміло, що подібного роду розрахунки можна запрограмувати у вигляді електронних таблиць Excel чи навіть програмного продукту, наприклад, калькулятора.

Негативним моментом використання алгоритмів, запропонованих у даних нормативних документах, є наближеність розрахунків (наприклад, у результаті неоднорідності поверхні огорожувальної конструкції) та посилання на табличні значення більшості величин, які можуть істотно різнитися від реальних у результаті експлуатації будинку, впливу кліматичних умов, проведення ремонтних робіт тощо. Окрім того, громіздкість розрахунків та потреба в одночасній доступності великої кількості нормативних документів збільшують витрати часу на їх проведення, відповідно і собівартість такої роботи, а також спричиняють зростання суб'єктивної складової похибки проведених розрахунків.

Тому пропонуємо розширити можливості нормативних методик методикою розрахунку втрат теплоти будівлі за результатами тепловізійного дослідження.

Із формул нормативних документів стає зрозумілим, що величина теплового потоку, що проходить через матеріал конструкції, пропорційна різниці температур і обернено пропорційно товщині матеріалу. При цьому різні матеріали при однаковій товщині і однакових різницях температур можуть пропускати різну кількість теплоти. Ця відмінність вказує на коефіцієнт теплопровідності даного матеріалу, а відповідно і значення опору теплопередачі. А приведений опір теплопередачі враховує ще й умови теплообміну з навколишнім середовищем в рамках випромінення через коефіцієнт тепловіддачі.

Відповідно тепловий потік через багат шарову огорожувальну конструкцію прямо пропорційний різниці температур на межах конструкції та обернено пропорційний сумі приведених термічних опорів цих шарів.

Згідно [140] одномірне температурне поле конструкції можна визначити достатньо просто. Його теплозахисні властивості визначаються приведеним опором теплопередачі конструкції R_c , що дорівнює сумі опорів теплопровідності окремих матеріальних шарів $\sum R_i$, та променевого теплообміну на внутрішній $R_{inn.}$ та зовнішній $R_{ext.}$ поверхнях:

$$R_c = R_{inn.} + \sum R_i + R_{ext.} . \quad (4.3)$$

При цьому розподіл температури в огорожувальній конструкції визначається так:

$$T_x = T_{inn.} - \frac{R_{inn.-x}}{R_c} (T_{inn.} - T_{ext.}) , \quad (4.4)$$

де T_x – температура у довільному розрізі конструкції (включаючи поверхневий шар), К;

$R_{inn.-x}$ – приведений опір теплопередачі від внутрішньої поверхні до місця розрізу (або приведений опір теплопередачі від внутрішньої поверхні до дефектної ділянки, властивості якої до появи відхилення прирівнювалися до властивостей базової ділянки), $m^2 \cdot K/Wt$;

$T_{inn.}$ та $T_{ext.}$ – температура зовнішнього та внутрішнього повітря біля досліджуваних поверхонь, К.

Звідси випливає, що знаючи опір базової конструкції, ми маємо змогу за зміною температур розрахувати величину приведенного опору теплопередачі дефектної ділянки та визначити значення її теплового потоку.

При цьому не варто забувати, що значення температури поверхні базової чи дефектної ділянок потрібно брати усереднене (відповідно усередненим буде і значення опору теплопередачі), тобто:

$$T_{av.} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{n}, \quad (4.5)$$

де T_i – температура однорідної частини ділянки, К; n – кількість однорідних частин ділянки.

У разі відхилення більше як на 1 К доцільно розбивати такі ділянки на дрібніші з більш однорідним розподілом температури.

Оскільки для базової ділянки:

$$q_b(T) = \frac{T_{inn.} - T_{ext.}}{R_c^b}, \quad (4.6)$$

де $q_b(T)$ – густина теплового потоку крізь одиницю площі базової ділянки, Вт/м², то відповідно для дефектної ділянки з відомою температурою поверхні густина теплового потоку для одиничної ділянки складе:

$$q_d(T) = \frac{(T_{inn.} - T_{ext.})^2}{(T_{inn.} - T_x) \cdot R_c^b}. \quad (4.7)$$

Тобто скориставшись результатами тепловізійного дослідження, а саме розподілом температури по поверхні, температурами внутрішнього та зовнішнього повітря, документацією про теплотехнічні властивості конструкції та значеннями із стандартів ми можемо визначити розмір приведенного опору в конкретній точці дефектної ділянки, а отже і розмір конкретних втрат теплоти за одиницю часу.

Відповідно:

$$Q_d(T) = q_d(T) \cdot G_d, \quad (4.8)$$

де $Q_d(T)$ – тепловий потік з дефектної ділянки, Вт;

G_d – площа дефектної ділянки, визначена за допомогою підрахунку пікселів на термограмі та масштабуванням їх розмірів до натурних, м².

Якщо нас цікавить не величина втрат теплоти, а її приріст порівняно із базовою ділянкою, що практичніше при розрахунку грошових втрат, то доцільніше застосовувати наступний алгоритм.

Спочатку скористаємося значенням відносного опору теплопередачі, запропонованим у ГОСТ Р 54852-2011 «Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций»:

$$r = 1 + \frac{(T_{ext.}^c - T_{ext.}^b)}{T_{ext.} - T_{ext.}^c - (T_{ext.}^c - T_{ext.}^b)}, \quad (4.9)$$

де $T_{ext.}^c$ – температура зовнішньої поверхні досліджуваної ділянки, К;

$T_{ext.}^b$ – температура зовнішньої поверхні базової ділянки, К.

Звідси, зміна густини теплового потоку:

$$\Delta q(T) = \frac{(T_{inn.} - T_{ext.}^c) \cdot (r - 1)}{R_c^b}. \quad (4.10)$$

Відповідно додаткові втрати теплоти у зв'язку зі зміною теплотехнічних властивостей досліджуваної конструкції становлять:

$$\Delta Q(T) = \Delta q(T) \cdot G_d. \quad (4.11)$$

Таким чином, у будь-якому випадку для визначення втрат теплоти ми повинні мати відомості про будову огорожувальної конструкції (базової ділянки) для визначення приведенного опору теплопередачі конструкції.

Ефективність цих двох алгоритмів також виправдовує себе у разі моделювання потенційних теплотехнічних характеристик будівлі за результатами виконання рекомендацій щодо термомодернізації будівлі, коли приведений опір теплопередачі будівлі є наперед заданим.

Зрозуміло, що на практиці в реальних умовах операторам доводиться працювати із будівлями тривалого строку експлуатації, для яких внаслідок різних факторів відбувається зміна теплотехнічних характеристик або дані про ці характеристики відсутні. У такому разі при розрахунку втрат теплоти ми повинні обмежитися лише даними термограми та результатами обліку умов проведення дослідження для визначення приведених опорів базової та дефектної ділянок.

Проаналізувавши рівняння формули (4.4), приходимо до висновку, що цього можна досягти лише за рахунок побудови системи із двох рівнянь з двома невідомими $R_{inn.-x}$ та R_c наступного вигляду:

$$\begin{cases} T_x^1 = T_{inn.}^1 - \frac{R_{inn.-x}}{R_c^b} (T_{inn.}^1 - T_{ext.}^1) \\ T_x^2 = T_{inn.}^2 - \frac{R_{inn.-x}}{R_c^b} (T_{inn.}^2 - T_{ext.}^2) \end{cases} \quad (4.12)$$

Для отримання різних значень величин температури у системі можливими є три варіанти:

- проведення тепловізійного дослідження у різні часові проміжки для стаціонарних режимів теплопередачі із різними значеннями температур;
- у рамках одного тепловізійного дослідження наявність на поверхні дефектної ділянки місць із різними значеннями поверхневої та приповерхневих температур (тобто зовнішньої та/або внутрішньої температури повітря,

наприклад, внаслідок близького розміщення до віконних чи дверних прорізів, розміщення на різних за орієнтацією щодо сторін світу стінах тощо) із наступним її поділом на частини для проведення розрахунків втрат теплоти для кожної із них в заданих умовах;

- у рамках одного тепловізійного дослідження наявність декількох дефектних ділянок із різними значеннями температур, але прийнятих як однакові за теплотехнічними характеристиками (із наступним окремим розрахунком втрат теплоти для кожної із ділянок в заданих умовах).

Вибір варіанту залежить від інформації на термограмах будівлі та можливості проведення повторного тепловізійного дослідження, адже кожен із варіантів вносить свій бюджет непевності у результуючі величини приведених опорів теплопередачі.

Знаючи величини приведених опорів теплопередачі, за формулою (4.6) можемо визначити густину теплового потоку як для базової, так і для дефектної ділянок, а їх теплові потоки згідно формули (4.8). Розмір додаткових втрат теплоти внаслідок наявності дефектної ділянки визначається за формулою:

$$\Delta Q(T) = \frac{(T_{inn.} - T_{ext.}) \cdot (R_c^b - R_{inn.-x})}{R_c^b \cdot R_{inn.-x}} \cdot G_d. \quad (4.13)$$

Проте для приблизного визначення зростання втрат теплоти внаслідок наявності дефектної ділянки можна обмежитися лише інформацією про випромінювальну складову теплового потоку.

Відомо, що при нормальній теплоізоляції до 70% втрат теплоти відбуваються через теплове випромінювання, а при температурах 4-100 °C становлять 50-80% загального теплового потоку [141]. Цієї інформації достатньо для приблизного кількісного оцінювання тепловтрат.

Оскільки наведені вище алгоритми розрахунків потребували фактично точкових значень температури досліджуваних поверхонь та знання температури зовнішнього та внутрішнього повітря, то вони не могли у повній

мірі використати перевагу застосування тепловізора, який дозволяє із високою точністю вимірювати саме різницю температур (ГТ).

Наступний алгоритм визначення втрат теплоти за випроміненням дозволяє обмежитися мінімальною кількістю вихідних величин, значення яких забезпечується виключно тепловізором та його технічною документацією.

Оскільки потік теплоти $Q(T)$ враховуватиме лише втрату теплоти за випроміненням, тоді:

$$Q(T) = L(\lambda, T). \quad (4.14)$$

При цьому згідно [18]:

$$L(\lambda, T) = M(\lambda, T) \cdot G, \quad (4.15)$$

де G – площа випромінюваної поверхні, m^2 ; $M(\lambda, T)$ – спектральна густина випромінення, Wt/m^2 :

$$M(\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1} d\lambda. \quad (4.16)$$

Значення $M(\lambda, T)$, що надходить на ОПС тепловізора корегується на значення КВ досліджуваної поверхні, КППС та значення ФВ сторонніх об'єктів згідно методу та методики проведення вимірювань, запропонованих у розділі 3.

Функція перетворення тепловізора згідно ASTM E-1213-92 «Standard Test Method for minimum Resolvable Temperature Difference for Thermal Imaging Systems» та [142]:

$$U_i(T) = k_1 \cdot M_i(\lambda, T) + k_2 = C \cdot \exp\left(\frac{c_2}{AT_i + B}\right), \quad (4.17)$$

де $U_i(T)$ – вихідний сигнал окремого приймача матриці тепловізора;

k_1 та k_2 – коефіцієнти перетворення тепловізора;

T_i – значення температури у досліджуваній точці (у нашому випадку тотожне $T_{av.}$), К.

При цьому коефіцієнти формули Сакума-Хатторі-Віна II беруться в технічній документації приладу або ж уточнюються за результатами калібрування.

Відповідно:

$$\begin{aligned} \Delta Q(T) = Q_d(T_2) - Q_b(T_1) &= (M_d(\lambda, T_2) - M_b(\lambda, T_1)) \cdot G = \\ &= \frac{U_d(T_2) - U_b(T_1)}{k_1} \cdot G, \end{aligned} \quad (4.18)$$

де вихідним сигналам дефектної $U_d(T_2)$ та базової $U_b(T_1)$ ділянок відповідають конкретні значення їх температури T_2 та T_1 .

При цьому зрозуміло, що $\Delta Q(T)$ за випроміненням менше $Q(T)$ сумарного теплового потоку.

Відповідно грошовий еквівалент додаткових втрат теплоти визначаємо наступним чином:

$$W = \frac{\Delta Q(T)}{1000} \cdot t \cdot P, \quad (4.19)$$

де W – сума грошей, оплачена за надлишковий тепловий потік, грн;

t – час, для якого проводять розрахунок втрат теплоти, год.;

P – вартість 1кВт·год енергії, грн/кВт·год (тариф).

Таким чином, дана методика розрахунку тепловтрат будинку за результатами тепловізійного дослідження включає декілька алгоритмів залежно від доступності необхідних вихідних величин та вимог щодо 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.

Також на основі опрацьованих теоретичних засад та результатів проведених експериментальних досліджень розроблено проект стандарту «Методика тепловізійних досліджень будівель» (Додаток И).

4.4 Рекомендації щодо умов і порядку проведення тепловізійних досліджень у медицині

На основі результатів експериментальних досліджень та аналізу літератури [39, 143-152] з врахуванням вимог наказу Міністерства охорони здоров'я України № 340 від 28.11.1997 «Про удосконалення організації служби променевої діагностики та променевої терапії» розроблено загальні рекомендації щодо умов і порядку організації тепловізійних досліджень в медицині:

1. При проведенні тепловізійного дослідження у медицині важливу роль відіграє вміння оперувати знаннями щодо особливостей кровопостачання різних ділянок тіла людини та типового РТ поверхні людського тіла, тому для підвищення вірогідності медичного тепловізійного дослідження доцільним є сертифікація персоналу, який проводить це дослідження. При цьому вимоги щодо знань персоналу мають стосуватися не лише медичної сфери та технічних характеристик тепловізора, але й фізичних засад ВТ за ІЧВ, що дозволяє коректно аналізувати медичні термограми.

2. Для збільшення точності тепловізійних досліджень у медицині необхідно забезпечити стабільний психо-фізіологічний стан людини,

мінімізувати вплив на поверхню шкіри місця дослідження, обмежити дію зовнішніх джерел тепла.

3. Медичний кабінет, де проводяться тепловізійні дослідження має бути обладнаний згідно таких вимог: закрите приміщення з можливістю підтримки постійного значення температури ($25,0 \pm 2,0$) °C та вологості повітря (60 ± 5) %, забезпечення екранування для уникнення впливу випромінення Сонця та інших сторонніх джерел (темне приміщення), відсутність протягів.

4. Підготовка до тепловізійного дослідження передбачає виключення протягом 10 днів до проведення процедури прийому гормональних препаратів та ліків, що впливають на особливості кровообігу, а також нанесення мазей чи кремів на досліджувану поверхню. Рекомендовано не вживати алкогольні напої та наркотичні речовини за 3-5 днів до проведення дослідження. Обмежити прийом їжі за 2-3 години. Не проводити фізичні процедури протягом доби. Достовірність результатів дослідження підтверджується за умови проведення дослідження на ділянках із товщиною жирової тканини менше 4 см.

5. При тепловізійному дослідженні молочних залоз рекомендується не носити бюстгальтер протягом доби до проведення дослідження та проводити дослідження під час циклу овуляції.

6. Час термоадаптації повинен складати не менше 10 хв, за умови різниці температур ззовні та всередині приміщення більше 10 °C – не менше 30 хв. Для новонароджених та людей похилого віку період термоадаптації зростає на 5 хв.

7. Доцільно проводити дослідження поверхні шкіри без одягу. Якщо це неможливо, то одяг повинен бути вільним, без прилягаючих швів та резинок.

8. Дослідження доцільно проводити у декількох проекціях та під різними кутами, щоб переконатися у присутності термоаномалії на всіх термограмах для її визнання відхиленням від норми.

4.5 Розробка програми навчання персоналу в галузі неруйнівного контролю по тепловому методу

Сертифікація фахівців в галузі НК повинна проводитися на I, II і III (найвищий) кваліфікаційних рівнях у відповідності з вимогами стандартів ISO/IEC 17024:2012 «Загальні вимоги до органів, що здійснюють сертифікацію персоналу», ISO 9712:2012 «Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу», ISO 18436-7:2014 «Моніторинг стану та діагностика станків. Вимоги до кваліфікації й оцінки персоналу» та EN 4179:2009 «Авіаційно-космічна серія – атестація і сертифікація фахівців з неруйнівного контролю» у добровільній сфері сертифікації.

Сертифікацію персоналу з НК з метою підтвердження кваліфікаційного рівня фахівців, забезпечення достовірності й об'єктивності результатів НК, здійснюють органи із сертифікації персоналу (ОСП), які акредитовані Національним агентством з акредитації України (НААУ) та мають відповідні повноваження.

В Україні сертифікація фахівців з НК проводиться на I-й та II-й рівні кваліфікації з метою їх подальшої сертифікації відповідно до вимог НПАОП 0.00-1.63-13 «Правила сертифікації фахівців з неруйнівного контролю» через ОСП в галузі НК.

У результаті роботи над дослідженням було розроблено програму підготовки персоналу з НК по тепловому методу з використанням тепловізійної техніки із врахуванням напрацювань даної роботи та міжнародних нормативних документів, що передбачає навчання для трьох рівнів кваліфікації (Додаток К).

Така програма дозволить персоналу ознайомитися із фізичними основами ВТ та ГТ за ІЧВ, існуючим обладнанням, технологіями та методами проведення вимірювань, особливостями аналізування термограм та складання звітної документації. Також ця програма включає курс практичних занять для закріплення отриманих теоретичних знань [153]. Програма включає окремі курси для персоналу різного рівня кваліфікації.

