

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Кафедра Інформаційно-вимірювальних технологій

УДК 681.121

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Тема: Дослідження якості теплоізоляції споруд
тепловізійним методом
(назва згідно з наказом ректора)

Спеціальність 175 – Інформаційно-вимірювальні технології
(код і назва спеціальності)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

MP.MTTM-05.00.00.000 ПЗ
(позначення)

Студент

MTTM-23-2 Шумило В.С.
(шифр групи) (підпис) (дата) (розшифровка
підпису)

Керівник проекту

доц. Винничук А.Г.
(посада) (підпис) (дата) (розшифровка
підпису)

Консультант з нормоконтролю

доцент _____
(посада) (підпис) (дата) (розшифровка
підпису)

Допускається до захисту Завідувач кафедри

професор Середюк О.Є.
(посада) (підпис) (дата) (розшифровка
підпису)

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інформаційних технологій

Кафедра ІВТ

Спеціальність 175-Інформаційно-вимірювальних технологій

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри ІВТ

Середюк О.Є.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Студенту Шумило Василь Степанович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема проекту Дослідження якості теплоізоляції споруд тепловізійним методом

затверджена наказом по університету від « » 2024р. № /

2. Термін здачі студентом закінченого проекту 02.10.2024 р.

3. Вихідні дані до проекту: Тип пристрою – тепловізор FLIRB400 для тепловізійного обстеження будівель; інтервал температур: від -20°C до +120°C; точність: +2°C або +2% від абсолютної температури (у °C) повторюваність: +1°C або +1% від абсолютної температури (у °C).

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить розробити)

1. Аналіз інформаційно-вимірювальних систем з тепловізійним контролем

2. Дослідження тепловтрат будівель із застосуванням тепловізійного методу

3. Вибір та метрологічний аналіз технічного забезпечення для тепловізійного контролю будівель

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Класифікація методів оптичної пірометрії.

2. Класифікація приймачів інфрачервоного випромінювання.

3. Узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною матрицею.

4. Тепловтрати через вікно у залежності від швидкості вітру.

5. Точність тепловізійних вимірювань температури в залежності від різних комбінацій коригуючих параметрів.

6. Схема накопичення похибки результату тепловізійного контролю

6. Консультанти по проекту із зазначенням розділів, що їх стосуються.

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

Керівник

Особистий підпис Винничук А.Г.
Розшифровка підпису

Завдання прийняв до виконання

Особистий підпис Шумило В.С.
Розшифровка підпису

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер і назва етапів курсового проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1. Аналіз інформаційно-вимірювальних систем з тепловізійним контролем		
2. Дослідження тепловтрат будівель із застосуванням тепловізійного методу		
3. Вибір та метрологічний аналіз технічного забезпечення для тепловізійного контролю будівель		

Студент

Особистий підпис Шумило В.С.
Розшифровка підпису

Керівник проекту

Особистий підпис Винничук А.Г.
Розшифровка підпису

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 64 с., 49 рис., 7 табл., 12 джерел, 6 аркушів графічного матеріалу.

Об'єкт дослідження – процес здійснення тепловізійного контролю споруд.

Мета роботи полягає у дослідженні методів та засобів тепловізійного контролю якості теплоізоляції споруд.

У даній магістерській роботі розглянуто технічне забезпечення за допомогою якого можна провести термографічний аналіз теплоізоляції споруд.

Проаналізовано основні типи приймачів тепловізорів, встановлено зв'язок між типом приймача і об'єктом контролю. Приведені характеристики тепловізорів які використовуються для контролю теплоізоляції споруд і критерії їх вибору. Оцінено сумарну похибку тепловізійного контролю, і її складові.

ВИПРОМІНЮВАННЯ, СПОРУДА, ТЕПЛОВІЗОР, МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, ПОХИБКА.

THE ABSTRACT

Master's thesis: 64 p., 49 figures, 7 tables, 12 sources, 6 sheets of illustrations.

The object of study is the the process of thermal inspection of structures.

The goal of the work is to investigate methods and means of thermal imaging quality control of buildings.

In this master's thesis the technical support by which thermographic analysis of thermal insulation of structures can be carried out is considered.

The basic types of receivers of thermal imagers are analyzed, the connection between the type of the receiver and the object of control is established. The characteristics of thermal imagers used to control the thermal insulation of structures and the criteria for their selection are given. The total error of thermal imaging control and its components are estimated.

RADIATION, BUILDING, THERMALIZER, METROLOGICAL
CHARACTERISTICS, ERROR.

ЗМІСТ

Вступ	6
1 Аналіз інформаційно-вимірювальних систем з тепловізійним контролем.....	7
1.1 Порівняльна характеристика методів пірометрії.....	7
1.2 Основні принципи будови та класифікація тепловізорів.....	18
1.3 Область застосування тепловізорів	23
2 Дослідження тепловтрат будівель із застосуванням тепловізійного методу...	28
2.1 Аналіз основних причин та джерел тепловтрат будівель	28
2.2 Дистанційне дослідження тепловтрат будівель тепловізійним методом...	30
2.3 Методика тепловізійного контролю теплоізоляції	38
3 Вибір та метрологічний аналіз технічного забезпечення для тепловізійного контролю будівель	44
3.1 Класифікація похибок вимірювання	44
3.2 Практичні аспекти вибору технічного забезпечення для тепловізійного обстеження будівель	46
3.3 Обробка результатів тепловізійного обстеження	51
3.4 Метрологічний аналіз технічного забезпечення для тепловізійного контролю споруд	52
Висновки	59
Перелік посилань на джерела.....	60

ВСТУП

Актуальність теми. Метод тепловізійного контролю якості теплоізоляції огороджуючих конструкцій дозволяє здійснювати тепловізійний контроль якості ізоляції і герметичності будівлі, виявити ділянки підвищеного вмісту вологи та провести випробування огорожувальних конструкцій будівель: зовнішніх стін, покриттів, перекриттів над проїздами, холодними підпідлоговими і підвалами, воріт і дверей у зовнішніх стінах, а також віконних блоків та інших огорожувальних конструкцій, що розділяють приміщення з різними температурно-вологісними умовами.

Об'єкт дослідження – процес здійснення тепловізійного контролю споруд.

Задачі дослідження. В тепловізійному обстеженні головне завдання перевірити і спрогнозувати стан житлового приміщення і виявити величезну кількість недоліків: в теплоізоляції, опалювальних системах, інженерних конструкціях, електропроводки, встановити причину високої вологості або сухості повітря.

Методи дослідження: аналіз теоретичних знань, порівняння різних типів тепловізійних систем, дослідження результатів тепловізійної зйомки.

Наукова новизна. Вперше обґрунтований перелік параметрів і характеристик тепловізійних систем, що однозначно і достатньо визначають узагальнені параметри тепловізійних приладів. Удосконалена математична модель тепловізійних систем, яка враховує взаємозалежні фізичні процеси: формування зображення на поверхні піроелектричної мішені; формування температурного рельєфу мішені; зчитування відеосигналу.

Практичне значення даної магістерської роботи - використання запропонованого переліку параметрів, характеристик і похибок, які мають місце при проведенні енергоаудиту за допомогою тепловізійних приладів дозволяє робити атестацію засобів тепловізійного контролю за якісними показниками на етапах моделювання і конструювання.

1 АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ З ТЕПЛОВІЗІЙНИМ КОНТРОЛЕМ

1.1 Порівняльна характеристика методів пірометрії

Існуючі на сьогоднішній день методи пірометрії можна класифікувати за двома параметрами: принципом сприйняття випромінювання в певному спектральному діапазоні і кількості робочих спектральних каналів. Загальна класифікація представлена на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Класифікація методів оптичної пірометрії

Сучасні засоби вимірювання температури за випромінюванням можна охарактеризувати наступними параметрами:

- загальний діапазон вимірювання температури - від -40°C до $+100000^{\circ}\text{C}$;
- час вимірювання - від 0,1 до 10,0 с;
- показник візування - від 1/2 до 1/200;
- спектральний діапазон робочих довжин хвиль - від 0,6 до 14 мкм;

- межі основної похибки вимірювань температури - від 0,1 до 2,5%.

В результаті розвитку теорії пірометрії кожен з методів, представлених на рис.1.1, охоплює значну кількість локальних методів, що розрізняються способом обробки інформації потоку випромінювання поверхні досліджуваного об'єкта. Розглянемо існуючі методи пірометрії.

Методи монохроматичної пірометрії, базуються на вимірюванні монохроматичної яскравості випромінювання одним, двома або кількома спектральними каналами, утворення їх різних комбінацій і прирівнювання до аналогічних комбінаціям яскравості АЧХ при тій же температурі. Особливістю одноканальної монохроматичної пірометрії є необхідність використання апріорної інформації про значення коефіцієнта випромінювання поверхні досліджуваного об'єкта. Методи двоканальної монохроматичної пірометрії використовуються з метою зменшення похибки від відсутності або неточності інформації про значення коефіцієнта випромінювання досліджуваної поверхні і коефіцієнта пропускання атмосфери.