Висновки до розділу 4

Проведені експериментальні дослідження та моделювання вимірювання температури та визначення розподілу температури поверхні різних об'єктів підтвердили теоретичні напрацювання, отримані в розділах 2 та 3.

Розроблено методику розрахунку тепловтрат за результатами тепловізійного дослідження, що дає змогу кількісно оцінити тепловтрати об'єктів будівництва, а також теплотрас та об'єктів енерго- та теплопостачання, сонячних колекторів тощо, та ініціювати заходи по їх зменшенню або усуненню. На основі запропонованої методики та результатів проведених експериментальних досліджень 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 згідно фізичних засад вимірювання температури та градієнта температури й фізіологічних особливостей організму людини.

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. Вона дозволить зменшити непевність результатів тепловізійних досліджень, яка виникає внаслідок неправильності проведення вимірювань, некоректного аналізу результатів або незастосування методів підвищення точності вимірювань температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням оператором 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 методику 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур / Д.Я. Свет. – М: Наука, 1982. – 296 с.
2. Мисюк Ю.П. Тепловізори як сучасні інтегровані технічні засоби охорони державного кордону / Ю.П. Мисюк // Світлотехніка та Електроенергетика. – 2011. – № 3. – С. 43-49.
3. Коротаев В.В. Основы тепловидения [Электронный ресурс] / В.В. Коротаев, Г.С. Мельников, С.В. Михеев, В.М. Самков, Ю.И. Солдатов. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 122 с. – Режим доступа: <http://oeps.ifmo.ru/uchebn/thermography.pdf>.
4. Грабко В.В. Математическая модель для диагностирования состояния изоляции работающей мощной электрической машины по ее тепловому портрету [Электронный ресурс] / В.В. Грабко, В.В. Грабко // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 1. – Режим доступа: <http://praci.vntu.edu.ua/article/download/1316/763>.
5. ДСТУ 3518-97. Термометрія. Терміни та визначення. – Введ. 24.03.97. – К.: Держстандарт України, 1997. – 95 с.
6. Калинин М.И. Постоянная Больцмана, энергетический смысл температуры и термодинамическая необратимость / М.И. Калинин, С.А. Кононогов // Измерительная техника: научн.-техн. журн. / Комитет Рос. Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации. – 2005. – № 7. – С. 5-8.
7. Брянский Л.Н. Краткий справочник метролога / Л.Н. Брянский, А.С. Дойников. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 79 с.
8. Енциклопедія термометрії / Я.Т. Луцик, Л.К. Буняк, Ю.К. Рудавський, Б.І. Стадник. – Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2003. – 428с.

9. Гордов А.Н. Основы пирометрии / А.Н. Гордов. – М.: Металлургия, 1971. – 446 с.
10. Чепурний М. М. Тепломасообмін в прикладах і задачах: навчальний посібник / М.М. Чепурний, Н.В. Резидент. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 128 с.
11. Коэффициент излучения (степень черноты) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://temperatures.ru/pages/koefficient_izlucheniya. – Назва з екрана.
12. Классификация тепловизоров и получение ими изображения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://teplovizo.ru/klassifikaciya-teplovizorov.htm>. – Назва з екрана.
13. Учебник основы термографии и тепловидения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://baltech.kz/catalog.php?catalog=164>. – Назва з екрана.
14. Minkina W. Infrared Thermography – Errors and Uncertainties / W. Minkina, S. Dudzik. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2009. – 200 p.
15. Гоц Н.Є. Підвищення точності вимірювання температури за випроміненням поверхні обертових об'єктів: дис. канд. техн. наук: 05.11.04: захищена 28.11.2003: затв. 11.02.2004 / Гоц Наталія Євгенівна; Національний ун-т «Львівська політехніка». – Львів, 2003. – 174 с.
16. Стороженко В.А. Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом / В.А. Стороженко, В.П. Вавилов, А.Д. Волчек. – К.: Техника, 1988. – 127 с.
17. Криксунов Л.З. Тепловизоры. Справочник / Л.З. Криксунов, Г.А. Падалко. – К.: Техника, 1987. – 164 с.
18. Линевег Ф. Измерения температуры в технике: справочник / Ф. Линевег. – М.: Металлургия, 1980. – 544 с.
19. ГОСТ Р 8.619-2006 Государственная система обеспечения единства измерений. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки. – Введ. 2007-01-01. – М.: Стандартинформ, 2006. – 19 с.

20. Копп В.Я. Анализ внедрения инфракрасной термографии в диагностике высоковольтного оборудования / В.Я. Копп, Н.И. Кузнецова, Н.В. Серова // Збірник наукових праць СНУЯЕтаП Загальнонаукові і спеціальні дослідження. – 2009. – № 1 (29). – С. 106-113.

21. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер. с фр. / Ж. Госсорг. – М.: Мир, 1988. – 399 с.

22. Справочник по приборам инфракрасной техники / Под ред. Л.З. Криксунова. – К.: Техника, 1980. – 416 с.

23. Назаренко Л.А. Приймачі інфрачервоного випромінення: розвиток і перспективи / Л.А. Назаренко, Н.Є. Гоц // Сучасні проблеми світлотехніки: матер. III Міжнар. наук.-техн. конф., Харків, 2009 р. – Харків: 2009. – С. 94-96.

24. Rogalski A. Infrared devices and techniques / A. Rogalski, K. Chrzanowski // Opto-electronics review. – 2002. – № 10 (2). – P.111–136.

25. Rogalski A. History of infrared detectors / A. Rogalski // Opto-electronics review. – 2012. – Vol. 20. – №3. – P. 279-308.

26. Базалеев Н.И. Тепловизионная акустотермографическая дефектоскопия конструкционных материалов / Н.И. Базалеев, В.В. Брюховецкий, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко // Вопросы атомной науки и техники. – 2011. – №2 (Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (97)). – С. 178-185.

27. Будадин О.Н. Тепловой метод неразрушающего контроля и диагностики технического состояния материалов, изделий и конструкций [Электронный ресурс] / О.Н. Будадин. – Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/teplovoi-metod-nerazrushayushchego-kontrolya-i-diaagnostiki-tekhnicheskogo-sostoyaniya-materiz>.

28. 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.

29. Применение тепловизоров в горнодобывающей промышленности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pergam.ru/articles/primenenie-teplovizorov-gornaya-promishlennost.htm>. – Назва з екрана.

30. Промышленные тепловизоры и сферы их применения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://fortstroi.com.ua/stroitelstvo/stati/item/330-promyshlennye-teplovizory-i-sfery-ikh-primeneniya>. – Назва з екрана.

31. Тепловизоры для промышленной термографии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ecoinstrument.ru/upload/iblock/37d/Heat_vision_industry_2011.pdf. – Назва з екрана.

32. 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, Україна. – Харків: ТОВ «Видавництво «Форт», 2015. – С. 37-39.

33. Гоц Н.Є. Інформаційні аспекти застосування тепловізійної техніки в медицині / Н.Є. Гоц, Ю.М. Приймак // Інформаційні технології і автоматизація – 2014: збірник доповідей VII Міжнар. наук.-практ. конф., 16-17 жовтня 2014 р., м. Одеса, Україна. – Одеса: ОНАХТ, 2014. – с. 16-18.

34. Ковальчук И.С. Возможности дистанционной инфракрасной термографии в диагностике заболеваний молочных желез (доброкачественные изменения) / И.С. Ковальчук, В.И. Дунаевский, Е.Ф. Венгер, В.И. Котовский, С.С. Назарчук // Український медичний часопис. – № 3 (95). – V/VI 2013 г. – С. 165-169.

35. Термографія у ветеринарній діагностиці [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://xray.com.ua/animals.php?act=kt&acti=termograf>. – Назва з екрана.

36. Термография в медицине [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://doktorland.ru/termografiya.html>. – Назва з екрана.

37. Ткаченко Ю.А. Клиническая термография (обзор основных возможностей) / Ю.А. Ткаченко, М.В. Голованова, А.М. Овечкин. – Ростов-на-Дону: 1999. – 274 с.

38. Термография [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://zdravie.com.ua/category/staroe/encyclopaedia/28525/29310/29311/29312/29428/>. – Назва з екрана.

39. Дехтярев Ю.П. Место и роль дистанционной инфракрасной термографии среди современных диагностических методов / Ю.П. Дехтярев, В.И. Нечипорук, С.А. Мироненко и др. // Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». – 2010. – № 2. – С. 192-196.

40. Шушарин А.Г. Медицинское тепловидение – современные возможности метода [Электронный ресурс] / А.Г. Шушарин, В.В. Морозов, М.П. Половинка // Современные проблемы науки и образования: Электронный научный журнал. – 2011. – № 4. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/98-4726>.

41. Нестеров В.К. Современная медицинская термография в онкологии [Электронный ресурс] / В.К. Нестеров, Н.В. Бровка // Международная конференция «Прикладная оптика 2012». – Режим доступа: <http://www.oopros.org/maket2012/part4/4.11.pdf>.

42. Виноградов В.И. Некоторые аспекты применения термографии при реабилитации пациентов с нарушением функций опорно-двигательной и нервной систем / В.И. Виноградов, И.С. Веретенков, В.Н. Слезко и др. // Функциональная диагностика. – 2005. – №3. – С. 72–78.

43. Заяц Г.А. Медицинское тепловидение – современный метод функциональной диагностики / Г.А. Заяц, В.Т. Коваль // Здоровье. Медицинская экология. Наука. – 2010. – Т. 43. – №3. – С. 27–33.

44. Термография в медицине. Положительные стороны [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dockozlovsky.ru/meditsinskaya-termografiya/medizinskaia-termografiya-termografiya-v-meditsine-polozhitelnye-storonyi>. – Назва з екрана.

45. Бур'янов О.А. Методика та результати термографічного дослідження кисті в системі ранньої діагностики псоріатичного артриту / О.А. Бур'янов, А.В. Самохін, В.П. Кваша, В.В. Котюк // Літопис травматології та ортопедії. – № 1-2. – 2009. – С. 115-119.
46. Madura H. Influence of sun radiation on results of non-contact temperature measurements in far infrared range / H. Madura, M. Kołodziejczyk // Opto-Electronics Review. – 2005. – № 13. – P. 253–257.
47. Minkina W. Termografia w podczerwieni – błędy i niepewności / W. Minkina, S. Dudzik // Pomiar Automatyka Kontrola. – Vol. 55. – № 11. – S. 868-873.
48. Minkina W. Infrared Thermography – Errors and Uncertainties / W. Minkina, S. Dudzik. – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2009. – 200 p.
49. Поскачей А.А. Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью / А.А.Поскачей, Л.А.Чарихов. – М.: Металлургия. – 1978. – 200 с.
50. Гоц Н. Контроль температуры в установках реактивного ионно-плазмового напыления з використанням термометра випромінення / Н. Гоц, Ю. Кривенчук // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2011. – № 72. – С. 45-50.
51. Машков Ю.А. Многоспектральные методы коррекции излучательных характеристик поверхностей: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03 / Машков Юрий Александрович. – Санкт-Петербург, 1998. – 160 с.: ил. РГБ ОД, 61 99-1/365-5.
52. Излучательные свойства твердых материалов / Под ред. А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 470 с.
53. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена / В.А. Осипова. – М.: Энергия, 1969. – 319 с.
54. Ранцевич В.Б. Пирометрия при посторонних источниках излучения / В.Б. Ранцевич. – Мн.: Наука и техника, 1989. – 104 с.
55. Фаворский О.Н. Вопросы теплообмена в космосе / О.Н. Фаворский, Я.С. Канадер. – М.: Высшая школа, 1972. – 279 с.

56. Ранцевич В.Б. Расчет влияния излучения посторонних источников на результаты измерений температуры пирометрами различных типов / В.Б. Ранцевич // Физические свойства металлов и проблемы неразрушающего контроля. – Мн.: Наука и техника. – 1978. – С. 131-145.

57. Ранцевич В.Б. Яркость и степень черноты поверхности объектов с учетом отраженного излучения посторонних тепловых источников / В.Б. Ранцевич // Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. – 1980. – № 4. – С. 48-61.

58. ДСТУ 3194:2005 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань температури. Безконтактні засоби вимірювання температури. – Введ. 28.02.2005. – К.: Держстандарт України, 2005. – 15 с.

59. ГОСТ 8.395-80 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования. – Введ. 01.07.1981. – М.: Изд-во стандартов, 2008. – 8 с.

60. 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, Україна. – Славське, 2015. – С. 133-134. – 1 CD-R. – Загл. з етикетки диска.

61. Інформаційно-вимірювальна техніка: у 2 т. / М.М. Дорожовець [та ін.]. – Львів: НУ «Львівська політехніка», 2005. – Т. 1. – 455 с.

62. Засименко В.М. Основи теорії планування експерименту / В.М. Засименко. – Львів: ДУ «Львівська політехніка», 2000. – с. 204.

63. 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, Україна. – Херсон: ХНТУ, 2016. – С. 127-129.

64. Аналитический метод исследования температурного поля и методические погрешности эталонного радиометра / Назаренко Л.А. [и др.] // Украинский метрологический журнал. – 1998. – № 1. – с.32-47.

65. Гордов А.Н. Основы температурных измерений / А.Н. Гордов, О.М. Жагулло, А.Г. Иванова. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 304 с.

66. Ермолов И.Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества / И.Н. Ермолов, Ю.Я. Останин. – М.: Высшая школа, 1983. – 367с.

67. 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, Україна. – Славське, 2016. – С. 47-48. – 1 CD-R. – Загл. з етикетки диска.

68. Website of ISO [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.iso.org/iso/home.html>.

69. Website of IEC [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.iec.ch/index.htm>. – Назва з екрана.

70. International recommendation OIML R 141 Edition 2008 (E) Procedure for calibration and verification of the main characteristics of thermographic instruments [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r141-e08.pdf. – Назва з екрана.

71. Website of ASTM [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.astm.org/cis/en/index.html>. – Назва з екрана.

72. ДП «Укрметртестстандарт» Реєстр методичних документів з метрології [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ukrcsm.kiev.ua/index.php/uk/2009-02-05-07-58-31/2009-02-06-11-56-16/101>. – Назва з екрана.

73. 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, Україна. – Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2015. – С. 83-86.

74. Hots N. Analiza czynników składowych błędów pirometrii radiacyjnej / N. Hots, T. Piątkowski // Pomiar. Automatyka. Kontrola. – 2009. – № 11. – P. 874-877.

75. ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). – Geneva: ISO/IEC, 2008. – 120 p.

76. Термінологія аналітичного вимірювання. Вступ до VIM 3 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://metrology.kiev.ua/files/Eurachem%20VIM%20Guide%20ukr2c.pdf>. – Назва з екрана.

77. ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій. – Введ. 2006-12-27. – Київ: Держспоживстандарт України, 2007. – 32 с.

78. Яцук В.О. Методи підвищення точності вимірювань: підручник / В.О. Яцук, П.С. Малачівський. – Львів: Видавництво «Бескід Біт», 2008. – 368с.

79. Васілевський О. Оцінювання стандартної непевності типу В на основі складових адитивної та мультиплікативної похибок / О. Васілевський // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2015. – № 76. – С. 36-42.

80. Богачук В.В. Оцінка комбінованої стандартної невизначеності вимірювань вологості сипких матеріалів / В.В. Богачук, В.В. Кухарчук, С.Ш. Качив, І.К. Говор // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – № 3. – С. 59-66.

81. Володарський Є.Т. Невизначеність (непевність) результатів ВІС / Є.Т. Володарський, Л.О. Кошева, Б.Д. Колпак // Метрологія, стандартизація, сертифікація: матер. наук.-техн. конф. «Системи-2008». – Львів: НДІ «Система». – 2008. – С. 7-9.

82. Мармоза А.Т. Теорія статистики: навч. посібник / А.Т. Мармоза. – К.: Центр навчальної літератури, 2013. – 592 с.
83. Демків І.Б. Вимоги щодо оцінки характеристик похибок (непевностей) вимірювання маси скраплених нафтових газів та їх інтегральних характеристик / І.Б. Демків // Вісник Вінницького інституту. – 2012. – № 6 – С. 14-20.
84. Гоц Н.Є. Аналізування складових непевності результатів вимірювання температури за інфрачервоним випроміненням тепловізійним методом / Н.Є. Гоц, Ю.М. Дзіковська // Метрологія та прилади. – 2016. – №1(57). – С. 48-53.
85. Minkina W. Podstawy pomiarow termowizyjnych / W. Minkina, P. Rutkowski, W. Wild // Pomiarы, automatyka, kontrola: miesiecznik naukowo-techniczny. – 2000. – № 1. – S. 7-14.
86. Харьков-Прибор: Статьи: описание, преимущества и недостатки измерительных приборов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pribor.kharkov.ua/articles>. – Назва з екрана.
87. Российские и межгосударственные стандарты [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://temperatures.ru/pages/rossiiskie_i_mejgosudarstvennye_standarty_page. – Назва з екрана.
88. Noncontact Infrared Temperature Measurement: Products & Accessories [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.raytek.com/Raytek/en-r0/ProductsAndAccessories>. – Назва з екрана.
89. Wiecek B. Termowizja w podczerwieni podstawy i zastosowania / B. Wiecek, G. De Mey. – W: Wydawnictwo PAK, 2011. – S. 372.
90. Козелкин В.В. Основы инфракрасной техники / В.В. Козелкин, И.Ф. Усольцев. – М.: Машиностроение, 1985. – С. 264.
91. Брянский Л.Н. Краткий справочник метролога / Л.Н. Брянский, А.С. Дойников. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 79 с.