Методи широкосмугової пірометрії, базуються на співвідношенні 1.1. Залежно від спектрального інтервалу, заданого оптичним каналом і параметрами приймача випромінювання, вони поділяються на інтегральні та широкоспектральні одно- і двоканальні методи.

$$U(\lambda, T) = k \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \psi(\lambda, T) \cdot L(\lambda, T) d\lambda ; \quad (1.1)$$

де $U(\lambda, T)$ - вихідний сигнал приймача випромінювання; k - коефіцієнт передачі; $\psi(\lambda)$ - апаратна функція; $L(\lambda, T)$ - Спектральна енергетична яскравість; λ_1, λ_2 - довжина хвилі.

Для порівняння існуючих методів вимірювання температури на основі випромінювання необхідно провести їх аналіз шляхом порівняння точності визначення ними термодинамічної температури. Це доцільно провести шляхом зіставлення відповідних інструментальних та відповідних методичних похибок визначення температури різними методами.

Завдяки впровадженню в пірометрах структурних методів підвищення точності і мікропроцесорної техніки, досягнуті значення інструментальної складової похибки порядку 0,1%. Але на практиці точність вимірювання температури за випромінюванням залишається низькою, що й обумовлює обмежене застосування пірометрів в промисловості. Причиною цього є високі значення методичної складової похибки за випромінюванням і похибка експериментатора.

У дослідженнях, похибка від відсутності достовірної інформації про значення коефіцієнта випромінювання поверхні об'єкта, впливу фонового випромінювання і проміжної середовища може складати сотні градусів. Відомі методи визначення коефіцієнта випромінювання і зменшення методичної складової похибки, які використовуються на практиці, дозволяють визначити значення коефіцієнта випромінювання з досить великою похибкою (до 5-10%), що відповідним чином визначає невисоку точність вимірювання термодинамічної температури пірометром в реальних умовах виробництва.

Значний негативний вплив на точність вимірювання має похибка експериментатора, обумовлена факторами, представленими в табл.3.1. Це зумовлює необхідність підвищення рівня автоматизації у визначенні або зменшення впливу факторів, що викликають методичну похибку вимірювання за випромінюванням, - а значить використання методів багатоканальної пірометрії, що дозволяє зменшити вплив невизначеності коефіцієнта випромінювання досліджуваної поверхні і коефіцієнта пропускання проміжного середовища на результати вимірювання температури.

Рівняння похибки можна отримати з рівнянь $T = f(\varepsilon_i, \lambda_i, T_{ум})$ шляхом розкладання в ряд Тейлора аргументів $\varepsilon_i, \lambda_i, T_{ум}$:

$$\Delta_T \cong \frac{\partial f}{\partial X_1} \Delta_1 + \frac{\partial f}{\partial X_2} \Delta_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial X_n} \Delta_n + \Delta_m, \quad (1.2)$$

де Δ_m - складова методичної похибки.

Вираз, який описує інструментальну складову похибки від інтенсивності потоку випромінювання, має вигляд:

$$\Delta T_{\text{ин}} = K_{\text{ин}} \cdot \sum_{i=1}^n k_i \cdot \frac{\Delta I_i}{I_i}, \quad (1.3)$$

де $K_{\text{ин}}$ - коефіцієнт передавання інструментальної складової похибки вимірювання температури.

Слід зазначити, що часто в літературі поняттям "методична похибка вимірювання температури" називають різницю між оберненими значеннями умовної та дійсної температури або ж різниця між умовною і термодинамічною температурами. Однак ці вирази можуть бути названі відповідно коефіцієнтом і поправкою на похибку методу визначення умовної температури даним методом пірометрії. Для порівняння точності вимірювання температури різними методами використати похибку методу визначення умовної температури не доцільно, оскільки вона характеризує лише ступінь наближення умовної температури до значення термодинамічної температури і не показує точність визначення термодинамічної температури даним методом. Вираз складовою методичної похибки температури за випромінюванням визначається сумою часткових похідних виразу визначення термодинамічної температури за цим методом по ε_i , λ_i . Вираз для розрахунку методичної складової похибки має вигляд:

$$\Delta T_{\text{мет}} = K_{\text{мет}} \cdot \left(\sum_{i=1}^n m_i \cdot \frac{\Delta \varepsilon_i}{\varepsilon_i} + \sum_{i=1}^n p_i \cdot \frac{\Delta \lambda_i}{\lambda_i} \right) \quad (1.4)$$

де $K_{\text{мет}}$ – коефіцієнт передавання методичної складової похибки вимірювання температури.

Одноканальна пірометрія має високу інструментальну точність одноканальної монохроматичної пірометрії. Значення похибки зменшується зі збільшенням робочої довжини хвилі і зростанням температури в діапазоні від 500 до 1500 ° K і при 10 відсотковій зміні спектральної інтенсивності випромінювання не перевищує 0,5% (рис.1.2).

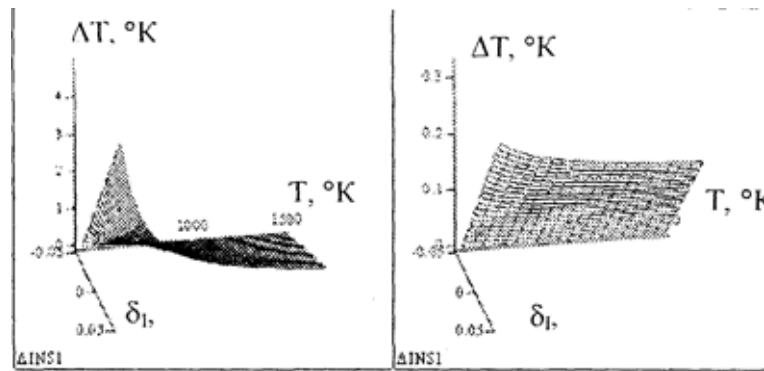


Рисунок 1.2 - Температурна залежність інструментальної складової похибки одноканальної монохроматичної пірометрії від зміни спектральної інтенсивності випромінювання: а) - робоча довжина хвилі λ_p 2 мкм, б) - робоча довжина хвилі λ_p 14 мкм

Вагомі значення має методична похибка вимірювання температури, викликана неточністю інформації про значення та зміни робочої довжини хвилі і коефіцієнта випромінювання. Складова методичної похибки від λ має мінімальні значення порядку кілька градусів в короткохвильовій області спектра і росте з температурою і робочою довжиною хвилі (рис.1.3).

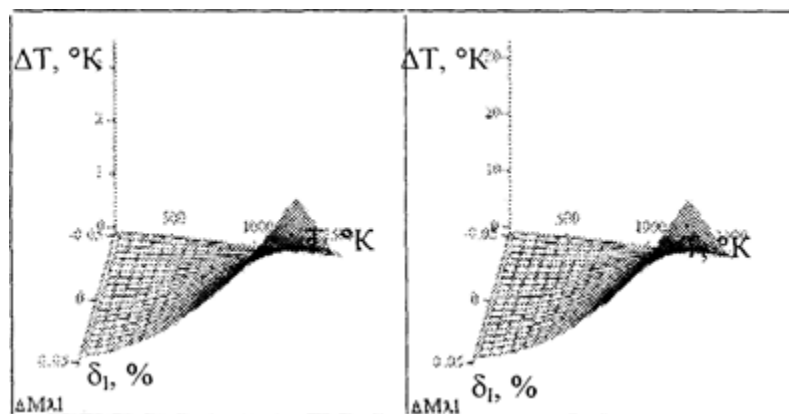


Рисунок 1.3 - Температурна залежність методичної складової похибки одноканальної монохроматичної пірометрії щодо зміни значення довжини хвилі: а - робоча довжина хвилі λ_p 2 мкм; б - робоча довжина хвилі λ_p 14 мкм

Але основний негативний вплив на точність монохроматичної одноканальної пірометрії має методична складова похибки, викликана неточністю інформації про значення коефіцієнта випромінювання об'єкта, яка різко зростає із зростанням температури і робочою довжиною хвилі (рис.1.4).

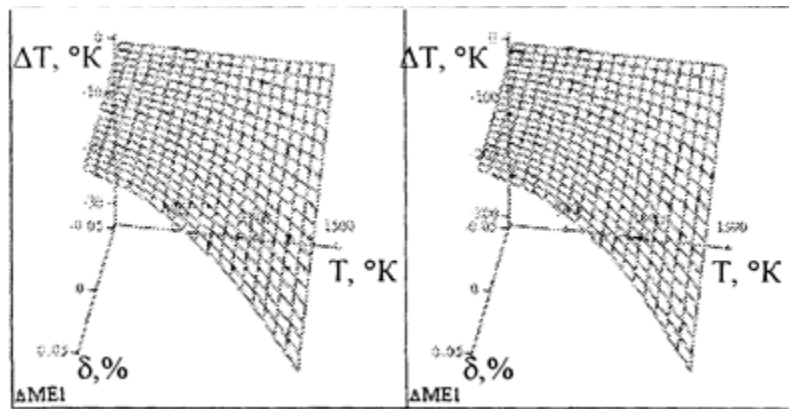


Рисунок 1.4 - Температурна залежність складової методичної похибки одноканальної монохроматичної пірометрії щодо зміни значення коефіцієнта випромінювання: а - робоча довжина хвилі λ_p 2 мкм; б - робоча довжина хвилі λ_p 14 мкм

Тому, метод одноканального пірометра доцільно застосовувати для вимірювання температури в діапазоні температур від 500 до 1500 ° К лише в короткохвильовій області спектру при високих значеннях коефіцієнта випромінювання досліджуваної поверхні, де похибка вимірювання температури не перевищуватиме 5%. Недоліками даного методу вважаються необхідність апріорної інформації про випромінювальні характеристики поверхні об'єкта, залежність похибки вимірювання від точності визначення коефіцієнта випромінювання досліджуваної поверхні.