92. Болтон Уильям Карманный справочник инженера-метролога. Серия «Карманный справочник» / Уильям Болтон. – М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. – 384 с.

93. Гоц Н.Є. Дослідження впливу шуму приймача випромінення на точність вимірювання температури за випроміненням багатоспектральними методами / Н.Є. Гоц, Т. Пянтковські // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Комп'ютерні науки та інформаційні технології : [зб. наук. пр.]. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львів. політехніка», 2010. – № 686. – С. 290-296.

94. Rogalski A. Infrared detectors: an overview / A. Rogalski // *Infrared Physics & Technology*. – 2002. – № 43. – P. 187-210.

95. Гоц Н.Є. Критерії вибору приймачів інфрачервоного випромінювання для багатоканальної пірометрії / Н.Є. Гоц, Т. Пянтковські // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2011. – № 6. – С. 245-250.

96. Rogalski A. Characteristics and use of infrared detectors [Електронний ресурс] / A. Rogalski. – Режим доступу: <http://www.slac.stanford.edu/grp/arb/tm/arbvol5/AARD460.pdf>. – Назва з екрана.

97. 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.

98. Chrzanowski K. Evaluation of thermal cameras in quality systems according to ISO 9000 or EN45000 standards [Електронний ресурс] / K. Chrzanowski. – Режим доступу: <http://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.421015>.

99. Supplement 1 to EAL-R2: Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration: Examples Publication reference (European Cooperation for Accreditation of Laboratories); EAL-R2-S1. – EAL, 1997. – P. 28.

100. Chrzanowski K. Testing and evaluation of thermal cameras for absolute temperature measurement / K. Chrzanowski, J. Fischer, M. Matyszkiewic / *Optical Engineering*. – 2000. – № 39 (9). – P. 2535-2544.

101. Гоц Н.Є. Вплив проміжного середовища на вимірювання температури за випромінення / Н.Є. Гоц // Метрологія, стандартизація, сертифікація: матер. наук.-техн. конф. «Системи-2008». – Львів: НДІ «Система». – 2008. – С. 103-108.

102. Смирнов В.И. Курс высшей математики: в 5 т. / В.И. Смирнов. – М.: Изд-во «Наука», 1974. – Т.2. – 479 с.

103. Захаров И.П. Теория неопределенности в измерениях / И.П. Захаров, В.Д. Кукуш. – Харьков: КОНСУМ, 2002. – 256 с.

104. EA-4/02 М: 2013 Вираз невизначеності вимірювання при калібруванні [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://naau.org.ua/wp-content/uploads/2015/06/EA-4_02.pdf. – Назва з екрана.

105. Физиология человека: в 3-х томах / Под ред. Р. Шмидта и Г. Тевса. – М.: Мир, 1996. – 713 с.

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

107. 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 Commission of Katowice Branch of Polish Academy of Sciences, 2016. – P. 52-55.

108. Гоц Н.Є. Основи формування методики проведення тепловізійних досліджень / Н.Є. Гоц, Ю.М. 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, Україна. – Львів, 2015. – С. 191.

109. ГОСТ 8.010-99. ГСИ. Методики выполнения измерений. Основные положения. – Введ. 01.05.2002. – К.: Гостстандарт Украины, 2002. – 26 с.

110. 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, Україна. – Вінниця, 2016. – С.128-131.

111. Polakowski H. Wielosektorowy promiennik podczerwieni / H. Polakowski, T. Piątkowski, R. Dulski, K. Firmanty, M. Morawski // Pomiar Automatyka Kontrola. – 2009. – Vol. 55. – № 11. – S. 894-897.

112. Инфракрасное излучение – влияние и применение [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.nazdor.ru/topics/improvement/devices/current/470064/>. – Назва з екрана.

113. Оптика для детекторов и сенсоров [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.tydexoptics.com/ru/products/optics_for_detectors_and_sensors/. – Назва з екрана.

114. Eagle LWIR [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.leonardocompany.com/en/-/eagle_lwir. – Назва з екрана.

115. Asghar M.H. Designing bandpass filters in 8-14 μm range for Si and Ge substrates / M.H. Asghar, M.B. Khan, S. Naseem // Semiconductor Physics. Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2004. – V. 7. – № 4. – P. 355-359.

116. Боженко В.І. Удосконалення методів та засобів формування зображення тепловізійною системою: автореф. дис. на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.12.17 «Радіотехнічні та телевізійні системи» / Боженко В.І.; Нац. ун-т «Львівська політехніка». – Л., 2011. – 20 с.

117. Annual Book of ASTM Standards. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005. – Vol. 14.03. – P. 490-491.

118. Liebmann Frank E. Infrared Calibration Development at Fluke Corporation Hart Scientific Division [Електронний ресурс] / Frank E. Liebmann, Marco A. Cabrera Carrasco // Simposio de Metrología 2008 Santiago de Querétaro, México, 22 al 24 de Octubre. – Centro Nacional de Metrología, 2008. – Режим

доступу: https://www.cenam.mx/simposio2008/sm_2008/memorias/M2/SM2008-M236-1197.pdf.

119. Finch M. Improving Uncertainties of Non-Contact Thermometry Measurements / Mark Finch // Test and Measurement Conference 2010, 7-10 November 2010, Drakensberg, South Africa. – Drakensberg, 2010. – P. 16-21.

120. IR Calibration basics. – AMETEK DENMARK A/S, 2003. – 13 p.

121. McGee Thomas D. Principles and methods of temperature measurement / Thomas D. McGee. – John Wiley and Sons Ltd, United States, 1988. – 581 p.

122. ASTM C1046 - 95(2013) Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://arnisco.com/astm/PDF/C1046.PDF>. – Назва з екрана.

123. Polakowski H. Testowe promienniki podczerwieni / H. Polakowski, T. Piątkowski // Pomiar Automatyka Kontrola. – 2011. – № 11. – S. 1351-1354.

124. Zhang H. Research on radiant source for infrared image calibration / H. Zhang, J.M. Dai, X.G. Sun // Journal of Physics: Conference Series. – 2006. – Vol. 48. – P. 1053-1057.

125. Clausen S. Spectral emissivity of surface black body calibrators / S. Clausen // International Journal Thermophysics. – 2007. – Vol. 28. – № 6. – P. 2145-2154.

126. 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.

127. DeWitt D.P. Theory and Practice of Radiation Thermometry / D.P. DeWitt, G.D. Nutter. – Wiley Interscience, New York, 1988. – 1152 p.

128. Polakowski H. Application of 3D metallic structures for IR emitters with gradient temperature distribution / Henryk Polakowski, Zbigniew Zarański, Tadeusz Piątkowski, Stanisław Sulej, Piotr Trzaskawka // Biuletyn WAT. – 2014. – Vol. LXIII. – № 2. – P. 125-137.

129. Roessler D.M. Review of Radiant Properties of Materials: Tables of Radiant Values for Black Body and Real Materials / D.M. Roessler. – Elsevier, 1986. – 479 p.

130. Liebmann F. Emissivity – the crux of accurate radiometric measurement [Электронный ресурс] / Frank Liebmann. – Режим доступа: http://support.fluke.com/calibration-sales/Download/Asset/9010104_ENG_A_W.PDF.

131. Fidali M. An inexpensive blackbody model [Электронный ресурс] / M. Fidali, M. Mikulski // QIRT 2008: 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, July 2-5, 2008, Krakow, Poland. – Krakow, 2008. – Режим доступа: http://www.ndt.net/article/qirt2008/14_01_04.pdf.

132. EA-10/13 EA Guidelines on the Calibration of Temperature Block Calibrators [Электронный ресурс]. – European co-operation for Accreditation, 2000. – P. 14. – Режим доступа: <https://www.cik-solutions.com/pdf/Richtlinie%20zur%20Kalibrierung%20von%20Blockkalibratoren%20EA-10-13.pdf>.

133. Greybody Source Model 975 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kip-engineering.ru/sites/default/files/upload/files/product_file1-71.pdf. – Назва з екрана.

134. Пат. 65219 Российская Федерация, МПК G01J5/02. Излучатель «серое тело» [Электронный ресурс] / Козлов О.И., Марусенко А.А.; патентообладатель Федеральное государственное учреждение «24 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации». – № 2006127953/22; заявл. 01.08.2006; опубл. 27.07.2007, Бюл. № 34/2007. – Режим доступа: <http://poleznauyamodel.ru/model/6/65219.html>.

135. Основные принципы реализации реперных точек [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://temperatures.ru/pages/fixed_points_its90. – Назва з екрана.

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

137. Vavilov V.P. A Pessimistic View of the Energy Auditing of Building Structures with the Use of Infrared Thermography / V.P. Vavilov // Russ. J. of Nondestructive Testing. – 2010. – Vol. 46. – № 12. – P. 906-910.

138. 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, Україна. – Харків: ТОВ «В справі», 2015. – С. 135-136.

139. Богословский В.Н. Строительная теплофизика / В.Н. Богословский. – М.: Высшая школа, 1982. – 415 с.

140. Гончаров Э.И. Строительная теплофизика: учебно-методический комплекс [Электронный ресурс] / сост. Э.И. Гончаров и Е.С. Добросольцева; под общ. ред. Э.И. Гончарова. – Новополюцк: ПГУ, 2009. – Режим доступа: http://elib.psu.by:8080/bitstream/123456789/11869/2/2_teploperedacha_cherez_ograzhdenija.pdf.

141. Олійниченко І.Р. Економія при опаленні приміщення за рахунок використання матеріалів, що відбивають теплове випромінювання / І.Р. Олійниченко // Вісник КНУТД. – 2013. – № 6. – С. 146-149.

142. Więcek B. Termowizja w podczerwieni. Podstawy i zastosowania / B. Więcek, G. De Mey. – F.P. PAK. Krzysztof Przybyła, 2011. – 372 p.

143. Шушарин А.Г. Медицинское тепловидение – современные возможности метода [Электронный ресурс] / А.Г. Шушарин, В.В. Морозов, М.П. Половинка // Современные проблемы науки и образования. – 2011. – № 4. – Режим доступа: <https://www.science-education.ru/ru/article/view?id=4726>.

144. Ковальчук И.С. Возможности дистанционной инфракрасной термографии в диагностике заболеваний молочных желез (доброкачественные изменения) / И.С. Ковальчук, В.И. Дунаевский, Е.Ф. Венгер, В.И. Котовский, С.С. Назарчук // Український медичний часопис. – 2014. – № 3 (101). – С. 121-125.

145. Борисова З.Л. Компьютерная дистанционная термография при заболеваниях орбиты: дис. ... канд. мед. наук: 14.01.07 / Борисова Зинаида Леонидовна; [Место защиты: ГОУДПО «Российская медицинская академия последипломного образования»]. – М., 2010. – 101 с.: ил.

146. Макаренко Т.П. Термография (тепловидение) в диагностике заболеваний лёгких и средостения [Электронный ресурс] / Т.П. Макаренко, Ю.Н. Богин, В.Д. Стоногин, В.И. Архангельский. – Режим доступа: <http://www.rusmedserv.com/misc/termografiya-teplovidenie-vdiagnostike-zabolevaniy-legkih-i-sredosteniya.html>.

147. Бур'янов О.А. Розробка та обґрунтування методики термографічного дослідження для ранньої діагностики псоріатичного артриту у хворих з ураженням суглобів кисті / О.А. Бур'янов, А.В. Самохін, В.П. Кваша, В.В. Котюк // Травма. – 2009. – Т. 10. – № 4. – С. 380-385.

148. Виноградов В.И. Некоторые аспекты применения термографии при реабилитации пациентов с нарушением функций опорно-двигательной и нервной систем / В.И. Виноградов, И.С. Веретенков, В.Н. Слезко и др. // Функциональная диагностика. – 2005. – № 3. – С. 72-78.

149. Wu C.L. The application of infrared thermography in the assessment of patients with coccygodynia before and after manual therapy combined with diathermy / C.L. Wu, K.L. Yu, H.Y. Chuang et al. // J. Manipulative Physiol. Ther. – 2009. – Vol. 32. – № 4. – P. 287-293.

150. Knobel R.B. Thermoregulation and thermography in neonatal physiology and disease / R.B. Knobel, B.D. Guenther, H.E. Rice // Biological research for nursing. – 2011. – Vol. 13. – № 3. – P. 274-282.

151. Гаевская О.Э. Особенности использования тепловидения при оценке нарушений микроциркуляции в области верхних конечностей после мастэктомии / О.Э. Гаевская, Л.М. Смирнова // Вестник гильдии протезистов-ортопедов. – 2008. – Т. 3. – № 33. – С 48-52.

152. Murthy J.N. Thermal Infrared Imaging: A Novel Method to Monitor Airflow During Polysomnography / J.N. Murthy, J. Jaarsveld, J. Fei et al. // SLEEP. – 2009. – Vol. 32. – № 11. – P. 1521-1527.

153. Fedasyuk D. Method of evaluation of electronic educational resources quality for conformity assessment (certification) [Електронний ресурс] / D. Fedasyuk, N. Hots, M. Mykyychuk, 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, Ukraine. – CEUR-WS.org, online, 2016. – Vol. 1614. – P.148-156. – Режим доступу: http://ceur-ws.org/Vol-1614/paper_36.pdf.

Додаток А

Фізичні засади теплового випромінення

Таблиця А.1 – Фізичні величини, що характеризують теплове випромінення

Позначення	Назва одиниці фізичної величини	Визначення одиниці фізичної величини	Одиниці вимірювання
E	Енергія випромінення	-	Дж
$\Phi = \frac{\Delta E}{\Delta t}$	Потік випромінення або потужність випромінення	Енергія, що випромінюється (або поглинається) за одиницю часу	Дж/с = Вт
$B = \frac{\Delta E}{\Delta S}$	Густина потоку випромінення	Енергія, що випромінюється одиничною поверхнею з площею ΔS	Дж/м ²
$L = \frac{\Delta E}{\Delta t \cdot \Delta S}$	Енергетична яскравість	Енергія випромінення, що випромінюється одиничною поверхнею з площею ΔS за одиницю часу Δt на всіх довжинах хвиль λ від 0 до ∞	Дж/(с·м ²)
$L = \frac{\Delta W}{\Delta t \cdot \Delta S_0}$	Енергетична освітленість	Енергія випромінення, що сприймається одиничною поверхнею з площею ΔS за одиницю часу Δt на всіх довжинах хвиль λ від 0 до ∞	Дж/(с·м ²)
$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{L(\lambda, T)}{L_{bb}(\lambda, T)}$	Коефіцієнт випромінення	-	-
$\rho(\lambda, T) = 1 - \varepsilon(\lambda, T)$	Коефіцієнт відбивання	-	-

Таблиця А.2 – Основні закони оптичного випромінення

Закон	Опис закону	Формула
Закон Планка	Описує функціональну залежність температури T поверхні абсолютно чорного тіла та спектрального розподілу його енергетичної яскравості $L_0(\lambda, T)$	$L_0(\lambda, T) = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1},$ де $C_1 = 3,7417749 \cdot 10^{-16}$ Вт·м ² ; $C_2 = 0,01438769$ м·К.
Закон зміщення Віна	Довжина хвилі, на яку припадає максимум енергії в спектрі рівноважного випромінення, обернено пропорційна абсолютній температурі об'єктів, що випромінюють	$\lambda_{max} = \frac{C_2}{T},$ де σ – стала Стефана-Больцмана, $\sigma = 5,6686 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м ² ·К ⁴).
Формули Кірхгофа	Об'єкти поглинають, пропускають та відбивають випромінення, що падає на них	Для частково прозорих об'єктів: $\alpha + \tau + \rho = 1.$ Для непрозорих об'єктів: $\varepsilon + \rho = 1.$ • коефіцієнт поглинання α ; • коефіцієнт пропускання τ ; • коефіцієнт відбивання ρ .