Таблиця 1.1 – Класифікація похибок вимірювання температури по випромінюванню

Методи пірометрії	Значення інструментальної складової похибки	Значення методичної складової похибки
Метод монохроматичної одноканальної пірометрії		
Метод співставлення	$\frac{C_2}{\lambda \cdot \ln(I)^2} \cdot \frac{\Delta I}{I}$	$-\frac{T_{\lambda}^2 \cdot C_2 \cdot \lambda}{(T_{\lambda} \cdot \lambda \cdot \ln(\varepsilon) + C_2)^2} \cdot \left[\ln(\varepsilon) \cdot \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right]$
Метод монохроматичної двоканальної пірометрії		
Кореляційний метод	$\frac{C_2}{\Lambda_{\text{вк}} \cdot \ln(I_1 I_2)^2} \cdot \left[\frac{\Delta I_1}{I_1} + \frac{\Delta I_2}{I_2} \right]$	$-\frac{T_{\text{вк}}^2 \cdot C_2 \cdot \Lambda_{\text{вк}}}{(T_{\text{вк}} \cdot \Lambda_{\text{вк}} \cdot \ln(\varepsilon_1 \varepsilon_2) + C_2)^2} \cdot \left[\ln(\varepsilon_1 \varepsilon_2) \cdot \frac{\Delta \Lambda_{\text{вк}}}{\Lambda_{\text{вк}}} + \frac{\Delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{\Delta \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \right]$
Метод спектральног	$\frac{C_2}{\Lambda_{\text{св}} \cdot \ln(I_2 / I_1)^2} \cdot \left[\frac{\Delta I_2}{I_2} - \frac{\Delta I_1}{I_1} \right]$	$\frac{T_{\text{св}}^2 \cdot C_2 \cdot \Lambda_{\text{св}}}{(-T_{\text{св}} \cdot \Lambda_{\text{св}} \cdot \ln(\varepsilon_2 / \varepsilon_1) + C_2)^2} \cdot \left[\ln(\varepsilon_2 / \varepsilon_1) \cdot \frac{\Delta \Lambda_{\text{св}}}{\Lambda_{\text{св}}} - \frac{\Delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{\Delta \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \right]$

о відношення		
Степеневий метод	$\frac{C_2(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_2 \lambda_1 \cdot (\ln(I_2/I_1) + \alpha \ln(\lambda_2/\lambda_1))^2} \cdot \left[\frac{\Delta I_1}{I_1} - \frac{\Delta I_2}{I_2} \right]$	$\frac{1}{\left(\frac{1 - \lambda_2 \lambda_1 \cdot (\ln(\varepsilon_2/\varepsilon_1) + \alpha \ln(\lambda_2/\lambda_1))}{C_2(\lambda_2 - \lambda_1)} \right)^2} \cdot \left[\frac{\lambda_2 \lambda_1}{C_2(\lambda_2 - \lambda_1)} \left(\frac{\Delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} - \frac{\Delta \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \right) - A \frac{\Delta \lambda_1}{\lambda_1} - B \frac{\Delta \lambda_2}{\lambda_2} \right]$
Метод монохроматичної багатоканальної пірометрії		
Метод подвійного спектрального відношення	$\frac{2C_2 \Delta \lambda^2}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \cdot (\ln(I_2^2/I_1 I_3))^2} \cdot \left[\frac{\Delta I_1}{I_1} - \frac{2\Delta I_2}{I_2} + \frac{\Delta I_3}{I_3} \right]$	$\frac{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3}{2C_2 \Delta \lambda^2 \cdot \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \ln(\varepsilon_2^2/\varepsilon_1 \varepsilon_3))^2}{C_2 \Delta \lambda^2} \right)} \cdot \left[\left(\frac{\Delta \lambda_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta \lambda_2}{\lambda_2} + \frac{\Delta \lambda_3}{\lambda_3} \right) \cdot \ln(\varepsilon_2^2/\varepsilon_1 \varepsilon_3) - \frac{\Delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{\Delta \varepsilon_2}{\varepsilon_2} - \frac{\Delta \varepsilon_3}{\varepsilon_3} \right]$
Універсальний метод ПСВ	$\frac{C_2 \lambda_3 \lambda_4 (\lambda_2 - \lambda_1) - \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_4 - \lambda_3)}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \cdot \left(\ln \left(\frac{I_2 I_3}{I_1 I_4} \right) \right)^2} \cdot \left[\frac{\Delta I_1}{I_1} - \frac{\Delta I_2}{I_2} - \frac{\Delta I_3}{I_3} + \frac{\Delta I_4}{I_4} \right]$	$\frac{1}{\left(\frac{1 - \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \lambda_4 \cdot \ln(\varepsilon_2 \varepsilon_3) - \ln(\varepsilon_1 \varepsilon_4)}{C_2 \lambda_3 \lambda_4 (\lambda_2 - \lambda_1) - \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_4 - \lambda_3)} \right)^2} \cdot \left[-C \frac{\Delta \lambda_1}{\lambda_1} - D \frac{\Delta \lambda_2}{\lambda_2} - E \frac{\Delta \lambda_3}{\lambda_3} - F \frac{\Delta \lambda_4}{\lambda_4} - H \frac{\Delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} + K \frac{\Delta \varepsilon_2}{\varepsilon_2} + L \frac{\Delta \varepsilon_3}{\varepsilon_3} - M \frac{\Delta \varepsilon_4}{\varepsilon_4} \right]$

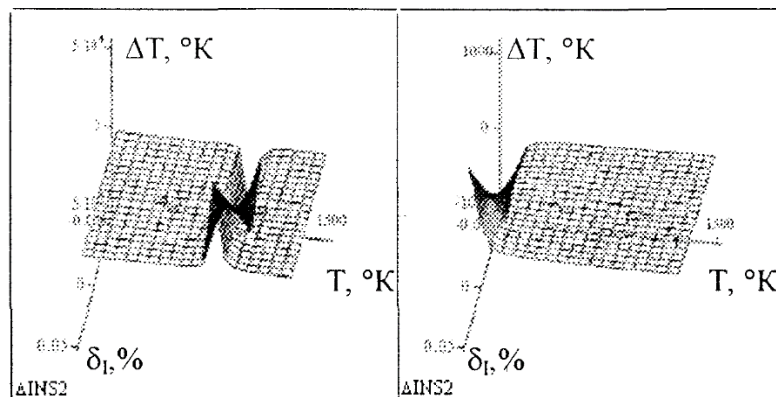


Рисунок 1.5 - Температурна залежність інструментальної складової похибки двоканальної монохроматичної пірометрії (взаємнокореляційний метод) від зміни I : а) – $\lambda_{p1} = 2$ мкм, $\lambda_{p2} = 4$ мкм, б) – $\lambda_{p1} = 12$ мкм, $\lambda_{p2} = 14$ мкм

Методи двоканальної пірометрії слід застосовувати для деяких температурних діапазонів, оскільки є ділянки діапазону температур, де інструментальна складова похибки зростає (рис.1.6 та 1.7).

Аналогічною є тенденція із методичною складовою похибки від λ в короткохвильовій області спектру (рис.1.8).

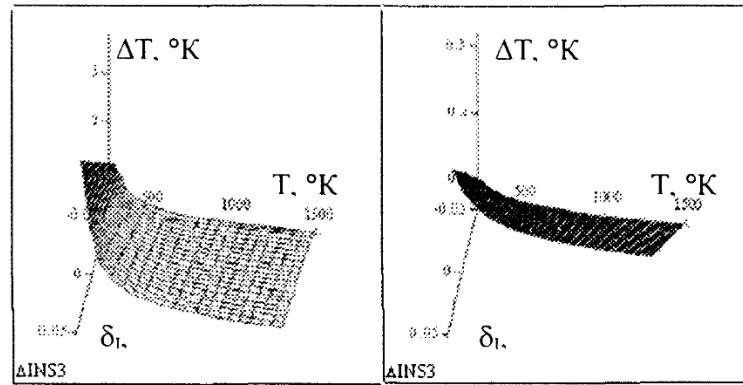


Рисунок 1.6 - Температурна залежність інструментальної складової похибки двоканальної монохроматичної пірометрії (метод спектрального відношення) від зміни λ : а) – $\lambda_{p1} = 2$ мкм, $\lambda_{p2} = 4$ мкм, б) – $\lambda_{p1} = 12$ мкм, $\lambda_{p2} = 14$ мкм