Додаток Б

Розширена класифікація тепловізорів

Таблиця Б.1 – Класифікація тепловізорів

Класифікаційна ознака	Види тепловізорів	Коротка характеристика
1	2	3
За поколіннями розвитку тепловізійної техніки	Нульове покоління Перше покоління Друге покоління Третє покоління	Система розгортки зображення – двомірна оптико-механічна. Одиночний ПВ. Система розгортки зображення – одномірна оптико-механічна. Одномірна лінійка ПВ. Система розгортки зображення – одномірна оптико-механічна. Матриця фотоприймачів у вигляді декількох лінійок (2-6). Відсутня оптико-механічна розгортка зображення. Фокально-площинні матриці фотоелементів.
За принципом отримання зображення (залежно від способу сканування)	Скануючі Матричні	Використовують принцип оптико-механічного сканування. Оптична системи складається із сукупності рухливих дзеркал та призм, які забезпечують перенесення на ПВ від кожної точки. У фокальній площині оптичної системи встановлено багатоелементний ПВ. Передбачено електронне сканування.
За спектральним діапазоном	Короткохвильові Довгохвильові	Працюють у вікні прозорості 3÷5 мкм. Лінзові об'єктиви виготовляються із кремнію. Потребують охолодження. Робочий спектральний діапазон 8÷14 мкм. Лінзові об'єктиви виготовляються із германію. Не потребують охолодження.
За типом виконання	Стаціонарні Портативні	Є елементом стаціонарної установки. Використовується для дослідження теплового режиму рухливих об'єктів. Усі системи тепловізора є моноблоком. Маса від 850г до 2кг.
За можливістю VT	Спостережувальні (наглядові, пошукові) Вимірювальні	Забезпечують візуалізацію ІЧВ за допомогою кольорової палітри. Забезпечують візуалізацію температурних полів

Продовження таблиці Б.1

1	2	3
		та призначені для безконтактного ВТ.
За потребою в охолодженні матриці	Охолоджувані Неохолоджувані	Робота матриці ґрунтується на явищі зовнішнього фотоелектричного ефекту. Використовуються кріогенні технології. В основі роботи матриці лежить явище внутрішнього фотоефекту. Матриця складається із мікроболометрів. Не потребують охолодження.
За принципом дії залежно від типу чутливого елемента (поділ за типом ПВ)	Болометричні Піроелектричні Термоелектричні Фотонні	Використовуються мікроболометричні матриці. Болومتر є резистором, опір якого змінюється залежно від падаючого на нього теплового потоку. Матеріал оксид ванадію, аморфний кремній Під дією потоку випромінювання міняються параметри сегнетоелектричного чутливого елемента. Працюють на основі термоелектричного ефекту (термоелектрорушійної сили). Матеріал – антимонід індію (InSb), HgTeCa (кадмій-ртуть-телур), PbSe. Приймачі працюють на основі фотоефекту.
За основними технічними характеристиками	Показуючий Професійний	Поділ відбувається за характеристиками: температурна чутливість, просторова роздільна здатність, розмір матриці ПВ, діапазон вимірюваних температур, маса та ін.
За дальністю спостереження	Ближньої дії Середньої дії Дальньої дії	До 500 метрів. До 5 кілометрів. Понад 5 кілометрів.

Додаток В

Основні напрями сучасної термографії у промисловості

Таблиця В.1 – Окремі сфери та напрями ефективного використання тепловізійних вимірювань

Сфера використання	Напрями використання	Переваги використання
Будівництво	<p>Енергоаудит</p> <p>Оцінка стану результатів будівництва чи виконання ремонтних робіт</p> <p>Контроль систем опалення, вентиляції та кондиціонування</p>	<p>Можливість визначення причини втрат тепла, оцінювання їх масштабів і розроблення заходів щодо їх скорочення. Забезпечення оптимізації витрат на опалення, визначення оптимальних способів зниження енерговитрат.</p> <p>Можливість виявлення різних дефектів результатів будівництва чи виконання ремонтних робіт, служить доказом виробничого браку або неякісного проектування.</p> <p>Виявлення помилок проекту, порушення правил експлуатації, складування чи перевезення.</p>
Промисловість	<p>Промислове виробництво</p> <p>Нафтогазовий комплекс</p> <p>Хімічна промисловість</p> <p>Гірничодобувна промисловість</p> <p>Машинобудівна промисловість</p>	<p>Виявлення дефектів обладнання на їх ранній стадії превентивного обслуговування (верстати, конвеєри, турбіни, компресори, насоси, генератори, ДВЗ, системи нагрівання та охолодження, різні гідравлічне обладнання).</p> <p>Контроль наповнюваності резервуарів, дозволяючи дистанційно визначати температуру і рівень рідини, роблячи цей процес максимально швидким і безпечним (при відмові систем автоматичного оповіщення).</p> <p>Перевірка рівня рідини резервуарів, діагностика герметичності та ізоляції емностей, загальний моніторинг температури речовин. Важливою перевагою є дуже низький рівень теплового впливу, крім того, використання тепловізора можливе як в стаціонарному режимі, так і в процесі роботи установок.</p> <p>Застосування обмежене діагностикою електроніки та електротехніки, що забезпечують виробничий процес. Акцент на діагностику стану середовища роботи шахтарів та пошуку небезпечних місць видобутку поки на стадії наукових розробок.</p> <p>Забезпечення безперебійності промислового процесу, проведення випробувань готової продукції.</p>
Енергетика	<p>Моніторинг сонячних енергосистем</p> <p>Організація роботи підприємств енергетичного сектора</p>	<p>Забезпечення безпеки та аналізу експлуатаційних показників.</p> <p>Пошук несправностей в теплоізоляції трубопроводів і турбін, визначення місць протягу холодного повітря, для перевірки ефективності роботи систем охолодження трансформаторів, двигунів, ліній електропередач та іншого обладнання.</p>
Електроніка та електротехніка	<p>Розподіл електроенергії</p> <p>Контроль електромеханічного обладнання</p> <p>Контроль промислових контрольно-вимірювальних приладів</p>	<p>Оцінювання рівня нагріву в системах низької, середньої та високої напруги, можливість своєчасно виявити несправні компоненти і вжити заходів щодо їх ремонту.</p> <p>Забезпечення аналізу експлуатаційних показників.</p>

Додаток Г

**Нормативне забезпечення з питань вимірювань розподілу температури
теплового поля об'єктів промисловості та медицини**

Таблиця Г.1 – Стандарти ISO, що стосуються ВТ та ГТ ТП об'єктів

Номер	Назва стандарту
ISO 9712:2012	Non-destructive testing – Qualification and certification of NDT personnel
ISO 10878:2013	Non-destructive testing. Infrared thermography. Vocabulary
ISO 18434-1:2014	Condition monitoring and diagnostics of machines – Thermography – Part 1: General procedures
ISO 18436-7:2014	Condition monitoring and diagnostics of machines – Requirements for qualification and assessment of personnel. Part 7: Thermography
ISO 6781:1983	Thermal insulation – Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes – Infrared method

Таблиця 2.Г – Стандарти ASTM, що стосуються вимірювань РТ ТП об'єктів

Номер	Назва стандарту
ASTM E1316-14	Standard Terminology for Nondestructive Examinations
ASTM E1213-14	Standard Practice for Minimum Resolvable Temperature Difference for Thermal Imaging Systems
ASTM E1311-14	Standard Practice for Minimum Detectable Temperature Difference for Thermal Imaging Systems
ASTM E1543-14	Standard Practice for Noise Equivalent Temperature Difference of Thermal Imaging Systems
ASTM D4788-03(2013)	Standard Test Method for Detecting Delaminations in Bridge Decks Using Infrared Thermography
ASTM E1934-99A(2014)	Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography
ASTM E2533-09	Standard Guide for Nondestructive Testing of Polymer Matrix Composites Used in Aerospace Applications
ASTM E2582-07(2014)	Standard Practice for Infrared Flash Thermography of Composite Panels and Repair Patches Used in Aerospace Applications
ASTM C1046-95(2013)	Standard Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature on Building Envelope Components
ASTM C1060-11A	Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings
ASTM C1153-10	Standard Practice for Location of Wet Insulation in Roofing Systems Using Infrared Imaging

Таблиця Г.3 – Нормативне забезпечення України з питань вимірювань РТ ТП
об'єктів дослідження

Номер	Назва стандарту
ГОСТ 8.558-2009	Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры
ГОСТ 23483-79	Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования
ГОСТ 25314-82	Контроль неразрушающий тепловой. Термины и определения (втратив силу в Російській Федерації у 01.01.2011 у зв'язку з введенням сучаснішого ГОСТ Р 53698-2009 «Контроль неразрушающий. Методы тепловые. Термины и определения»)
ДСТУ 4017-2001	Метрологія. Шкали температурні (ГОСТ 8.157-2001, IDT)
ДСТУ 3518-97	Термометрія. Терміни та визначення
ДСТУ 3194-2005	Державна повірочна схема для засобів вимірювання температури. Безконтактні вимірювання температури
ДСТУ 2958-94	Приймачі інфрачервоного випромінення. Терміни та визначення
ДСТУ 2820-94	Тепловізійні системи. Терміни та визначення
ДСТУ 3170-95 (ГОСТ 28243-96)	Пирометры. Общие технические требования (питання інструментальної похибки вимірювання тепловізора)
ДСТУ Б EN 13187:2011	Теплові характеристики будівель. Якісне виявлення теплових відмов в огорожувальних конструкціях. Інфрачервоний метод (EN 13187:1998, IDT; замість ГОСТ 26629-85 «Здания и сооружения. Метод теплового контролю качества теплоизоляции ограждающих конструкций»)
МПУ 219/06-2008	Інструкція. Метрологія. Тепловізори. Методика повірки
МБУ 048/06-2012	Метрологія. Опір теплопередаванню крізь огорожувальні конструкції будівель та споруд різного призначення. Методика виконання вимірювань комбінованим тепловізійно-теплометричним методом

Додаток Д

Основні джерела виникнення непевності вимірювань температури та градієнта температури об'єктів промисловості та медицини

Таблиця Д.1 – Джерела виникнення непевності тепловізійних досліджень

Джерело виникнення непевності	Складові, що впливають на величину непевності
Тепловізор, інше обладнання та прилади, що використовуються під час дослідження	Непевність засобу вимірювання, передбачена документацією.
Випромінювальна здатність поверхні об'єкта	Невідоме значення величини випромінювальної здатності досліджуваної поверхні. Залежність випромінювальної здатності від температури та довжини хвилі, матеріалу, форми об'єкта дослідження та якості обробки його поверхні.
Атмосфера та кліматичні умови	Пропускання проміжного середовища. Випромінювання атмосфери. Складність врахування кліматичних умов.
Фон	Відбиття ФВ від поверхні об'єкта дослідження. Ототожнення температури ФВ оточуючих предметів зі значенням температури оточуючого середовища. Складність врахування багатократного відбивання ФВ.
Оператор та інші особи, що беруть участь у дослідженні	Правильність вибору нормативної документації з питань проведення дослідження. Чіткість дотримання всіх умов та порядку проведення дослідження. Своєчасність та правильність введення поправок, зокрема, на випромінювальну здатність складних за формою та матеріалом об'єктів, температуру фону. Правильність побудови панорамних знімків та аналізування термограм, проведення розрахунків та заповнення звітів.
Теоретично закладені спрощення	Обмеженість спектральної смуги ОПС тепловізора. Неврахування комплексного та взаємозалежного впливу температури і довжини хвилі на випромінювальну здатність.

Додаток Е

Характеристики точності вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням для різних моделей тепловізорів за даними фірм-виробників

Таблиця Е.1 – Значення інструментальної складової непевності ВТ та ГТ за ІЧВ тепловізорів

№	Фірма-виробник	Модель тепловізора	Значення характеристики точності		Значення непевності, %
			Точність/Похибка	Температурна чутливість	
1	FLUKE	Ti32 та TiR32	$\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ або 2%, що є більшим (при $25 \text{ }^\circ\text{C}$) (точність)	$\leq 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ при $30 \text{ }^\circ\text{C}$ температури цілі (50 mK)	$\pm \frac{2}{\sqrt{3}} \approx (\pm 1,1547)$
2	Flir	i5, i7	$\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ або $\pm 2\%$ від показників (похибка)	0,10 $^\circ\text{C}$	
3	BALTECH	TR-01100	$\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ або $\pm 2\%$ показників вимірювань (точність)	0,1 $^\circ\text{C}$ при $30 \text{ }^\circ\text{C}$	
4	IRay	L503	$\pm 2 \text{ }^\circ$ / $\pm 2\%$ від величини зчитування (точність)	$\leq 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$	
5	Testo	870	$\pm 2\%$, 2 $^\circ\text{C}$ від значення вимірювання (застосовується найвище значення)	$\leq 100 \text{ мК}$ при $30 \text{ }^\circ\text{C}$	
6	Mikron	M7800DV	$\pm 2\%$ або 2 $^\circ\text{C}$ від зчитування (точність)	0,06 $^\circ\text{C}$ (при $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 60 Hz)	
7	Sonel	KT-160, KT-160A	$\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ або $\pm 2\%$ від показників	$\leq 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ при $30 \text{ }^\circ\text{C}$	

Додаток Ж

Бюджет непевності вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням тепловізором

Таблиця Ж.1 – Бюджет непевності ВТ та ГТ за ІЧВ тепловізором

Джерело непевності	Оцінка очікуваного значення	Складові та елементи непевності	Тип непевності	Ймовірний розподіл	Коефіцієнти чутливості	Оцінка стандартної непевності
Вихідний сигнал	$S(\lambda, T)$	$S_i(\lambda, T)$	А	нормальний	-	$u_A^2(S(\lambda, T)) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i(\lambda, T) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i(\lambda, T))^2}{n \cdot (n-1)}}$
Температура	T	T_i				$u_A^2(T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i)^2}{n \cdot (n-1)}}$
ГТ	ΔT	ΔT_i				$u_A^2(\Delta T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta T_i)^2}{n \cdot (n-1)}}$
Шум ПВ	U_{noise}	$u(U_{noise})$	В (інстр.)	рівно-ймовірний	-	$\frac{u(U_{noise})}{\sqrt{12}}$
Нелінійність перетворення оптичної системи	$R(\lambda)$	$u(R(\lambda))$	В (інстр.)	рівно-ймовірний	-	$\frac{u(R(\lambda))}{\sqrt{12}}$
Температурний вплив	$T_{amb.}$	$u(T_{amb.})$	В (інстр.)	рівно-ймовірний	-	$\frac{u(T_{amb.})}{\sqrt{12}}$
Зміни температурної чутливості	ΔT	$u(\Delta T)$	В (інстр.)	рівно-ймовірний	-	$\frac{u(\Delta T)}{\sqrt{12}}$
Зміни просторової чутливості	ΔS	$u(\Delta S)$	В (інстр.)	рівно-ймовірний	-	$\frac{u(\Delta S)}{\sqrt{12}}$
КВ поверхні	$\varepsilon(\lambda, T)$	$u(\varepsilon(\lambda, T))$	В (метод.)	нормальний	$\frac{\partial(S(\lambda, T))}{\partial \varepsilon(\lambda, T)}$	$C'_{\varepsilon(\lambda, T)} = \frac{\partial(S(\lambda, T))}{\partial \varepsilon(\lambda, T)}$
КППС	$\tau(\lambda, T_{amb.})$	$u(\tau(\lambda, T_{amb.}))$	В (метод.)	нормальний	$\frac{\partial(S(\lambda, T))}{\partial \tau(\lambda, T_{amb.})}$	$C'_{\tau(\lambda, T_{amb.})} = \frac{\partial(S(\lambda, T))}{\partial \tau(\lambda, T_{amb.})}$
ФВ	T_f	$u(T_f)$	В (метод.)	нормальний	$\frac{\partial(S(\lambda, T))}{\partial T_f}$	$C'_{T_f} = \frac{\partial(S(\lambda, T))}{\partial T_f}$

Додаток 3

Розрахунок відносної непевності для об'єкта промисловості

Таблиця 3.1 – Результати розрахунку відносної непевності для окремих значеннях температури об'єкта промисловості при вибраних значеннях впливних факторів

Значення температури поверхні, °С	Значення коефіцієнта випромінювання поверхні об'єкта дослідження	Значення коефіцієнта пропускання проміжного середовища	Значення температури фону, °С	Відносне значення непевності методу вимірювання вихідного сигналу, %	Значення коефіцієнтів впливу		
					випромінювання	пропускання	фон
1	2	3	4	5	6	7	8
25	0,75	0,95	0	3,158	54,452	153,425	0,476
100	0,75	0,95	0	3,434	303,311	349,892	0,476
250	0,75	0,95	0	3,672	1155	1022	0,476
25	0,75	0,95	25	3,111	0	167,755	0,615
100	0,75	0,95	25	3,299	248,859	364,222	0,615
250	0,75	0,95	25	3,604	1100	1036	0,615
25	0,75	0,95	100	3,699	-248,859	233,244	1,043
100	0,75	0,95	100	3,071	0	429,711	1,043
250	0,75	0,95	100	3,354	851,466	1102	1,043
25	0,75	0,95	250	5,382	-1100	457,314	1,752
100	0,75	0,95	250	3,887	-851,466	653,781	1,752
250	0,75	0,95	250	3,048	0	1326	1,752
25	0,75	0,97	0	3,098	55,599	153,425	0,486
100	0,75	0,97	0	3,379	309,697	349,892	0,486
250	0,75	0,97	0	3,62	1179	1022	0,486
25	0,75	0,97	25	3,05	0	167,755	0,628
100	0,75	0,97	25	3,241	254,098	364,222	0,628
250	0,75	0,97	25	3,552	1123	1036	0,628
25	0,75	0,97	100	3,648	-254,098	233,244	1,064
100	0,75	0,97	100	3,009	0	429,711	1,064
250	0,75	0,97	100	3,297	869,391	1102	1,064
25	0,75	0,97	250	5,347	-1123	457,314	1,789
100	0,75	0,97	250	3,838	-896,391	653,781	1,789
250	0,75	0,97	250	2,986	0	1326	1,789
25	0,75	0,99	0	3,04	56,745	153,425	0,496
100	0,75	0,99	0	3,326	316,082	349,892	0,496
250	0,75	0,99	0	3,571	1203	1022	0,496
25	0,75	0,99	25	2,991	0	167,755	0,64
100	0,75	0,99	25	3,186	259,337	364,222	0,64
250	0,75	0,99	25	3,502	1147	1036	0,64
25	0,75	0,99	100	3,599	-259,337	233,244	1,086