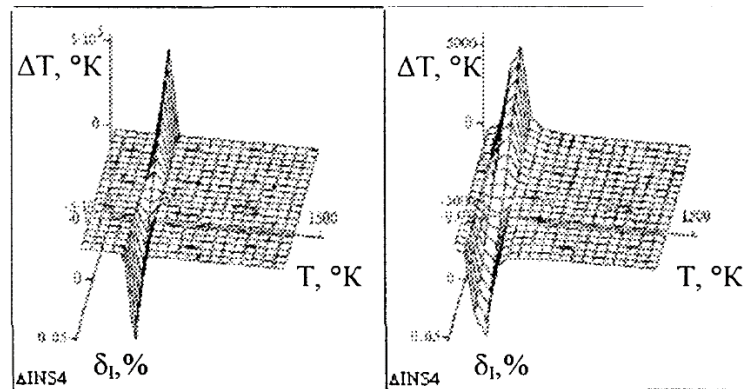


Рисунок 1.7 - Температурна залежність інструментальної складової похибки двоканальної монохроматичної пірометрії (степеневий метод) від зміни λ : а) – $\lambda_{p1} = 2$ мкм, $\lambda_{p2} = 4$ мкм, б) – $\lambda_{p1} = 12$ мкм, $\lambda_{p2} = 14$ мкм

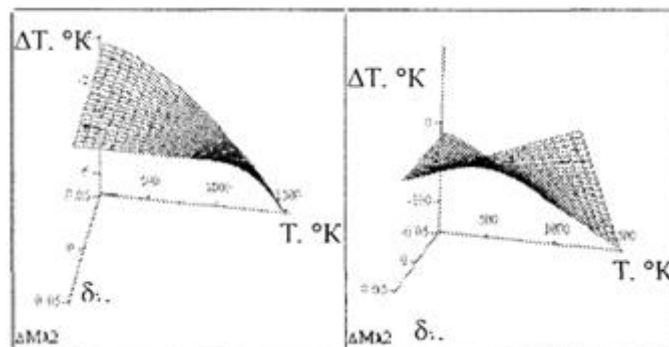


Рисунок 1.8 - Температурна залежність методичної складової похибки від зміни λ двоканальної монохроматичної пірометрії (взаємнокореляційний метод): а) – $\lambda_{p1} = 2$ мкм, $\lambda_{p2} = 4$ мкм, б) – $\lambda_{p1} = 12$ мкм, $\lambda_{p2} = 14$ мкм

Для довгохвильової області спектру в діапазоні температур 1000..1500 інструментальна похибка може прямувати до нуля тільки при схожості каналів (рис. 1.14).

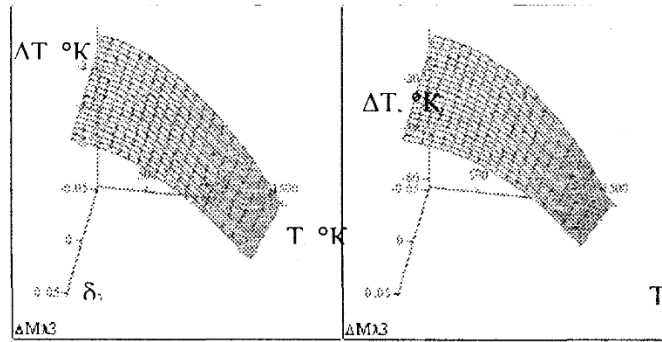


Рисунок 1.9 - Температурна залежність методичної складової похибки від зміни λ двохканальної монохроматичної пірометрії (метод спектрального відношення):

а) - $\lambda_{p1} = 2$ мкм, $\lambda_{p2} = 4$ мкм, б) - $\lambda_{p1} = 12$ мкм, $\lambda_{p2} = 14$ мкм

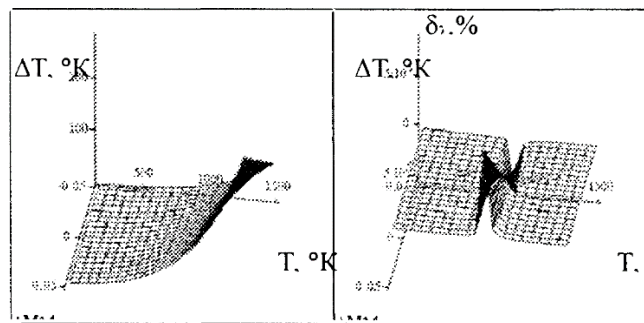


Рисунок 1.10 - Температурна залежність складової методичної складової похибки від зміни λ двохканальної монохроматичної пірометрії (ступеневий метод): а) - $\lambda_{p1} = 2$ мкм, $\lambda_{p2} = 4$ мкм, б) - $\lambda_{p1} = 12$ мкм, $\lambda_{p2} = 14$ мкм

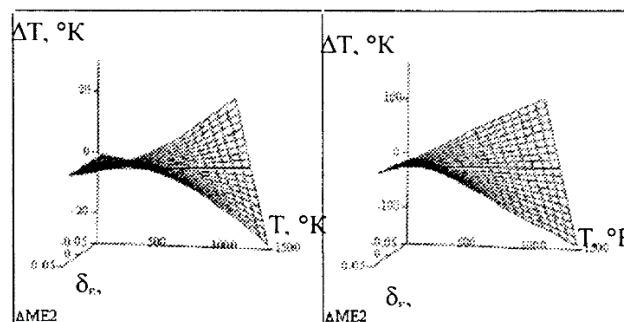


Рисунок 1.11 - Температурна залежність методичної складової похибки від зміни ϵ двохканальної монохроматичної пірометрії (метод спектрального відношення): а) - $\lambda_{p1} = 2$ мкм, $\lambda_{p2} = 4$ мкм, б) - $\lambda_{p1} = 12$ мкм, $\lambda_{p2} = 14$ мкм

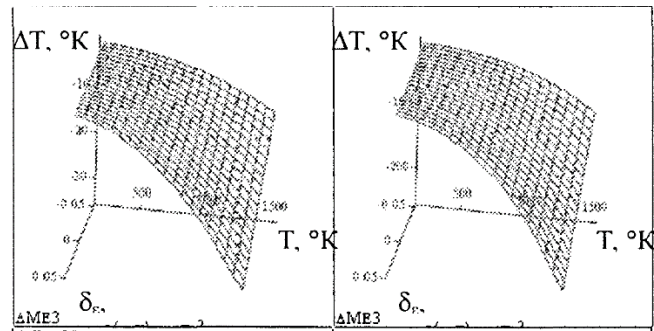


Рисунок 1.12 - Температурна залежність складової методичної складової похибки від зміни ε двохканальної монохроматичної пірометрії (взаємнокореляційний метод): а) – $\lambda_{p1} = 2$ мкм, $\lambda_{p2} = 4$ мкм, б) - $\lambda_{p1} = 12$ мкм, $\lambda_{p2} = 14$ мкм

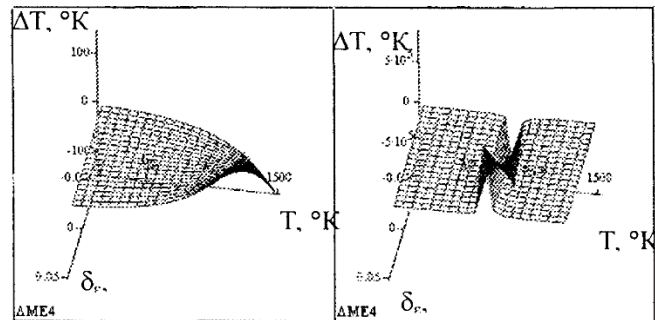


Рисунок 1.13 - Температурна залежність методичної складової похибки від зміни ε двохканальної монохроматичної пірометрії (ступеневий метод): а) – $\lambda_{p1} = 2$ мкм, $\lambda_{p2} = 4$ мкм, б) - $\lambda_{p1} = 12$ мкм, $\lambda_{p2} = 14$ мкм

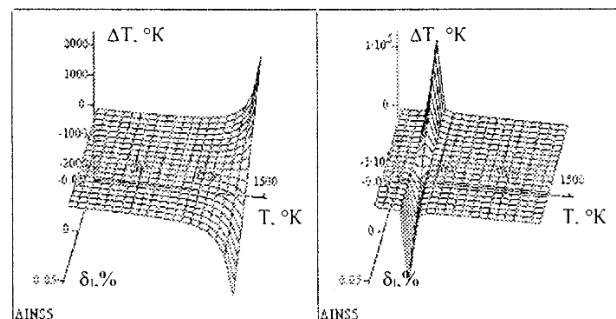


Рисунок 1.14 - Температурна залежність інструментальної складової похибки від зміни I багатоканальної монохроматичної пірометрії (метод ПСВ): а) – $\lambda_{p1} = 2$ мкм, $\lambda_{p2} = 4$ мкм, $\lambda_{p3} = 6$ мкм, б) - $\lambda_{p1} = 10$ мкм, $\lambda_{p2} = 12$ мкм, $\lambda_{p3} = 14$ мкм

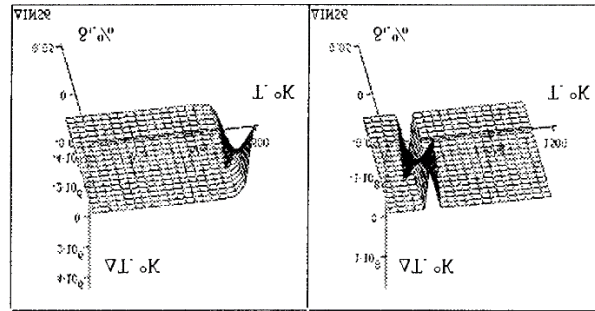


Рисунок 1.15 - Температурна залежність інструментальної складової похибки від зміни λ багатоканальної монохроматичної пірометрії (універсальний метод ПСВ): а) – $\lambda_{p1} = 2$ мкм, $\lambda_{p2} = 4$ мкм, $\lambda_{p3} = 6$ мкм, б) – $\lambda_{p1} = 10$ мкм, $\lambda_{p2} = 12$ мкм, $\lambda_{p3} = 14$ мкм