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8
100	0,75	0,99	100	2,949	0	429,711	1,086
250	0,75	0,99	100	3,243	887,317	1102	1,086
25	0,75	0,99	250	5,314	-1147	457,314	1,826
100	0,75	0,99	250	3,792	-887,317	653,781	1,826
250	0,75	0,99	250	2,926	0	1326	1,826
25	0,85	0,95	0	3,119	54,452	159,157	0,285
100	0,85	0,95	0	3,369	303,311	381,82	0,285
250	0,85	0,95	0	3,553	1155	1144	0,285
25	0,85	0,95	25	3,065	0	167,755	0,369
100	0,85	0,95	25	3,258	248,859	390,418	0,369
250	0,85	0,95	25	3,503	1100	1152	0,369
25	0,85	0,95	100	3,787	-248,859	207,048	0,626
100	0,85	0,95	100	3,05	0	429,711	0,626
250	0,85	0,95	100	3,308	851,466	1192	0,626
25	0,85	0,95	250	5,382	-1100	457,314	1,752
100	0,85	0,95	250	3,887	-851,466	653,781	1,752
250	0,85	0,95	250	3,048	0	1326	1,752
25	0,85	0,97	0	3,058	55,599	159,157	0,291
100	0,85	0,97	0	3,313	309,697	381,82	0,291
250	0,85	0,97	0	3,5	1179	1144	0,291
25	0,85	0,97	25	3,003	0	167,755	0,377
100	0,85	0,97	25	3,2	254,098	390,418	0,377
250	0,85	0,97	25	3,448	1123	1152	0,377
25	0,85	0,97	100	3,737	-254,098	207,048	0,639
100	0,85	0,97	100	2,988	0	429,711	0,639
250	0,85	0,97	100	3,25	869,391	1192	0,639
25	0,85	0,97	250	6,609	-1123	341,49	1,073
100	0,85	0,97	250	4,067	-869,391	564,153	1,073
250	0,85	0,97	250	2,98	0	1326	1,073
25	0,85	0,99	0	3	56,745	159,157	0,297
100	0,85	0,99	0	3,259	316,082	381,82	0,297
250	0,85	0,99	0	3,449	1203	1144	0,297
25	0,85	0,99	25	2,943	0	167,755	0,384
100	0,85	0,99	25	3,144	259,337	390,418	0,384
250	0,85	0,99	25	3,397	1147	1152	0,384
25	0,85	0,99	100	3,689	-259,337	207,048	0,652
100	0,85	0,99	100	2,928	0	429,711	0,652
250	0,85	0,99	100	3,195	887,317	1192	0,652
25	0,85	0,99	250	6,582	-1147	341,49	1,096
100	0,85	0,99	250	4,024	-887,317	564,153	1,096
250	0,85	0,99	250	2,919	0	1326	1,096
25	0,95	0,95	0	3,1	54,452	164,889	0,095
100	0,95	0,95	0	3,32	303,311	413,747	0,095
250	0,95	0,95	0	3,465	1155	1265	0,095
25	0,95	0,95	25	3,042	0	167,755	0,123
100	0,95	0,95	25	3,228	248,859	416,613	0,123
250	0,95	0,95	25	3,426	1100	1268	0,123
25	0,95	0,95	100	3,946	-248,859	180,852	0,209

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8
25	0,95	0,95	100	3,946	-248,859	180,852	0,209
250	0,95	0,95	100	3,271	851,466	1281	0,209
25	0,95	0,95	250	9,399	-1100	225,666	0,35
100	0,95	0,95	250	4,467	-851,466	474,525	0,35
250	0,95	0,95	250	3,039	0	1326	0,35
25	0,95	0,97	0	3,038	55,599	164,889	0,097
100	0,95	0,97	0	3,263	309,697	413,747	0,097
250	0,95	0,97	0	3,41	1179	1265	0,097
25	0,95	0,97	25	2,979	0	167,755	0,126
100	0,95	0,97	25	3,17	254,098	416,613	0,126
250	0,95	0,97	25	3,37	1123	1268	0,126
25	0,95	0,97	100	3,898	-254,098	180,852	0,213
100	0,95	0,97	100	2,977	0	429,711	0,213
250	0,95	0,97	100	3,213	869,391	1281	0,213
25	0,95	0,97	250	9,379	-1123	225,666	0,358
100	0,95	0,97	250	4,425	-896,391	474,525	0,358
250	0,95	0,97	250	2,976	0	1326	0,358
25	0,95	0,99	0	2,979	56,745	164,889	0,099
100	0,95	0,99	0	3,208	316,082	413,747	0,099
250	0,95	0,99	0	3,357	1203	1265	0,099
25	0,95	0,99	25	2,919	0	167,755	0,128
100	0,95	0,99	25	3,113	259,337	416,613	0,128
250	0,95	0,99	25	3,317	1147	1268	0,128
25	0,95	0,99	100	3,852	-259,337	180,852	0,217
100	0,95	0,99	100	2,917	0	429,711	0,217
250	0,95	0,99	100	3,158	887,317	1281	0,217
25	0,95	0,99	250	9,36	-1147	225,666	0,365
100	0,95	0,99	250	4,384	-887,317	474,525	0,365
250	0,95	0,99	250	2,916	0	1326	0,365

Додаток И

**Проект Національного стандарту України «Методика тепловізійних
досліджень будівель»**



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

**МЕТОДИКА ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
БУДІВЕЛЬ**

**ДСТУ XXXX:XXXX
(Проект)**

Видання офіційне

ПЕРЕДМОВА

1 ВНЕСЕНО: Національним університетом «Львівська політехніка»

РОЗРОБЛЕНО: **Н. Гоц**, докт. техн. наук, доцент, **М. Микийчук**, докт. техн. наук,
професор, **Ю. Дзіковська**, аспірант

2 НАДАНО ЧИННОСТІ: наказ _____ № _____ з _____

**Право власності на цей документ належить державі.
Відтворювати, тиражувати і розповсюджувати його повністю чи частково
на будь-яких носіях інформації без офіційного дозволу заборонено.
Стосовно врегулювання прав власності треба звертатися до Департамент технічного
регулювання та метрології Міністерства економічного розвитку і торгівлі України**

Департамент технічного регулювання та метрології
Міністерства економічного розвитку і торгівлі України, 20__

ДСТУ (Проект)

ЗМІСТ

1 ГАЛУЗЬ ВИКОРИСТАННЯ	...
2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ	...
3 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ	...
4 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ	...
5 ОБЛАДНАННЯ ТА ПРИЛАДИ	...
6 ВИМОГИ БЕЗПЕКИ	...
7 УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПІДГОТОВКА ДО НЬОГО	...
8 ЗАГАЛЬНИЙ ПОРЯДОК ОРГАНІЗАЦІЇ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	...
9 ПРОВЕДЕННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	...
9.1 Проведення якісного тепловізійного обстеження	...
9.2 Проведення кількісного тепловізійного аналізу	...
10 ОПРАЦЮВАННЯ ТЕРМОГРАМИ	...
11 АНАЛІЗ ТЕРМОГРАМИ	...
12 ЗВІТ ПРО РЕЗУЛЬТАТИ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	...
Додаток А	...
Додаток Б	...
Додаток В	...

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

МЕТОДИКА ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

БУДІВЕЛЬ

Чинний від **xx.xx.20xx**

1 ГАЛУЗЬ ВИКОРИСТАННЯ

Об'єктом дослідження в даному стандарті є будівля.

Дія даного стандарту поширюється на проведення тепловізійних досліджень будівель на території України зі стаціонарним режимом теплопередачі, а саме стану:

- теплоізоляції;
- несучих, огорожувальних та сполучених конструкцій і конструкцій, непередбачених проектною документацією (стіни – зовнішні та внутрішні, покриття та перекриття горищ, перекриття над проїздами та підвалами, конструкції будинків та споруд тощо);
- інженерних мереж та комунікацій.

Дослідження проводять в реальних умовах з метою:

- виявлення місць витоку тепла;
- виявлення місць і розмірів аномальних та дефектних ділянок поверхонь досліджуваних об'єктів.

Цей стандарт не застосовують для визначення рівня якості несучих, огорожувальних та сполучених конструкцій і конструкцій, непередбачених проектною документацією, теплоізоляції, роботи інженерних мереж та комунікацій. Для такого визначення необхідно проводити обстеження іншими методами, зокрема, згідно стандартів ДСТУ Б В.2.6-101:2010 «Конструкції будинків і споруд. Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій», ДСТУ Б В.2.2-19:2007 «Будинки і споруди. Метод визначення повітропроникності в натурних умовах», ДСТУ Б В.2.7-38-95, ДСТУ Б В.2.6-17-2000 (ГОСТ 26602.1-99) «Конструкції будинків і споруд. Блоки віконні та дверні. Методи визначення опору теплопередачі», ДСТУ Б В.2.6-18-2000 (ГОСТ 26602.2-99) «Конструкції будинків і споруд. Блоки віконні та дверні. Методи визначення повітро- та водопроникності», ДБН В.2.6-31:2006 «Конструкції будинків і споруд. Теплова ізоляція будівель», СОУ ЖКГ 75.11-35077234.0015:2009 «Житлові будинки. Правила визначення фізичного зносу житлових будинків» та нормативних документів на виконання постанови КМУ від 5 травня 1997 р. № 409 (409-97-п) «Про забезпечення надійності й безпечної експлуатації будівель, споруд та інженерних мереж» тощо.

Стандарт не поширюється на світлопроникні поверхні та поверхні з підвищеним коефіцієнтом відбиття теплового випромінювання (не більше 0,3).

2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

Дана методика розроблена на основі нормативних документів в сфері питань вимірювання температури за випроміненням в межах будівельної галузі та забезпечення єдності, відтворюваності та простежуваності результатів вимірювань:

EN ISO 6781-83 Thermal insulation – Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes – Infrared method

EN ISO 7345:1996 Thermal insulation – Physical quantities and definitions (ISO 7345:1987)

EN ISO 9288:1996 Thermal insulation – Heat transfer by radiation – Physical quantities and definitions (ISO 9288:1989)

ГОСТ 26253-84 Будівлі та споруди. Метод визначення теплостійкості огорожувальних конструкцій

ДСТУ ISO 9869:2007 Теплоізоляція. Будівельні елементи. Натурні вимірювання теплового опору та коефіцієнта теплопередавання (ISO 9869:1994, IDT)

ДСТУ ISO 6946:2007 Будівельні конструкції та елементи. Тепловий опір і коефіцієнт теплопередавання. Методика розраховування (ISO 6946:1996, IDT)

ДСТУ Б В.2.6-17-2000 Блоки віконні та дверні. Методи визначення опору теплопередачі

ДСТУ Б EN 13187:2011 Теплові характеристики будівель. Якісне виявлення теплових відмов в огорожувальних конструкціях. Інфрачервоний метод (EN 13187:1998, IDT)

ДБН В 2.6-31-2006 Теплова ізоляція будівель

ВСН 43-96 Ведомственные строительные нормы по теплотехническим обследованиям наружных ограждающих конструкций зданий с применением малогабаритных тепловизоров

ISO/IEC GUIDE 98-3:2008 Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)

Примітка. При застосуванні даного стандарту доцільно проводити перевірку чинності нормативних документів, на які є посилання. Якщо такі нормативні документи замінені/змінені, то при застосуванні даного стандарту необхідно користуватися заміненіми/зміненіми документами. Якщо такі нормативні документи відмінено без заміни, то частина даного стандарту, у якій вказане посилання на них, застосовується в частині, що не стосується таких нормативних документів.

3 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

У даному стандарті використовуються терміни згідно із нормативними посиланнями пункту 2, а також наступні терміни з відповідними визначеннями:

- будівля – це споруда, що складається з несучих та огорожувальних або сполучених (несучеогорожувальних) конструкцій, які утворюють наземні або підземні приміщення, призначені для проживання або перебування людей, розміщення устаткування, тварин, рослин, а також предметів. Згідно переліку Державного класифікатор будівель та споруд до будівель відносяться:

- житлові будинки;
- гуртожитки;
- готелі;
- ресторани;
- торговельні будівлі;
- промислові будівлі;
- вокзали;
- будівлі для публічних виступів;
- будівлі для медичних закладів;

- будівлі закладів освіти та т. ін.;
- об'єкт тепловізійного дослідження будівель (далі – об'єктів) – несучі, огорожувальні та сполучені конструкції і конструкції, непередбачені проектною документацією; теплоізоляція; інженерні мережі та комунікації;
- конструкції, непередбачені проектною документацією, – вбудовані чи вмонтовані елементи інтер'єру та екстер'єру будівель;
- інженерні мережі та комунікації – це комплекс об'єктів, що забезпечують життєдіяльність населення, комунально-побутових і промислових підприємств, а саме:
 - зовнішні системи водопостачання та водовідведення (джерела водопостачання, гідротехнічні споруди, водопровідні і каналізаційні очисні станції, колектори, насосні станції, внутрішньоквартальні мережі тощо);
 - внутрішні системи водопостачання та водовідведення (системи водопостачання та водовідведення будівель і споруд);
 - системи газопостачання (газорозподільні пункти, регулятори тиску, фільтри, запобіжні клапани, лічильники, газопроводи і т.п.);
 - зовнішні системи електропостачання (лінії електропередач, трансформаторні і тягові підстанції та т. д.);
 - внутрішні системи електропостачання (будинкові мережі напругою 380 В і нижче);
 - системи зовнішнього освітлення (вулиці, дороги, вітрини, стенди і т. д. та належні до них лінії електропередач напругою 10 кВ і нижче);
 - зовнішні системи теплопостачання (міські тепломережі, теплові пункти та внутрішньоквартальні мережі);
 - внутрішні системи теплопостачання (системи гарячого водопостачання і опалення будівель і споруд);
 - системи вентиляції та кондиціонування повітря;
- тепловізійне дослідження об'єктів – неруйнівний метод дистанційного пасивного тепловізійного контролю об'єктів у реальних умовах;
 - аномальна ділянка – ділянка, для якої тепловий розподіл відрізняється від очікуваного для даної поверхні (отриманого від еталонного об'єкта чи прийнятого за такий, визначеного за запроектованими характеристиками);
 - дефектна ділянка – аномальна ділянка, яка за результатами кількісного тепловізійного аналізу визнана дефектною (тобто характеризується втратою вихідних якісних і кількісних характеристик та для якої визначено причину її появи);
 - якісне тепловізійне обстеження – вид тепловізійного дослідження, що призначений для пошуку та визначення аномальних ділянок;
 - кількісний тепловізійний аналіз – вид тепловізійного дослідження, призначений для визначення й оцінки кількісних характеристик аномальних ділянок, виявлення причин їх появи та визнання дефектними. Проводиться за результатами якісного тепловізійного обстеження у вигляді детального термографування аномальних ділянок, включає кількісну оцінку розподілу температури об'єкта, формування звіту про результати тепловізійного дослідження;
 - тепловізійна система – система, що складається з тепловізора (інфрачервоної камери), еталонного площинного сірого випромінювача, персонального комп'ютера, додаткового

обладнання, приладів та матеріалів;

- еталонний площинний сірий випромінювач – площинний випромінювач, атестований як робочий еталон, кутові розміри якого у 10 та більше разів перевищують елементарне поле зору тепловізора, а коефіцієнт випромінення поверхні в заданих температурному та спектральному діапазонах має сталі значення, відмінне від 1

- аеродвері – спеціалізований манометричний засіб, що включає калібрований вентилятор, зйомку панель та сенсори, призначений для проведення натурних випробувань повітропроникності огорожувальних конструкцій будівлі, вимірювання показників повітрообміну будівлі, а також для оцінки герметичності окремих приміщень або секцій будівлі.

4 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Тепловізійне дослідження об'єктів ґрунтується на дистанційному вимірюванні тепловізором температурного поля поверхні об'єктів тепловізійного дослідження будівель, вказаних у пункті 1, та візуалізації аномальних й дефектних ділянок у результаті оцінки розподілу температури теплового поля.

Тепловізійне дослідження здійснюється з використанням тепловізійної системи. Потім теплового випромінення в інфрачервоному спектрі з поверхні досліджуваного об'єкта, що розглядається, перетворюється оптично-приймальною системою тепловізора та візуалізується на екрані дисплею.

Неоднорідність теплових властивостей об'єктів тепловізійного дослідження призводить до зміни температури або випромінювальних властивостей на їх поверхні. Колір зображення залежить від температури поверхні, характеристик поверхні, умов навколишнього середовища.

Тепловізійне дослідження включає такі етапи:

- 1) підготовчі роботи;
- 2) загальну оцінку зовнішнього теплового поля будівлі загалом;
- 3) дослідження окремих зовнішніх ділянок об'єктів згідно пункту 1;
- 4) дослідження окремих внутрішніх ділянок об'єктів згідно пункту 1;
- 5) опрацювання та аналіз термограм;
- 6) формування звіту про результати тепловізійного дослідження та розробка рекомендацій.

Методика включає два види тепловізійного дослідження:

- 1) якісне тепловізійне обстеження;
- 2) кількісний тепловізійний аналіз.

Право проведення робіт із тепловізійного дослідження належить лабораторії тепловізійного контролю.