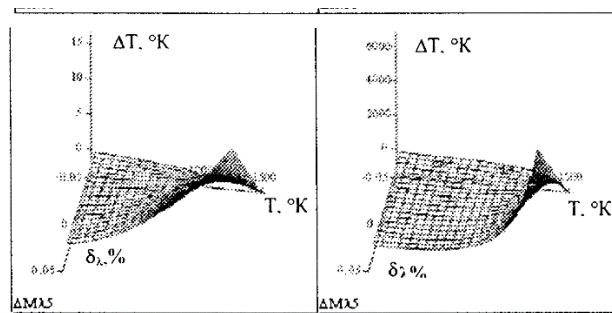


Рисунок 1.16 - Температурна залежність методичної складової похибки від зміни λ багатоканальної монохроматичної пірометрії (метод ПСВ): а) – $\lambda_{p1} = 2$ мкм, $\lambda_{p2} = 4$ мкм, $\lambda_{p3} = 6$ мкм, б) – $\lambda_{p1} = 10$ мкм, $\lambda_{p2} = 12$ мкм, $\lambda_{p3} = 14$ мкм

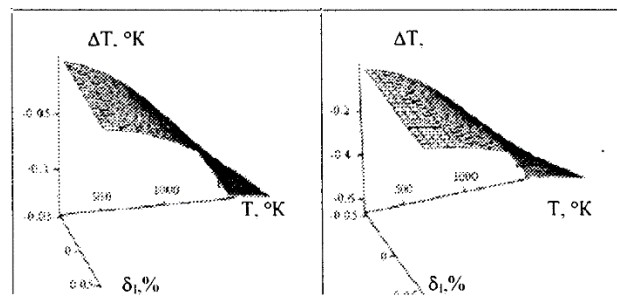


Рисунок 1.17 - Температурна залежність методичної складової похибки від зміни λ багатоканальної монохроматичної пірометрії (універсальний метод ПСВ): а) – $\lambda_{p1} = 2$ мкм, $\lambda_{p2} = 4$ мкм, $\lambda_{p3} = 6$ мкм, б) – $\lambda_{p1} = 10$ мкм, $\lambda_{p2} = 12$ мкм, $\lambda_{p3} = 14$ мкм

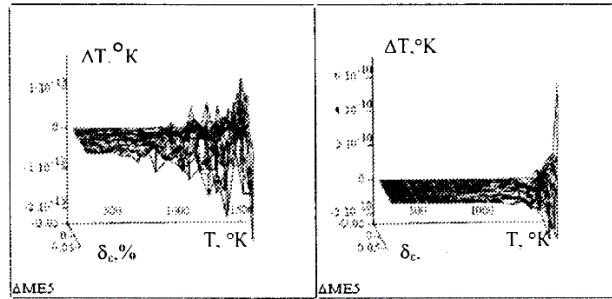


Рисунок 1.18 - Температурна залежність методичної складової похибки від зміни ε багатоканальної монохроматичної пірометрії (метод ПСВ): а) – $\lambda_{p1} = 2$ мкм, $\lambda_{p2} = 4$ мкм, $\lambda_{p3} = 6$ мкм, б) – $\lambda_{p1} = 10$ мкм, $\lambda_{p1} = 12$ мкм, $\lambda_{p2} = 14$ мкм

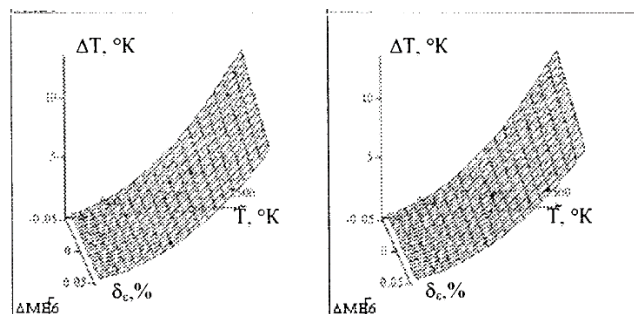


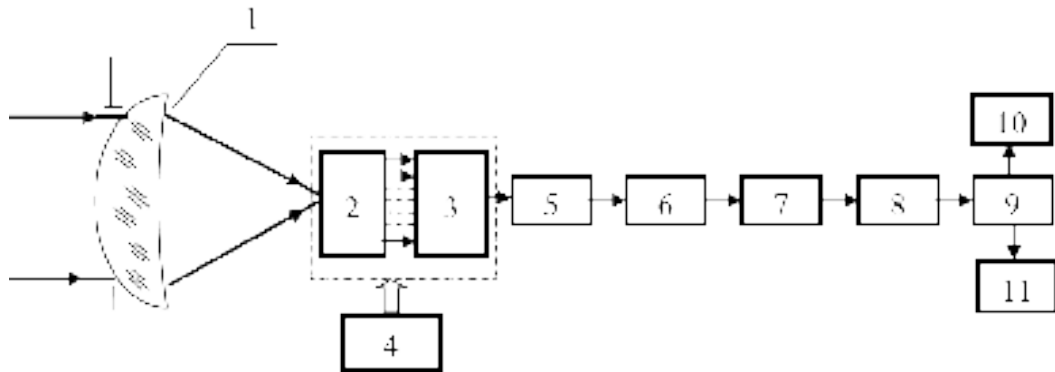
Рисунок 1.19 - Температурна залежність методичної складової похибки від зміни ε багатоканальної монохроматичної пірометрії (універсальний метод ПСВ): а) – $\lambda_{p1} = 2$ мкм, $\lambda_{p2} = 4$ мкм, $\lambda_{p3} = 6$ мкм, б) – $\lambda_{p1} = 10$ мкм, $\lambda_{p1} = 12$ мкм, $\lambda_{p2} = 14$ мкм

1.2 Основні принципи будови та класифікація тепловізорів

Тепловізор має просту будову, він складається з об'єктива, тепловізійної матриці (чутливий елемент) та електронного блоку обробки сигналу. Матриця тепловізора є ґраткою мініатюрних детекторів, які сприймають інфрачервоні сигнали та перетворюють їх на електричні імпульси, які в свою чергу перетворюються у відеосигнал.

Тепловізори поділяють на дві групи: з охолоджуваною та з неохолоджуваною матрицею.

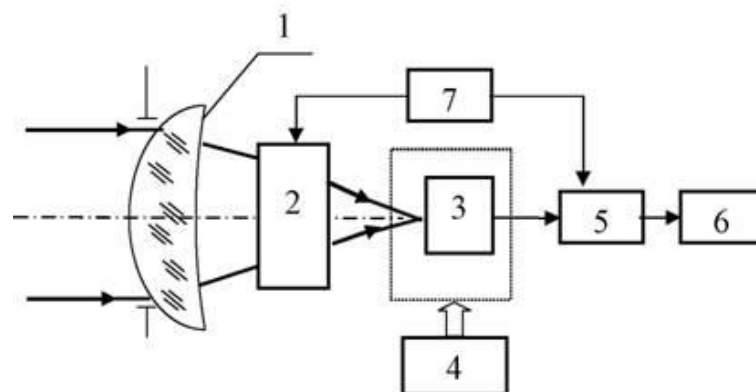
На рис. 1.23 приведено узагальну функціональну схему тепловізора із фокальною ІК-матрицею.



1 - оптична система; 2 - фокальна матриця із підсилювачами; 3 - мультиплексор; 4 - система охолодження; 5 - коректор неоднорідності характеристик чутливих елементів; 6 - аналого-цифровий перетворювач; 7 - цифровий коректор неоднорідності; 8 - коректор; 9 - формувач зображення; 10 - дисплей; 11 - цифровий вихід.

Рисунок 1.23 - Узагальнена функціональна схема тепловізора з фокальною матрицею

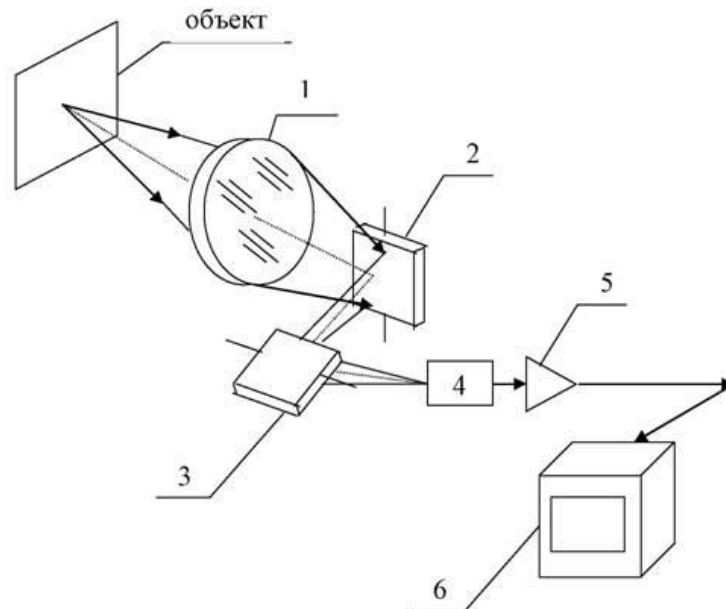
На рис.1.24 подана узагальнена функціональна схема тепловізора з системою(ОМС).



1 - оптична система; 2 - блок оптико - механічного сканування; 3 - приймач випромінювання; 4 - система охолодження; 5 - електронний тракт; 6 - відеоконтрольний пристрій; 7 - система синхронізації.

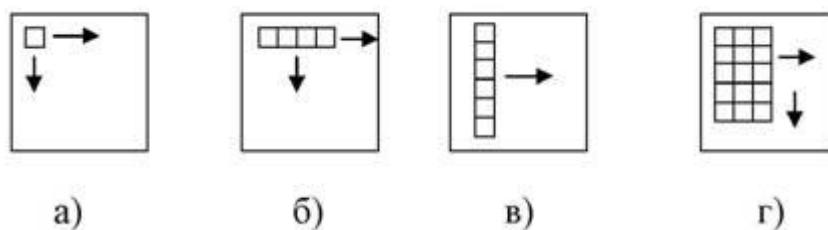
Рисунок 1.24 - Узагальнена функціональна схема скануючого тепловізора

Система ОМС, в загальному випадку, повинна забезпечувати огляд простору предметів - сканування, як у напрямку рядків (по горизонту), так і по кадру (у вертикальному напрямку), що ілюструється рис. 1.25.



1 - об'єктив; 2 і 3 - скануючі дзеркала; 4 - приймач випромінювання;
5 -електронний тракт; 6 - відеоконтрольний пристрій.

Рисунок 1.25 - Функціональна схема тепловізора із скануванням по рядках та кадру



а) - сканування одноелементним ПВ ; б) - послідовне сканування рядом чутливих елементів;
в) - паралельне сканування рядом чутливих елементів; г) паралельно - послідовне сканування матричним ПВ.

Рисунок 1.26 - Методи сканування

При паралельному скануванні чи розгортці майданчики ПІ або СД, виконані у вигляді рядка, вони орієнтовані перпендикулярно до напрямку руху візирної осі.

У відповідності до найбільш доцільних поєднань різних типів сканування, опрацювання сигналів і розгортки, тепловізійні прилади будують на основі

наступних основних принципів: паралельне сканування, паралельне опрацювання відеосигналів та паралельна розгортка.

Паралельне сканування, паралельна обробка сигналів з подальшим їх перетворенням (мультиплексацією) для виведення зображення на ТВ-монітор (рис.1.9).

Майже вся тепловізійна техніка фактично забезпечує належну оцінку температури для кожного пікселя на екрані, і оскільки зображення зазвичай зберігаються у форматі 12 або 14 бітних файлів.

Тим не менш, зображення має зберігатися в цифровому форматі, зазвичай JPG, PNG, TIFF або BMP, з яким просто працювати в подальшому. Після збереження термограми треба вказати фільтр, за допомогою якого проводилась обробка реального зображення. Цей спектр кольорів називають графічною палітрою.

Є ряд палітр, які використовуються для відображення знімків зроблених за допомогою тепловізійних камер: сіра, синьо-червона, змінна, високо-контрастна і жовта. Кожна палітра передає температуру за допомогою певного кольору, в холодні відтінки при нижчій температурі (зазвичай темні кольори) і в теплі відтінки при вищій температурі (зазвичай більш світлі кольори).

Хоча сіра палітра не може запропонувати більшу ступінь контрасту між аналогічними температурами, це проста, природна шкала відображення температури, де чорний низька температура, білий найбільша температура і сірі забезпечують градієнт температури між ними.

На рисунку нижче можна побачити фотографію, зображену за допомогою 5 різних палітр. Лінійні графіки справа фотографій зображають інтенсивність шкали температурного градієнта. Всі палітри порівнянні в правому нижньому графіку, щоб показати, як ці палітри по-різному передають інтенсивність кольору.