Тепловізійного дослідження мають проводити фахівці, які пройшли навчання з неруйнівного контролю по тепловому методу та отримали підтверджуючі документи, зокрема сертифікат, на право проведення таких досліджень.

Тепловізійне дослідження доцільно проводити для:

- формування енергетичного паспорту будівлі;
- перевірки якості виконаних робіт, використовуваних матеріалів та правильності проектних рішень;

- дослідження стану будівель після надзвичайних ситуацій для оцінки нанесеної шкоди будівлі (в рамках державної допомоги);

- прийняття рішення про утеплення будівлі;
- оцінки стану будівлі та окремих об'єктів перед купівлею будівлі;
- пошуку місць розташування прихованих об'єктів;
- енергетичного аудиту;
- страхового аудиту;
- періодичної оцінки технічного стану об'єктів тощо.

За результатами тепловізійного дослідження можна визначити аномальні та дефектні ділянки:

- прихованих конструкцій, систем та елементів будівлі;
- прихованих аномальних та дефектних ділянок теплоізоляції та монтажних робіт (дефекти цегляної кладки, неякісний монтаж віконних блоків, дефекти теплоізоляції стиків між панелями, містки холоду, якість перекриття та покрівель тощо);
- місць можливого утворення конденсату на стінах та ділянок з підвищеним вмістом вологи;
- місць протікання зовнішнього походження;
- недоліків функціонування опалювальних систем (наприклад, засміченість батарей), проривів тепломагістралей;
- недоліків у роботі систем водопостачання (закупорювання труб, місця тріщин та проривів);
- місць витоку газу та пошкодження трубопроводів систем газопостачання;
- дефектів систем вентиляції;
- ділянок з теплопровідними включеннями та недоліків/відмов у роботі електромереж тощо.

За результатами визначення аномальних та дефектних ділянок складається звіт про результати тепловізійного дослідження та формуються рекомендації щодо їх усунення.

5 ОБЛАДНАННЯ ТА ПРИЛАДИ

При виконанні тепловізійного дослідження застосовується тепловізор, який повинен мати такі метрологічні характеристики:

- діапазон вимірювання температури – від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- робочий спектральний діапазон від 8 до 14 мкм;
- границя температурної чутливості – $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- кутові розміри поля зору – від 0,08 до 0,65 радіан;
- розмірність матриці – 320×240 пікселів.

Еталонний площинний сірий випромінювач:

- кутові розміри у 10 та більше разів перевищують елементарне поле зору тепловізора;
- коефіцієнт випромінювання поверхні в певному температурному та спектральному діапазонах є сталим $\varepsilon(\Delta\lambda, \Delta T) = \text{const}$ і $\varepsilon(\Delta\lambda, \Delta T) < 1$;
- випромінювальні властивості випромінювача є сталими в часі $\varepsilon(t) = \text{const}$;
- робочий діапазон температур від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- робочий спектральний діапазон від 8 до 14 мкм.

Персональний комп'ютер повинен відповідати наступними мінімальними системними вимогами:

- ✓ операційна система: Windows XP;
- ✓ процесор: тактова частота 1 ГГц;
- ✓ оперативна пам'ять: 1 ГБ;
- ✓ відеоадаптер: сумісний з DirectX9 та з роздільною здатністю 1024x768;
- ✓ вільне місце на жорсткому диску: 1 ГБ.

При тепловізійному дослідженні використовують додаткове обладнання, прилади та матеріали:

- контактний термометр з похибкою не більше $\pm 0,05$ °С (фактично не потрібний, якщо не виділяти реперні ділянки);
- термогігрометр з похибкою вимірювання температури не більше $\pm 0,1$ °С і відносній вологості не більше $\pm 3,5$ %;
- ручний анемометр з чутливістю не менше 0,2 м/с;
- вимірювальна металева рулетка;
- аеродвері;
- вимірювачі густини теплових потоків (за умови використання аеродверей).

Обладнання та прилади, що застосовуються при тепловізійному дослідженні, згідно чинного законодавства повинні бути зареєстрованими у Державному реєстрі засобів вимірювальної техніки та відкаліброваними.

6 ВИМОГИ БЕЗПЕКИ

До проведення тепловізійного дослідження допускається оператор, що має кваліфікацію фахівця з неруйнівного контролю по тепловому методу. Для проведення тепловізійного дослідження окремих об'єктів може знадобитися додаткове навчання та наявність відповідних підтверджуючих документів про його проходження та отримання кваліфікації певного рівня.

При проведенні тепловізійного дослідження потрібно дотримуватися вимог згідно ГОСТ 8.395 та вимог експлуатаційних документів, технічних регламентів для відповідних обладнання та приладів.

7 УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПІДГОТОВКА ДО НЬОГО

Загальні вимоги, які потрібно розглядати при виконанні тепловізійного дослідження, передбачені ДСТУ В EN 13187-2011.

Для визначення програми проведення тепловізійного дослідження беруться до уваги такі чинники:

- технічні параметри та характеристики тепловізійного обладнання;
- характеристики конструкції будівлі, відповідні типи та місцезнаходження об'єктів тепловізійного дослідження;
- випромінювальні властивості досліджуваних поверхонь;
- кліматичні умови;
- доступність проведення дослідження;
- вплив навколишнього середовища;
- інші важливі чинники.

Умови проведення тепловізійного дослідження, що враховують специфічний клімат та будівельні технології території України:

- 1) тепловізійне дослідження проводять при режимі теплопередачі, що близький до стаціонарного;
- 2) щонайменше 12 год. перед початком дослідження зовнішня температура повітря не повинна змінюватись на значення, більше ніж ± 10 °С від температури на початку контролю за нею;
- 3) щонайменше протягом 24 год. перед початком дослідження і під час дослідження різниця температури повітря з зовнішнього і внутрішнього боків конструкції не повинна бути меншою 10 °С;
- 4) щонайменше протягом 3 год. перед початком дослідження і під час дослідження поверхні не повинні піддаватися впливу прямого чи відбитого сонячного випромінення;
- 5) під час дослідження температура зовнішнього повітря не повинна змінюватись більше ніж на ± 5 °С і температура внутрішнього повітря не більше ніж на ± 2 °С від їх відповідного значення на початку дослідження;
- 6) швидкість вітру не повинна перевищувати 8 м/с та необхідно слідкувати за незмінністю його напрямку;
- 7) відсутність опадів, туману чи задимленості;
- 8) зовнішні віконні та дверні прорізи рекомендовано зберігати у закритому положенні протягом 6 год. до проведення дослідження та під час його, а внутрішні – у фіксованому положенні протягом 3 год.;
- 9) коефіцієнт випромінення поверхні досліджуваного об'єкта повинен бути не менше 0,7;
- 10) поверхня об'єкта вимірювань має перебувати в прямій видимості. Рекомендований кут спостереження між нормаллю до поверхні і оптичною віссю тепловізора 90° . У випадку спостереження великогабаритних будинків допускається відхилення від нормалі до 30° . У цьому випадку оператор за допомогою огляду об'єкта під різними кутами повинен переконатися, що покази тепловізора для кожного виду обстежуваної поверхні змінюються незначно;
- 11) рекомендований час доби для вимірювання з 20.00 до 8.00. В іншому випадку доцільним є наявність значної хмарності;
- 12) відсутність перешкод на шляху від об'єкта до тепловізора;
- 13) обстежувані поверхні повинні бути очищені від бруду, цвілі, криги, снігу та інших нальотів, невластивих досліджуваним матеріалам;
- 14) при можливості обстежувані конструкції повинні бути не менш ніж за добу звільнені від сторонніх предметів для забезпечення максимальної доступності для проведення зйомки;
- 15) віддаленість точок зйомки L (м) від поверхні об'єкта вибирають виходячи з величини найменшого лінійного розміру H (м) досліджуваної ділянки, що визначається за формулою:

$$L \leq \frac{H}{5\Delta\varphi}, \quad (1)$$

де $\Delta\varphi$ – миттєве поле зору тепловізора, яке визначається як лінійний кут зору одного елемента розкладання термограми, рад..

Значення H може бути прийнято рівним:

- при контролі внутрішньої поверхні – від 0,01 до 0,2 м;
- при контролі зовнішньої поверхні – від 0,2 до 1 м.

Дослідження проводиться з фіксованої відстані (тобто відстань до конкретного об'єкта залишається незмінною, навіть при потребі рухатися вздовж нього).

16) поверхні дослідження не повинні піддаватися додатковому тепловому впливу від технічних чи біологічних об'єктів, джерел освітлення. Мінімально припустиме наближення оператора тепловізора до обстежуваної поверхні становить 1 м, електричних ламп розжарювання – 2 м. В іншому випадку додатково проводиться екранування випромінювання перерахованих вище об'єктів за допомогою металізованої плівки. За можливості, джерела теплоти, що впливають на результати обстеження, мають бути відключені до початку обстеження.

17) оптимальна висота тепловізора над рівнем підстилаючої поверхні 1,5 м.

Якщо на результати дослідження окремих об'єктів дослідження істотно впливає фільтрація повітря (наприклад, для визначення параметрів повітропроникності огорожувальних конструкцій та кратності повітрообміну, виявлення повітропроникних дефектів, оцінки енергоефективності, перевірки роботи систем вентиляції), потрібно створювати різницю тиску по обидва боки огорожувальної конструкції, або обстеження проводити в умовах, коли існує різниця тиску не менше 5 Па на місці перевірки (згідно ДСТУ Б EN 13187:2011). Досягнути цього можна при застосуванні аеродверей. Дослідження доцільно проводити з боку меншого тиску.

Якщо дослідження проводиться незважаючи на відхилення від цих вимог до випробувань, це повинно бути враховано при дослідженні та оцінюванні результатів і зазначено у звіті про результати тепловізійного дослідження. При цьому слід пам'ятати, що розшифрування термограм, отриманих за змінних умов, вимагає додаткових знань у будівельній фізиці та експертного оцінювання.

При проведенні тепловізійного дослідження термографування проводять із зовнішньої та внутрішньої сторін огорожувальних конструкцій будівлі та конкретних об'єктів дослідження залежно від мети дослідження.

З метою забезпечення відсутності помилок прив'язки отриманих термограм до місця проведення зйомки та полегшення подальшого аналізу, зйомку проводять у відповідності з наступними правилами:

- будівлю в цілому по порядку знизу вверх та зліва направо за годинниковою стрілкою, починаючи від головного входу;
- кімнати на поверсі – почергово зліва направо за годинниковою стрілкою, починаючи від входу на поверх;
- несучі, огорожувальні та сполучені конструкції – зліва направо, починаючи від входу кімнати;
- окремі об'єкти дослідження – знизу вверх та зліва направо за часовою стрілкою.

Перед проведенням дослідження у разі можливості проводиться повторний огляд архітектурної та іншої конструкторської документації у реальних умовах для остаточного

співставлення із реальними досліджуваними об'єктами та уточнення технічних даних про досліджуваних об'єкт.

Умови проведення тепловізійного дослідження фіксуються у журналі записів результатів тепловізійного дослідження.

Система для сприйняття інфрачервоного випромінення має бути встановлена і відрегульована згідно з інструкціями із застосування. Вибір необхідної точності вимірювань, температурного діапазону та об'єктива потрібно здійснювати так, щоб перекрити передбачуваний діапазон температури поверхні, що обстежується.

Підготовка до проведення дослідження полягає в підключенні тепловізора до автономного джерела живлення (акумулятора) та ручного фокусування оптичної системи.

На досліджуваній поверхні вибирається геометричний репер, яким може бути лінійний розмір відкосу вікна, відстань між стиками панелей огорожувальної конструкції.

Поява чіткого теплового й видимого зображення на моніторі тепловізора свідчить про його готовність до проведення тепловізійної зйомки.

Проводиться загальна оцінка теплового поля будівлі та/або окремих об'єктів дослідження для виділення базових ділянок, за якими проводиться додаткове калібрування.

Перед проведенням тепловізійного дослідження окремих об'єктів проводиться додаткове калібрування тепловізора в робочих умовах, що передбачає визначення нових параметрів калібрувальної функції тепловізора в робочих умовах проведення вимірювань.

При додатковому калібруванні передбачається виконання наступних дій:

1. Нагрівання еталонного площинного сірого випромінювача до трьох різних температур, які визнаються реперними точками додаткового калібрування.
2. Проведення вимірювання потоку випромінення для кожної реперної точки.
3. Формування системи рівнянь для вихідних сигналів трьох реперних точок:

$$\begin{cases} S_1(\lambda, T_{gb_1}) = C \cdot e^{\frac{-C_2}{AT_{gb_1} + B}} \\ S_2(\lambda, T_{gb_2}) = C \cdot e^{\frac{-C_2}{AT_{gb_2} + B}} \\ S_3(\lambda, T_{gb_3}) = C \cdot e^{\frac{-C_2}{AT_{gb_3} + B}} \end{cases}, \quad (2)$$

де C , A , B – параметри калібрувальної функції тепловізора при проведенні додаткового калібрування за реперними точками.

4. Розв'язання системи рівнянь та отримання нових значень параметрів калібрувальної функції тепловізора.

5. Перепрограмування калібрувальної функції тепловізора та проведення вимірювання для конкретного об'єкта дослідження.

В якості контрольних значень коефіцієнта випромінювання при установці налаштувань користувача використовуються дані таблиць, які при загальній оцінці теплового поля будівлі та/або окремих об'єктів дослідження використовуються без перевірки, при якісному тепловізійному обстеженні та кількісному тепловізійному аналізі значення коефіцієнта випромінювання корегується за результатами проведення додаткового калібрування тепловізора безпосередньо перед використанням для дослідження поверхні конкретного

об'єкта. Це найнадійніший спосіб підвищення достовірності вимірювань розподілу температури, адже при зміні калібрувальної функції відбувається імітація основних умов проведення вимірювань та властивостей об'єкта дослідження.

8 ЗАГАЛЬНИЙ ПОРЯДОК ОРГАНІЗАЦІЇ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

У Додатку А зображено загальну схему організації тепловізійного дослідження.

Загальна процедура тепловізійного дослідження представлена у Додатку Б.

У разі відсутності документації при потребі проводять додаткову інвентаризацію із залученням спеціалістів (наприклад, можлива співпраця лабораторії із проектними бюро для розробки чи відновлення таких документів).

9 ПРОВЕДЕННЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

9.1 Проведення якісного тепловізійного обстеження

Проводиться візуальний огляд об'єктів з метою виділення місць із поверхнею покриття чи структурою, відмінними від базових ділянок. Результати візуального огляду можуть служити додатковим показанням для проведення кількісного тепловізійного аналізу.

Проводиться термографування об'єктів дослідження (при потребі з паралельною фотозйомкою) згідно умов, передбачених у пункті 7 даної методики.

У процесі термографічної зйомки кожному знятому кадру присвоюють номер, який з коментарями заносять у журнал.

Якщо передбачається об'єднання термограм для отримання панорамних знімків, термографування проводять з перекриттям не менше 10 % кожної сусідньої термограми.

Кожну годину під час проведення термографування проводяться додаткові вимірювання умов проведення дослідження згідно журналу записів результатів тепловізійного дослідження. Додатково вимірювання проводяться після закінчення термографування. Відхилення вимірюваних значень від допустимих є причиною припинити дослідження або зазначити у звіті про особливий порядок їх врахування (допускається, але не рекомендовано).

Результати, одержані в ході якісного тепловізійного обстеження, вважаються попередніми і достатніми для виявлення аномальних ділянок поверхні досліджуваного об'єкта, їх реєстрації на матеріальних носіях та формування звіту.

Порушення очікуваного розподілу температури досліджуваної ділянки або нехарактерний температурний перепад на термограмах може свідчити про:

- відмінності характеру покриваючої поверхні;
- особливості конструкції;
- наявність аномальних ділянок.

За заявою замовника після інформування його про результати дослідження для визначення й оцінки кількісних характеристик аномальних ділянок, виявлення причин їх появи та визнання дефектними проводимо кількісний тепловізійний аналіз.

9.2 Проведення кількісного тепловізійного аналізу

Кількісний тепловізійний аналіз проводиться за результатами якісного тепловізійного обстеження, виконаного виключно даною лабораторією.

Проведення кількісного тепловізійного аналізу включає повторне виконання умов пункту 7 перед проведенням дослідження.

Проводиться візуальний огляд аномальних ділянок з метою оцінки їх фізичного стану. Результати візуального огляду можуть використовуватися для підкріплення результатів кількісного тепловізійного аналізу.

Проводиться детальне термографування аномальних ділянок об'єктів дослідження (при потребі з паралельною фотозйомкою) згідно умов, передбачених у пункті 7 даної методики.

У процесі термографічної зйомки кожному знятому кадру присвоюють номер, який з коментарями заносять у журнал записів результатів тепловізійного дослідження.

Якщо передбачається об'єднання термограм для отримання панорамних знімків, термографування проводять з перекриттям не менше 10 % кожної сусідньої термограми.

Кожну годину під час проведення термографування проводяться додаткові вимірювання умов проведення дослідження згідно журналу записів результатів тепловізійного дослідження. Додатково проводять вимірювання перед та після термографування окремого об'єкта дослідження. Відхилення вимірних значень від допустимих є причиною припинити дослідження або зазначити у звіті про особливий порядок їх врахування (допускається, але не рекомендовано).

Якщо в процесі кількісного тепловізійного аналізу були виявлені аномальні ділянки, не помічені в ході проведення якісного тепловізійного обстеження, рекомендується провести повторне якісне тепловізійне обстеження поверхонь, що відображені на термограмах, де відмічені дані аномальні ділянки. За умови їх виявлення рекомендовано повторити тепловізійне дослідження спочатку із вивченням чинників виникнення неточностей або уточнити результати окремих термограм. За умови їх відсутності перевірити умови проведення дослідження та параметри налаштування тепловізора. У разі їх правильності провести повторне налаштування тепловізора згідно умов та параметрів проведення кількісного тепловізійного аналізу місця виявлення аномалії та провести повторне якісне тепловізійне обстеження досліджуваного об'єкта, якщо такі налаштування істотно не суперечать його властивостям. У разі відсутності аномалій результати кількісного тепловізійного аналізу визнати хибними, тепловізійне дослідження повторити із додатковим вивченням чинників виникнення неточностей.

Результати, одержані в ході кількісного тепловізійного аналізу, вважаються достатніми для виявлення дефектних ділянок поверхні досліджуваного об'єкта, їх реєстрації на матеріальних носіях та формування звіту.

10 ОПРАЦЮВАННЯ ТЕРМОГРАМИ

Опрацювання термограм проводять для отримання записаного в цифровому вигляді теплового зображення розподілу температури на поверхні конструкції з вищою точністю, ніж це може бути виконано при якісному тепловізійному обстеженні. Такі неточності можуть бути викликані впливними факторами калібрувальної функції для великої за площею неоднорідної досліджуваної поверхні.

Метою опрацювання термограми є перехід від радіаційних температур, що реєструються тепловізором, до істинних температур поверхні, а також позначення аномальних ділянок поверхні об'єкта дослідження. Опрацювання термограми проводимо за

допомогою програмного забезпечення до тепловізора шляхом зміни значень впливних факторів та вхідних параметрів калібрувальної функції.

На опрацьованих термограмах допускається присутність ділянок, температура яких відрізняється від дійсної. Про наявність таких ділянок має бути зазначено у звіті про результати тепловізійного дослідження із зазначенням причини можливих відмінностей. Дані ділянки подальшому аналізу не підлягають.

Інформацію про проведену обробку термограм та отримані результати по корекції температур приводять у звіті про результати тепловізійного дослідження.

Опрацювання термограм також включає побудову панорамних знімків доступними ліцензійними програмними засобами.

11 АНАЛІЗ ТЕРМОГРАМИ

Аналіз термограм – це процедура, спрямована на виявлення аномальних ділянок, оцінку їх кількісних характеристик, виявлення причин їх появи та визнання дефектними.

При аналізі термограм зовнішньої поверхні досліджуваних об'єктів її слід розбивати на ділянки, для яких температурні умови на внутрішній поверхні близькі до постійних (відсутні локальні джерела тепла, помітно впливають на температуру внутрішньої поверхні).

На стадії аналізу використовують оброблені або необроблені термограми для комп'ютерної візуалізації температурних полів на поверхні досліджуваних об'єктів з можливістю виділення окремих ділянок для проведення комп'ютерних оперативних розрахунків перепадів температур, побудови гістограм лінійних і поверхневих розподілів температур.

Кількісними критеріями оцінки якості поверхні досліджуваного об'єкта є температурний перепад та специфіка розподілу температури по поверхні досліджуваної ділянки.

Очікуваний розподіл температури обстежуваних ділянок визначають на підставі розподілу еталонної термограми, змодельованого розподілу, прийнятого за еталонний, або термограми, отриманої з базової ділянки об'єкта дослідження.

Основним кількісним критерієм порівняння різних ділянок поверхні досліджуваних об'єктів є різниця температур в обраній точці на порівняльній і базовій ділянках поверхні:

$$\Delta T = T_{p,q} - T_b, \quad (3)$$

де $T_{p,q}$ – порівнюване точкове значення температури ділянки поверхні об'єкта дослідження; T_b – базове точкове значення температури ділянки поверхні об'єкта дослідження.

Для конкретної ділянки поверхні об'єкта дослідження допустиме значення ΔT для визнання її аномальною та дефектною може істотно коливатися.

Також проводимо порівняння значень нормативних характеристик (за їх визначення у документації) із фактичними: температура ззовні та всередині приміщення, температура зовнішньої та внутрішньої поверхонь об'єкта дослідження для ділянки, визнаної базовою, вологість, перепад температур між температурою в приміщенні та температурою внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції, температура внутрішньої стіни, що повинна бути вищою точки роси тощо.

Для огорожувальних конструкцій використання значення температури внутрішньої поверхні дозволяє ідентифікувати ділянки, де існує ризик появи конденсату або цвілі при

даних умовах. При цьому фактична температура поверхні залежить від температури всередині і зовні на момент обстеження. Ризик появи конденсату або цвілі визначається температурним фактором:

$$f_{inn.} = (T_{inn.}^{min} - T_{ext.}) / (T_{inn.} - T_{ext.}), \quad (4)$$

де $T_{inn.}^{min}$ – мінімальна температура внутрішньої поверхні; $T_{ext.}$ – зовнішня температура повітря; $T_{inn.}$ – температура повітря в приміщенні.

Значення $f_{inn.}$ відображає відношення перепаду температур в конструкції до загального перепаду температур між внутрішньою і зовнішньою температурою повітря.

Критичне значення $f_{inn.}$ для складських приміщень складає 0,3; офісних та торговельних приміщень – 0,5; для житлових приміщень нижній поріг складає 0,75; спортивних залів, кухонь, буфетів, будівель з газовим обігрівом – 0,8; для приміщень з надмірною вологістю (напівпідвальні, з басейнами) – 0,9, щоб попередити утворення надмірного скупчення вологи, появи постійного конденсату та цвілі. Значення $f_{inn.} < 0,3$ допустиме для неопалюваних будівель або із опаленням лише для запобігання обмерзанню внутрішніх конструкцій.

Аналогічний підхід використовується при оцінці температури зовнішньої поверхні при виявленні місць виходу конденсату на цвілі назовні:

$$f_{ext.} = (T_{inn.}^{min} - T_{inn.}) / (T_{inn.} - T_{ext.}). \quad (5)$$

Критичне значення даного показника складає 0,9 для переважної більшості будівель.

Визнання аномальної ділянки поверхні будівлі дефектною відбувається на основі розрахунку температурного індексу:

$$I_{p,q} = (T_{p,q} - T_{ext.}) / (T_{inn.} - T_{ext.}). \quad (6)$$

При $I_{p,q} < 0,6$ – істотний ризик та небезпека для життя; $0,6 < I_{p,q} \leq 0,65$ – потенційна небезпека та ризик для здоров'я; $0,65 < I_{p,q} \leq 0,75$ – явний дефект; $0,75 < I_{p,q}$ – аномальна ділянка визнається такою, що немає відхилень.

Окремий порядок розрахунку температурного індексу передбачений для оцінки дефектів теплозахисної ділянки будівель:

$$I_{th.} = (T_{inn.} - T_{inn.}^{min}) / (T_{inn.} - T_{ext.}). \quad (7)$$

При $0 < I_{th.} \leq 0,255$ – дефект відсутній; $0,255 < I_{th.} \leq 0,476$ – конденсація вологи на внутрішній поверхні огорожувальної конструкції; $0,476 < I_{th.} \leq 1$ – наскрізне промерзання огорожувальної конструкції.

Критичною умовою, за якої виникає необхідність проведення ремонтних робіт, є величина дефектної області.

При пошкодженні теплоізоляції її розмір повинен складати не більше 0,1% досліджуваної площі – це допустима площа дефектної поверхні будівлі в рамках питання контролю якості.

Розмір дефектних ділянок визначається безпосередньо на об'єкті дослідження за допомогою прямих вимірювань металевою рулеткою. За умови відсутності доступу до дефектної ділянки визначення її розмірів здійснюється за допомогою підрахунку пікселів на термограмі та масштабуванням їх розмірів до натурних.

Підсумовуємо площу дефектних ділянок $S_d = \sum_{i=1}^n S_i$ та знаходимо площу досліджуваного об'єкта за його геометричними розмірами S_o . Якщо $S_d \leq S_o/1000$, то стан теплоізоляційного шару об'єкта вважається прийнятним.

Порушення теплоізоляції за результатами аналізу вважають виявленим, якщо виключені інші причини виникнення аномальної ділянки. У випадку, якщо не вдається точно встановити, чи є виявлена аномальна ділянка наслідком порушення теплоізоляції, проводиться пошук можливих їх джерел.

При розташуванні аномальної ділянки в зоні стикового з'єднання стінових панелей або віконного блоку і панелі за заявою замовника проводять розрахунок опору повітропроникності стикового з'єднання згідно ГОСТ 31167-2009 «Здания и сооружения. Методы определения воздухопроницаемости ограждающих конструкций в натуральных условиях».

Оцінювання точності результатів тепловізійного дослідження проводимо за непевністю типу А при n незалежних спостережень в умовно однакових умовах навколишнього середовища:

$$u_A^2(T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i)^2}{n \cdot (n-1)}} \quad \text{при} \quad u_A^2(T) \leq u_{\text{норм.}}^2(T). \quad (8)$$

Також за заявою замовника можливе проведення додаткових розрахунків згідно ДБН та ДСТУ для конкретних об'єктів дослідження, зокрема, визначення точки роси, оцінки відносного опору теплопередачі, розрахунку втрат теплоти та її грошової оцінки тощо.

12 ЗВІТ ПРО РЕЗУЛЬТАТИ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Звіт за результатами тепловізійного дослідження складається у довільній формі, але повинен містити такі пункти:

- 1) повна назва, юридична та фактична адреса організації, що проводила дослідження, дата та час його проведення;
- 2) назва, адреса та коротка характеристика досліджуваного об'єкта;
- 3) мета проведення дослідження;
- 4) висновок про можливість проведення тепловізійного дослідження та його форму згідно даної методики, опис конкретних об'єктів дослідження;
- 5) перелік нормативних документів, програмного забезпечення, контрольно-вимірювального обладнання із вказівкою їх технічних характеристик та доказів метрологічної повірки;
- 6) перелік виконавців тепловізійного дослідження із вказівкою про їх кваліфікаційний рівень та наявність підтверджуючих документів;
- 7) час та попередні умови проведення дослідження й результати їх фіксації протягом дослідження згідно пунктів 7 та 9 даної методики;
- 8) опис базових ділянок;
- 9) інші важливі чинники, що впливають на результати, наприклад, швидка зміна погодних умов;
- 10) перелік будь-яких відхилень від встановлених вимог до дослідження;

- 11) результати опрацювання та аналізу термограм;
- 11) результати додаткових вимірювань і досліджень;
- 12) рекомендації за результатами тепловізійного дослідження;
- 13) дата і підпис.

При складанні звітів за результатами аналізу термограми з виявленими аномальними та дефектними ділянками повинні супроводжуватися їх фотографіями.

При проведенні тепловізійного дослідження будівлі передбачено заповнення форми реєстрації наявності чи відсутності аномалій та дефектів за результатами аналізування термограм (Додаток В).

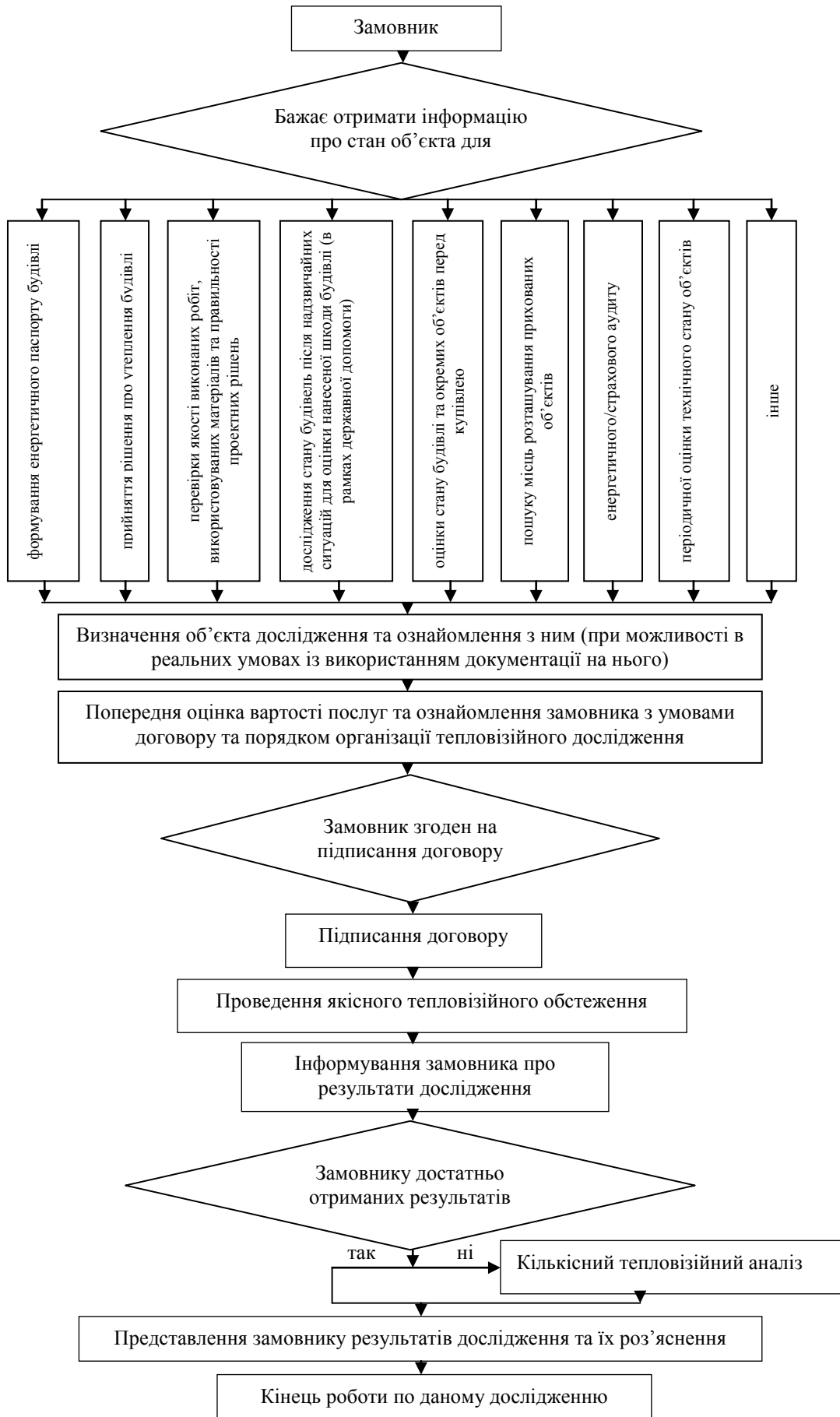


Рисунок 1 – Схема організації тепловізійного дослідження



Рисунок 2 – Загальна процедура тепловізійного дослідження

Таблиця 1 – Форма реєстрації наявності чи відсутності аномалій та дефектів за результатами аналізування термограм

Об'єкт дослідження	Назва аномалії/дефекту	Максимальний перепад температури, характер відображення на термограмі	Підтвердження наявності чи відсутності (+/-)
Теплоізоляції	<ul style="list-style-type: none"> - містки холоду - відсутність теплоізоляції - пошкодження теплоізоляції - місця накопичення вологи - місця появи конденсату - ділянки з пліснявою - порушення технології встановлення дверей та вікон - ділянки надмірної фільтрації повітря - пошкодження елементів конструкції (тріщини, розриви тощо) - інше 		
Інженерні мережі та комунікації	<ul style="list-style-type: none"> - порушення технології монтажу - вихід із ладу окремих елементів системи - перенагрів елементів - пошкодження конструкції системи - засмічення елементів системи - інше 		
Несучі, огорожувальні та сполучені конструкції і конструкції, непередбачені проектною документацією	<ul style="list-style-type: none"> - порушення технологій монтажу - відсутність або пошкодження покриваючих шарів - пошкодження елементів - місця накопичення вологи, появи конденсату чи ділянки з пліснявою - інше 		
Інше	Порушення очікуваного розподілу температури досліджуваної ділянки або нехарактерний температурний перепад		

Додаток К

**Зразок програми навчання персоналу з неруйнівного контролю по
тепловому методу**

**ПРОГРАМА ПІДГОТОВКИ ПЕРСОНАЛУ З НЕРУЙНІВНОГО
КОНТРОЛЮ ПО ТЕПЛОВОМУ МЕТОДУ**

Дана програма призначена для підготовки до сертифікації фахівців НК організацій, що здійснюють роботи з НК по тепловому методу, включаючи тепловізійне дослідження.

Підготовка включає лекції, самостійну роботу і практичну підготовку з використанням обладнання НК.

Програма складається з трьох частин згідно з трьома рівнями кваліфікації персоналу НК й включає окремі теми та практичні заняття для кожного рівня.