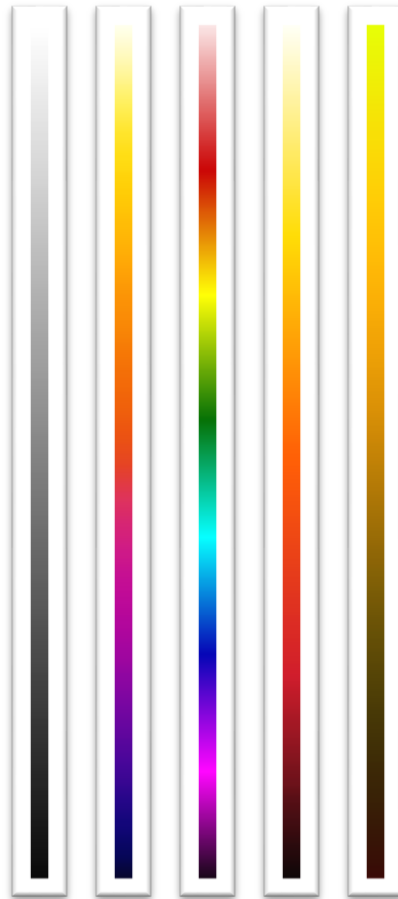


Рисунок 1.27 – Палітри для відображення термограм

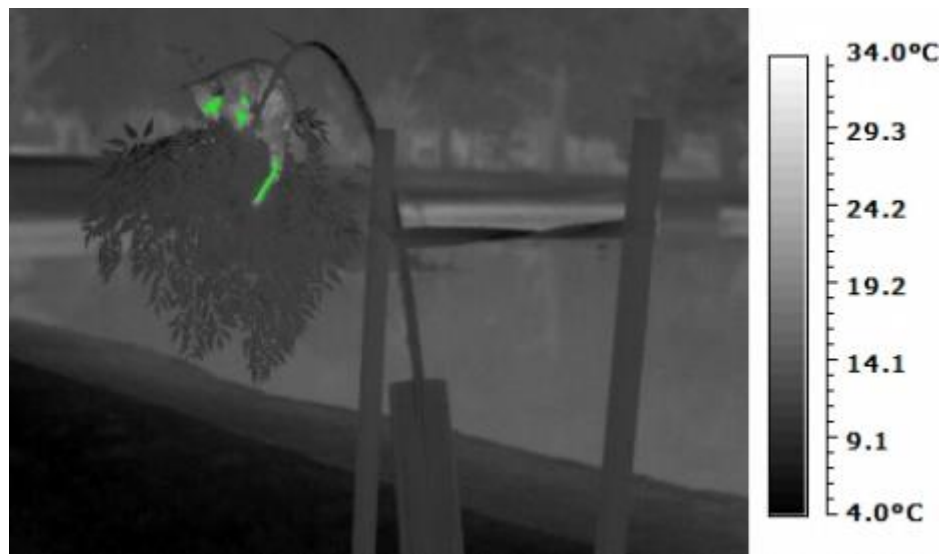


Рисунок 1.28 – Відображення термограми за допомогою сірої палітри

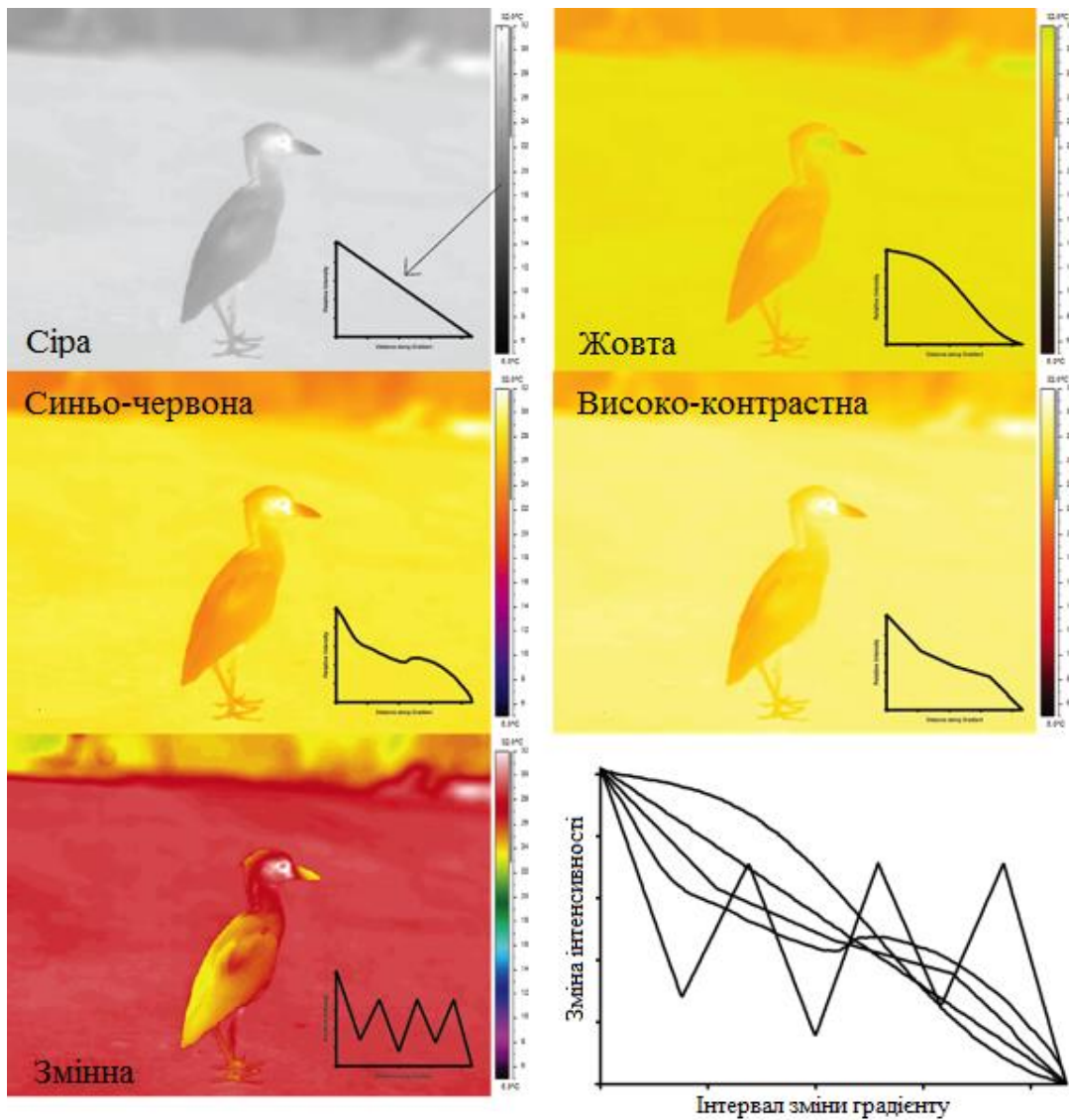


Рисунок 1.29 – Вигляд фотографії обробленої різними палітрами

Різні палітри відображають різну ступінь лінійності і нелінійності зміни інтенсивності. Відтінки сірого градієнта зображають монотонне зменшення інтенсивності, як і слід було очікувати для ахроматичної палітри.

1.3 Область застосування тепловізорів

Тепловізори застосовують для контролю стану технологічних об'єктів та процесів у різних галузях науки та промисловості.

Область застосування тепловізорів є, наприклад, енергоаудит, будівництво споруд та машинобудування, хімічна промисловість, та ін. Із

застосуванням тепловізора можна швидко визначити передумови виникнення та факт наявності дефектів у нафто- та газо- проводах, теплотрасах, водопроводах, електричних мережах.

Основні вимоги до сканувальних тепловізійних систем наведено в табл.1.2.

Таблиця 1.2 - Вимоги до параметрів ТС

Показник	Галузь	Військова Справа	Медицина	Радіоелект- роніка	Енергетика	Будівництво
Спектральний діапазон, мкм		3-13	3-5	3-12	8-12	8-12
Температурний діапазон, °С		-40...+100	+20... +50	+10...+100	-40...+300	-40...+300
МРРТ, °С		0,2	0,1	1	1	0,5
Гранична просторова роздільна здатність		1 мрад	1 мм	15 мкм	1 мрад	2 мрад
Фокусна віддаль		Велика	мала	<0,5 м	велика	велика
Мінімальний розмір зображення, ел-тів		200x120	200x150	200x150	200x100	200x100
Тип зображення		Динамічне	статичне	статичне	статичне	статичне

Приклади застосування тепловізорів:

1. Будівництво будинків та котеджів:

- виявлення порушень теплоізоляції та інших теплових втрат;
- виявлення дефектів стиківконструкції, тріщин, дефектів теплоізоляційних, ділянок інфільтрації води, місць обривів арматур, ділянок пізнього ремонту.

2. Енергетика:

- тепловізійний моніторинг мереж електропередач;
- виявлення дефектних з'єднань комутаційних апаратів;
- виявлення засмічення теплообмінників;
- виявлення проблем з теплоізоляцією турбін чи трубопроводів.

Впровадження сучасних енергозберігаючих технологій, будь то системи управління технологічними процесами або ізоляційні матеріали, в першу чергу має базуватися на точній діагностиці неполадок.

Сьогодні в будівельній індустрії застосовується безліч нових матеріалів і технологій теплоізоляції, застосування яких дозволяє знизити теплові витрати

на обігрів будівель. Як показує практика, в слідстві дефектів в теплоізоляції можуть виникати значні теплові втрати в споруді. (Близько 20-30%). У той час як, відсутність дефектів дозволяє зниження енергоспоживання на 10-12%.

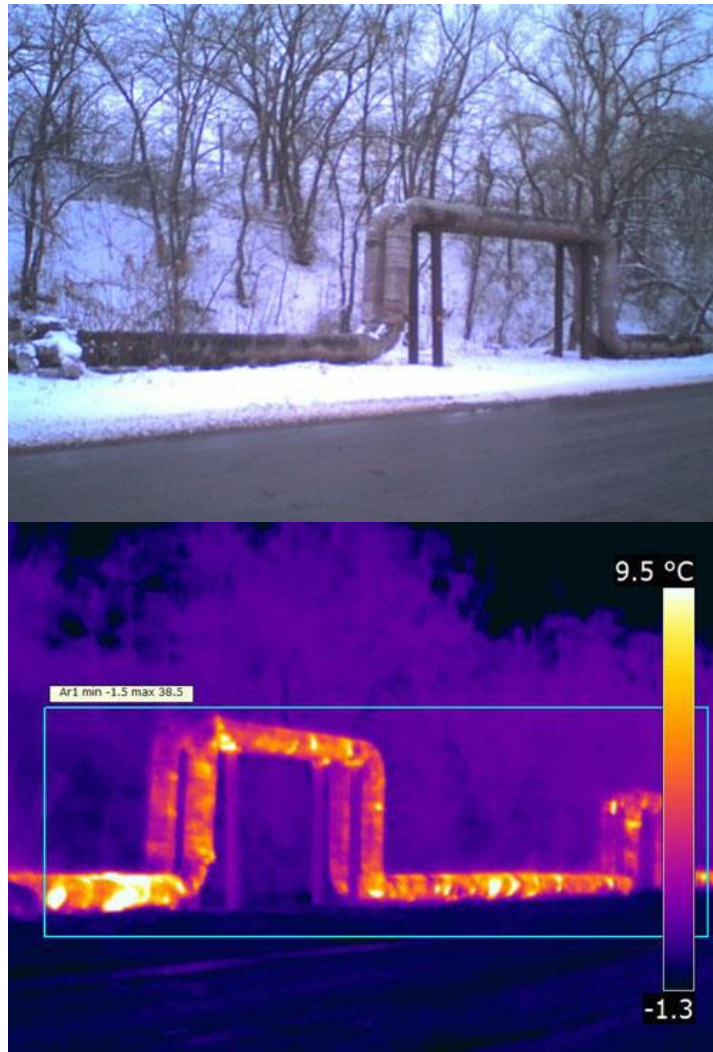


Рисунок 1.32 - Теплотраса гарячої води

3. Енергозбереження:

- енергоаудит об'єктів;
- діагностика огорожуючих конструкцій;
- визначення теплоізоляційних властивостей матеріалів;
- виявлення теплових втрат внутрішніх приміщень та зовні будинків і споруд.

4. Хімічна промисловість:

- контроль температури продуктів хімічної переробки;

- перевірка герметичності ізоляції ємкостей для зберігання різноманітних рідин та газів.

У хімічній промисловості перед тепловізором стоять наступні завдання: визначення рівня рідини в резервуарі із шкідливими речовинами, діагностування герметичності та ізоляції ємкостей для зберігання шкідливих рідин та газів, контроль за станом сушильних циліндрів, моніторинг температур речовин.

Характерним для хімічної галузі перевагою тепловізійного методу є низький рівень теплового впливу, який чинить вимірювальне обладнання на об'єкт вимірювання. Також важливим є і те, що використання тепловізора є можливим як в стаціонарному режимі, так в процесі роботи обладнання. Швидкість і достовірність результатів обстеження дозволяють оперативно реагувати на хімічні процеси і реакції, найчастіше протікають стрімко.



Рисунок 1.33 – Визначення рівня рідини в ємкості

5. Авіакосмічна та військова техніка:

- системи самонаведення;
- системи оповіщення раннього запуску ракет;
- тепла розвідка живої сили і техніки;
- авіакосмічна зйомка.

Тепловізійні камери сьогодні активно використовуються налітаках-амфібіях Бе-200. Навіть перебуваючи на великій висоті, камера здатна вловити навіть невеликий осередок загоряння. За допомогою тепловізійних датчиків можна скласти карту пожеж на певній місцевості і зробити висновок про

стратегію пожежогасіння на цій ділянці. Це дозволяє багаторазово знизити витрати часу на поповнення водиз водойм, азначить, і загасити пожежу набагато швидше. Тепловізор на військовому літаку або вертольот і дозволяє вловитив інфрачервоному діапазоні хвильцілі нанести точковий удар навіть в умовах абсолютної темряви або густого туману, що заважає візуальному огляду місцевості.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВТРАТ БУДІВЕЛЬ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО МЕТОДУ

2.1 Аналіз основних причин та джерел тепловтрат будівель

Впровадження сучасних енергозберігаючих технологій у першу чергу повинно бути на точній основі діагностики неполадок. Тепловізор може дуже легко знайти ділянки «витоку» в будівлі, некоректність роботи системи опалення, систем охолодження чи обігріву кондиціонування повітря. Відремонтувавши ці ділянки, ми зберігаємо тепло і знижуємо затрати на опалення будівлі. Тепловізор допоможе отримати важливу інформацію для того, щоб уникнути надзвичайно дорогих, таких, що забирають багато часу й нервів, ремонтних робіт.