Таблиця 1

ТЕПЛОВИЙ КОНТРОЛЬ (ТК) – 1-ИЙ РІВЕНЬ		
Теоретична частина (32 години)		
<i>Тема і час</i>	<i>Пункти</i>	<i>Зміст</i>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Вступ. 2 години</i>	Можливості ТК як методу НК	Основні принципи та методи НК. Місце ТК в НК. Завдання ТК. Приклади проведення ТК об'єктів різних галузей та сфер діяльності.
<i>Фізичні основи проведення ТК. 8 годин</i>	Загальні положення теорії оптичного випромінювання	Основні фізичні величини. Електромагнітний спектр. Поняття енергетичного балансу. Випромінювальні властивості матеріалів (емісійність, трансмісія і відбивання).
	Фізичні закономірності теплового випромінювання	Променевий теплообмін. Коефіцієнти випромінювання та відбивання. Поняття абсолютно чорного тіла. Потужність випромінювання. Закон Кірхгофа. Закони теплового випромінювання: закон Планка, закон Стефана-Больцмана, закон зміщення Віна.
	Основи термографії	Способи вимірювання температури. Історія розвитку термографії та обладнання. Види ТК: активний та пасивний. Різнобічність поняття температури при термографуванні (істинна, виміряна, радіаційна, розрахована, температура фону, температура повітря, температура об'єкта дослідження та оточуючих об'єктів). Впливні фактори термографування: випромінювальні властивості об'єкта дослідження, фонове випромінювання, пропускання проміжного середовища.
<i>Основи нормативного забезпечення з питань проведення ТК. 2 години</i>	Основи міжнародного метрологічного забезпечення	Основи законодавчої метрології у світі та Україні. Міжнародні організації. Організація законодавчої метрології в Україні. Основні діючі документи, їх суть.
	Основи українського метрологічного забезпечення	
<i>Обладнання ТК. 8 годин</i>	Загальні положення Конструктивні особливості	Види термометрів випромінювання. Загальний принцип роботи пірометра та тепловізора. Поняття теплового поля об'єкта дослідження. Типова класифікація тепловізорів. Загальна будова тепловізора. Основні технічні характеристики тепловізорів.

1	2	3
	тепловізора як технічного засобу Основи роботи з тепловізором	Різновиди приймачів випромінення. Болometri. Матриця приймачів випромінення та її розмірність. Загальна характеристики об'єктів та лінз. Ознайомлення із тепловізором на прикладі конкретної моделі, його керівництвом по експлуатації. Основи підготовки до роботи, порядок налаштування. Поняття калібрування та порядок його проведення.
<i>Порядок організації тепловізійного дослідження (ТД). 6 годин</i>	ТК будівель ТК електромеханічного обладнання ТК інших об'єктів дослідження (враховуючи інтереси учасників навчання)	Нормативні документи. Ознайомлення з існуючими методиками.
<i>Проведення ТД. 5 годин</i>	Різновиди ТД Опрацювання результатів ТД	Якісне тепловізійне обстеження. Розпізнавання та види аномалій. Кількісний тепловізійний аналіз. Розпізнавання та види дефектів. Опрацювання та аналізування термограми. Ознайомлення з основами роботи програмного забезпечення до тепловізорів (на конкретному прикладі). Поняття непевності результатів вимірювання температури та градієнта температури. Формування звітів за результатами ТД. Програмне забезпечення для формування звітів. Шаблони звітності. Ведення бази даних.
<i>Перспективи та досягнення сучасного теплобачення. 1 година</i>		
Практична частина (20 годин)		
<i>Заходи безпеки. Інструктаж (1 година)</i>		
<i>Обладнання для практичних занять (1 година)</i>		
Вид роботи (час)	Назва	
<i>Пр. робота 1 (1 год.)</i>	Налаштування обладнання.	
<i>Пр. робота 2 (2 год.)</i>	Врахування впливних факторів ТД.	
<i>Пр. робота 3 (2 год.)</i>	ТК будівлі.	
<i>Пр. робота 4 (2 год.)</i>	ТК електромеханічного обладнання (на конкретному прикладі за вибором учасників навчання).	
<i>Пр. робота 5 (5 год.)</i>	Опрацювання та аналізування отриманих термограм. Заповнення типової звітності.	
<i>Проект (6 год.)</i>	ТД конкретного об'єкта (за вибором учасника навчання).	

ТЕПЛОВИЙ КОНТРОЛЬ (ТК) – 2-Й РІВЕНЬ		
Теоретична частина (32 години)		
Тема і час	Пункти	Зміст
1	2	3
<i>Вступ. 1 година</i>	Можливості ТК як методу НК	Місце ТК в НК, поєднання методів НК, визначення порядку їх використання. Приклади проведення ТК об'єктів різних галузей та сфер діяльності в якості профілактичного та діагностичного методу.
<i>Фізичні основи проведення ТК. 5 годин</i>	Загальні положення теорії оптичного випромінювання	Типи хвиль. Характеристики коливань (частота, період, амплітуда, фаза). Докладний аналіз інфрачервоного (ІЧ) діапазону. Одиниці вимірювання потужності випромінювання. Співвідношення між температурою та потужністю. Аналіз способів передачі тепла (теплопровідність, випромінювання, конвекція).
	Фізичні закономірності теплового випромінювання	Різновиди абсолютно чорних тіл. Коефіцієнти випромінювання, пропускання та відбивання у законі Кірхгофа. Закони теплового випромінювання: закон Планка, закон Стефана-Больцмана, закон зміщення Віна. Їх виведення та взаємозв'язок. Порядок їх застосування при реальних вимірюваннях. Закон охолодження Ньютона.
	Основи термографії	Температурні шкали і перетворення. Абсолютна та відносна температури. Особливості контактного та безконтактного вимірювання температури. Особливості активного та пасивного ТК. Закон Фур'є. Функція перетворення та інтерполяційне рівняння Сакума-Хаттори. Особливості визначення та врахування впливних факторів термографування: випромінювальні властивості об'єкта дослідження, фонове випромінювання, пропускання проміжного середовища.
<i>Нормативне забезпечення з питань проведення ТК. 5 годин</i>	Міжнародні документи	Діючі нормативні документи, їх суть. Основи організації роботи з нормативним забезпеченням.
	Українські документи	
<i>Обладнання ТК. 8 годин</i>	Загальні положення	Класи і переваги контактних термометрів. Класи і переваги безконтактних термометрів. Принцип роботи тепловізорів різних типів. Вимірювання температури та градієнта температури. Визначення розподілу температури. Розширена класифікація тепловізорів.
	Конструктивні особливості тепловізорів різних типів	Будова тепловізорів різних типів. Критерії вибору тепловізорів за їх технічними характеристиками. Принцип роботи різних типів приймачів випромінювання. Особливості підбору об'єктів. Фільтри та їх характеристики. Вибір фільтрів для конкретних умов та об'єктів дослідження.
	Організація роботи з тепловізором	Організація підготовки до роботи, розробка порядку налаштування та вибору додаткового обладнання, приладів та матеріалів. Види калібрування матриці приймачів випромінювання. Організація процедури калібрування тепловізора. Методи підвищення точності результатів вимірювання та їх вибір при конкретних дослідженнях.
<i>Порядок організації тепловізійного дослідження. 6 годин</i>	ТК будівель	Нормативні документи. Вибір або розробка методики проведення дослідження. Процедура розробки методики проведення дослідження.
	ТК електромеханічного обладнання	
	ТК інших об'єктів дослідження (враховуючи інтереси учасників навчання)	

1	2	3
Проведення ТД. 5 годин	Різновиди ТД	Організація якісного тепловізійного обстеження. Розпізнавання та види аномалій, їх визнання. Організація кількісного тепловізійного аналізу. Розпізнавання та види дефектів, їх визнання. Типові помилки організації ТД.
	Опрацювання результатів ТД	Порядок організації процедури опрацювання та аналізування термограм. Типові помилки опрацювання та аналізування термограм. Загальні засади організації роботи з програмним забезпеченням до тепловізорів. Визначення непевності результатів вимірювання температури та градієнта температури. Формування бюджету непевності. Формування звітів за результатами ТД (включаючи програмне формування розширених звітів), проведення оцінки та інтерпретації результатів ТД, формування рекомендацій щодо усунення аномалій та дефектів. Створення шаблонів звітності. Організація роботи бази даних. Контроль результатів роботи термографіста I категорії.
Перспективи та досягнення сучасного теплобачення. 2 години		Динамічна тепловізія. Відеотермографування. Моделювання теплових процесів. Використання нейронних мереж при ТД. Інше.
		Практична частина (20 годин)
<i>Заходи безпеки та обладнання для практичних занять (1 година)</i>		
Вид роботи (час)	Назва	
<i>Пр. робота 1 (2 год.)</i>	Калібрування матриці ПВ.	
<i>Пр. робота 2 (2 год.)</i>	Калібрування тепловізора та вибір методів підвищення точності результатів ТД.	
<i>Пр. робота 3 (2 год.)</i>	Пошук та розпізнавання аномалій та дефектів.	
<i>Пр. робота 4 (2 год.)</i>	Аналіз типових помилок організації ТД.	
<i>Пр. робота 5 (3 год.)</i>	Опрацювання та аналізування термограм. Формування звітності для кінцевого користувача.	
<i>Проект (8 год.)</i>	Розробка методики ТД для конкретного об'єкта (за вибором учасника навчання). Проведення за нею ТД.	

ТЕПЛОВИЙ КОНТРОЛЬ (ТК) – 3-Й РІВЕНЬ		
Теоретична частина (32 години)		
Тема і час	Пункти	Зміст
1	2	3
<i>Вступ. 1 година</i>	-	Суміжні види контролю. ТК у наукових дослідженнях.
<i>Фізико-математичні основи моделювання теплових процесів. 4 години</i>	Математична інтерпретація процесів ТК	Типові рівняння теплових процесів. Визначення оптимальних параметрів ТК.
	Моделювання процесів ТК	Загальні підходи до моделювання теплових процесів. Види програмного забезпечення.
<i>Перспективні методи термографії. 8 годин</i>	Методи активної термографії	Загальні положення. Математичний апарат. Програмне забезпечення.
	Методи пасивної термографії	
<i>Технічне забезпечення ТК. 2 години</i>	Загальні положення	Інформація про сучасну апаратуру за останні 5 років.
	Новітніх технологій ТК	Мобільні програмні додатки для ІЧ термографії. Сучасне випробувальне устаткування. Програмне забезпечення для управління даними і формування звітів.
	Оснащення процесу	Підходи до вибору оптимального обладнання.
<i>Тепловізійне дослідження та законодавча база. 2 години</i>	-	Розуміння та трактування галузевих стандартів і специфікацій. Результати термографії як законний доказ оцінювання стану теплового поля об'єкта дослідження. Роль термографіста як свідка-експерта. Формування звітності для забезпечення їх юридичної сили.
<i>Програма ТК. 4 години</i>	-	Ключові елементи успішної програми ІЧ термографії. Процес створення програми ІЧ термографії. Процедури звітності та створення шаблонів звітності. Основи «інтелектуального» обслуговування програми ТК.
<i>Організація процедури сертифікації персоналу. 8 годин</i>	Стандартизація порядку сертифікації	Міжнародні організації, асоціації, об'єднання, що займаються питаннями сертифікації. Нормативні документи з питань сертифікації. Існуючі програми сертифікації з неруйнівного контролю. Вимоги до процедури сертифікації. Визначення критеріїв сертифікації.
	Робота центру із сертифікації	Основи організації роботи центру із сертифікації. Досвід існуючих центрів. Вимоги до систем управління якістю. Документообіг центру сертифікації. Вивчення зразкових навчальних програм та їх наповнення. Розробка письмових практик термографістів усіх рівнів.
<i>Просування досліджень ТК як сфери бізнесу. 2 години</i>	Основні тенденції галузі	Перспективні можливості для бізнесу. Основи організації підприємницької діяльності з питань проведення ТК. Планування та управління. Розподіл бюджету. Вивчення можливостей електронної комерції для збільшення доходів.
	Маркетингові питання	Основні принципи маркетингу. Аналіз сучасних досліджень стану ринку послуг НК. Ключові елементи ефективного позиціонування в Інтернет-мережі. Організація роботи із замовником.
	Передові досягнення питань ефективного просування бізнесу	Аналіз передового досвіду ефективного просування бізнесу. Методології розрахунку окупності. Інтегрування термографії в систему управління якістю. Основні принципи аналізування та вирішення поточних проблем. Перспективність використання RCFA. Способи скорочення витрат часу. Позиціонування термографії через PDM-підхід. Основи організації PDM-системи.

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
<i>Заходи безпеки. 1 година</i>	Загальні положення	Організація роботи згідно вимог безпеки. Вибір безпечних методів проведення дослідження об'єктів підвищеної небезпеки. Організація нагляду за технічними засобами. Організація налагодження, оцінювання стану й роботи, ремонту технічних засобів. Формування календаря калібрувань та повірок. Контроль роботи термографістів усіх рівнів кваліфікації.
	Стандарти, що регламентують вимоги щодо безпеки	Розгляд основних стандартів. Розробка інструктажів з техніки безпеки. Розробка посадових інструкцій.
Практична частина (20 годин)		
<i>Заходи безпеки та обладнання для практичних занять (1 година)</i>		
<i>Вид роботи (час)</i>	<i>Назва</i>	
<i>Пр. робота 1 (2 год.)</i>	Моделювання поширення теплового поля при використанні джерел нагрівання.	
<i>Пр. робота 2 (2 год.)</i>	Проведення натурних експериментів за результатами моделювання.	
<i>Пр. робота 3 (2 год.)</i>	Формування звітності за результатами експериментів.	
<i>Пр. робота 4 (4 год.)</i>	Розробка письмової практики сертифікації в області термографії з використанням стандартів ASNT.	
<i>Проект (9 год.)</i>	Розробка програми ІЧ термографії.	

Додаток Л

Акти про впровадження результатів дисертаційної роботи

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Директор
 ТОВ СЦ «Харків-прилад»
 Петриченко Г.І.
 « 5 » серпня 2016 р.



АКТ
 про впровадження результатів дисертаційної роботи
 на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
 аспіранта Національного університету «Львівська політехніка»
 Дзіковської Юлії Миколаївни

Комісія у складі завідувача метрологічною лабораторією Пушкарьова В.Г. та інженера метрологічної лабораторії Калініченко В.С. склала даний акт про те, що теоретичні дослідження дисертаційної роботи аспіранта Дзіковської Ю.М. та їх результати було використано на ТОВ СЦ «Харківприлад» при проведенні калібрування термометра випромінення, вимірюванні температури та градієнта температури за допомогою тепловізора Raytek Ti20.

Розроблені в дисертаційній роботі аспіранта Дзіковської Ю.М. методика калібрування термометра випромінення в робочих умовах експлуатації та конструкція сірого площинного випромінювача дозволяють підвищити точність вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням шляхом визначення значень температури випромінення фону, коефіцієнта пропускання проміжного середовища та коефіцієнта випромінення поверхні. Для реалізації методики запропоновано використання двох спектральних діапазонів $8\div 10$ мкм та $8\div 14$ мкм.

ТОВ СЦ «Харківприлад» зацікавлено у впровадженні запропонованої аспірантом Дзіковською Ю.М. методики для калібрування тепловізорів у робочих умовах експлуатації. Розроблена методика може бути використана для вимірювання температури та градієнта температури як для дослідження теплового поля промислових об'єктів так і для медичних досліджень розподілу температури тіла людини.

Завідувач метрологічної лабораторії
 ТОВ СЦ «Харків-прилад»
 Пушкарьов В.Г.



Інженер метрологічної лабораторії
 Калініченко В.С.



« 5 » серпня 2016 р.

ЗТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»

Доц. Давидчак О.Р.

"12" січня 2017 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес

*Дзиковської Юлії Миколаївни***«Нормативно-технічне забезпечення вимірювань розподілу температури теплового поля об'єктів промисловості та медицини»**представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю
05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення

Комісія Національного університету «Львівська політехніка» у складі:

Голова комісії – голова науково-методичної ради інституту комп'ютерних технологій та метрології, д.т.н., проф. Байцар Р.І.

Члени комісії: професор кафедри «Метрологія, стандартизація та сертифікація», д.т.н., проф. Походило Є.В., доцент кафедри «Метрологія, стандартизація та сертифікація», к.т.н., доц. Куць В.Р., асистент кафедри «Метрологія, стандартизація та сертифікація», к.т.н. Здеб В.Б.

Даний акт підтверджує, що проведені дисертанткою наукові дослідження виконувалися на кафедрі метрології, стандартизації та сертифікації Національного університету «Львівська політехніка». Основні положення та результати дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес кафедри «Метрологія, стандартизація та сертифікація» Національного університету «Львівська політехніка», зокрема використання методики оцінювання непевності вимірювання температури та градієнта температури поверхні об'єктів за інфрачервоним випромінювання та основ методу вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випромінюванням шляхом врахування значень впливних факторів, зокрема застосовуються для підвищення рівня підготовки фахівців напрямку 6.051002 Метрологія, стандартизація та сертифікація при вивченні дисциплін «Контроль та діагностування технологічних процесів» й «Основи метрологічного забезпечення».

Голова комісії,
голова науково-методичної ради ІКТА
д.т.н., проф.

(підпис)

Байцар Р.І.

(прізвище та ініціали)

Члени комісії:
проф. каф. МСС,
д.т.н., проф.
доц. каф. МСС,
к.т.н., доц.
асистент каф. МСС,
к.т.н.

(підпис)

Походило Є.В.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Куць В.Р.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Здеб В.Б.

(прізвище та ініціали)