Рисунок 2.1 - Теплоаудит утепленого будинку. Порівняння термограмми та цифрового фото

За допомогою тепловізора є можливість виявити вологу в даху, який має незначний нахил. Волога, потрапляючи в систему покрівлі, викликає пошкодження і передчасне руйнування даху. Завдяки виявленню та заміні вологої теплоізоляції волога видаляється з покрівлі, а термін служби її значно зростає. Пошук вологи в даху за допомогою тепловізора є неруйнівним та порівняно швидким. Волога теплоізоляція має більшу теплоємність, ніж суха. В ідеальному варіанті потрібно провести дослідження одразу після встановлення

покрівлі для отримання опорного зображення, а потім провести повторне після можливих пошкоджень (сильна злива, ураган, танення снігу).

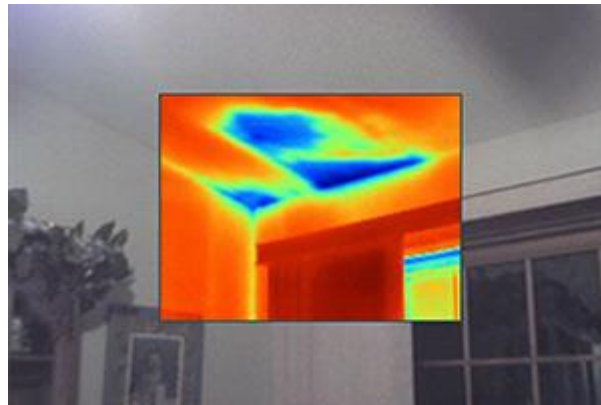


Рисунок 2.2 - Проникнення вологи. Накладання термограми на цифрове фото

Теплобачення ідеально підходить для визначення наявності й ефективності теплоізоляції житлових і комерційних будівель, що актуально в Україні. Таке дослідження доцільно проводити, коли різниця температур всередині та зовні будівлі становить не менше 8-10 °С. Якщо теплоізоляція відсутня, пошкоджена або «працює» не так, як потрібно, то збільшуються витрати енергії та вартість кондиціонування і знижується комфорт у середині будівлі. Часто буває, що при встановленні металопластикових вікон у комерційних будівлях (офісні центри, супермаркети) трапляються випадки, коли замість двокамерних вікон встановлюють декілька однокамерних, що призводить до витоку тепла. Також можна дуже точно виявляти утворення вологості внаслідок негерметичних стиків конструкції та швів.

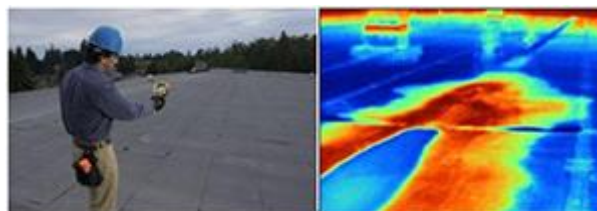


Рисунок 2.3 - Термограма: Скупчення вологи під плоскою покрівлею

Щодо систем опалення, то в цьому випадку тепловізор дає змогу швидко й ефективно виявляти повітряні пробки в радіаторах, що призводить до блокування або до обмеження надходження теплоносія в радіатор.

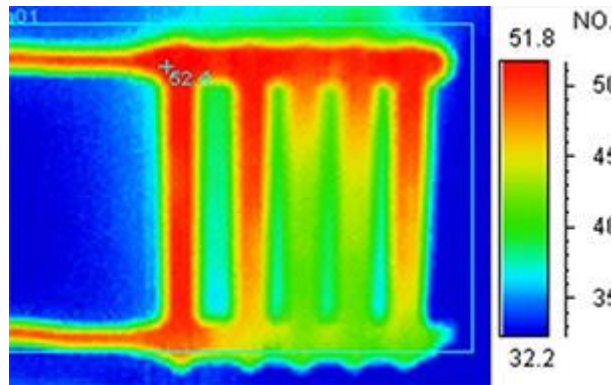


Рисунок 2.4 - Термограма: «Пробка» в радіаторах опалення

Також тепловізор допомагає в роботі з теплими підлогами. Основна їх проблема в тому, що вони встановлюються стаціонарно під підлогове покриття і тому дуже важко перевірити ефективність їх роботи. Тепловізор допоможе уникнути пошкоджень провідника теплоносія такої підлоги під час проведення ремонтних робіт (свердління отворів).

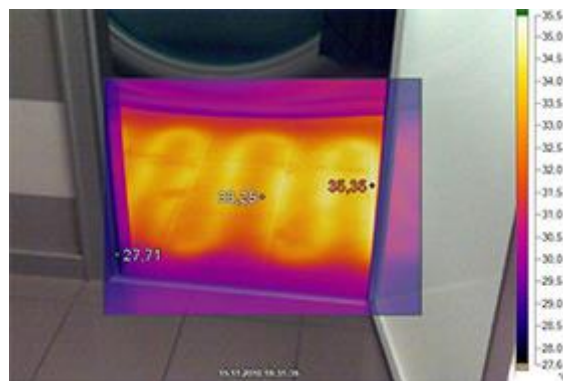


Рисунок 2.5 - Термограма теплої підлоги під цементною стяжкою

2.2 Дистанційне дослідження тепловтрат будівель тепловізійним методом

Стійка тенденція зростання цін на енергоносії стимулює розвиток енергозберігаючих технологій у будівництві та експлуатації споруд. Технологічні вимоги, що висувуються досучасних споруд з метою забезпечення енергоефективності, направлені на пошук технічних рішень, які дали б можливість підвищити рівень теплового захисту будівель і зменшити витрати на їх обігрівання. Однак незалежно від того, наскільки сучасна та чи інша конструкція та як обране технічне рішення відповідає необхідному теплозахисту будівлі, споруда не буде енергоефективною, якщо якість

виконаних будівельних робіт не задовольнятиме належних вимог. Для їх дотримання необхідно провести ряд додаткових робіт, головна мета яких полягає у проведенні перевірки реального стану всіх елементів і конструкції будівлі.

Обов'язковий контроль підвищує відповідальність виконавців на всіх етапах будівництва і, відповідно, якість робіт.

При дії різниці зовнішньої та внутрішньої температур і вітру будівля втрачає тепло через стіни та дах взимку і нагрівається влітку під дією сонячного опромінення. Гравітаційні сили, дія вітру та вентиляція створюють перепади тиску, які призводять до перетікання повітря у сполучених будівлях та до його фільтрації (інфільтрації) через пори матеріалу і нещільності зовнішніх огорожень. Крім того, атмосферні осадки, вологовиділення у будівлі, різниця вологості повітря призводять до вологообміну, від чого можливе зволоження матеріалів й погіршення захисних властивостей і довговічності зовнішніх стін та перекриттів. Надмірна фільтрація (інфільтрація) повітря й зволоження конструкції можуть збільшити у кілька разів тепловтрати будівель узимку, адже вологість сприяє підвищенню теплопровідності.

Області підвищеної температури стін та даху житлових та промислових будівель при їх натурній зовнішній тепловізійній зйомці відповідають зонам втрат тепла. В осінньо-зимовий період наявність таких зон призводить до зниження середньої температури всередині будівель і, як наслідок, до збільшення витрат енергоносіїв, необхідних для підтримки комфортної внутрішньої температури.

Теплові втрати найбільшою мірою залежать від різниці температур у приміщенні та на вулиці та теплозахисних властивостей стін, вікон, перекриттів, покриттів (огороджувальні конструкції). Теплозахисні властивості огороджувальних конструкцій оцінюють величиною, що називається *опором теплопередачі*. Опір теплопередачі показує, який перепад температур виникає при проходженні теплового потоку величиною 1 Вт/м^2 через одиницю площі огорожень.

Опір теплопередачі складається із:

- опору при переході тепла від внутрішнього повітря до внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції, який спричиняє температурний перепад $t_{\text{в}} - \tau_{\text{в}}(R_{\text{в}})$;

- опору при проходженні тепла крізь товщу самої огорожувальної конструкції, який викликає температурний перепад $\tau_{\text{в}} - \tau_{\text{н}}(R)$;

- опору при переході тепла із зовнішньої поверхні до зовнішнього повітря, що викликає температурний перепад $\tau_{\text{н}} - t_{\text{н}}(R_{\text{н}})$.

Тут $t_{\text{в}}$ — температура внутрішнього повітря; $\tau_{\text{в}}$ — температура внутрішньої поверхні стіни; $\tau_{\text{н}}$ — температура зовнішньої поверхні стіни; $t_{\text{н}}$ — температура повітря ззовні.

Таким чином, опір теплопередачі огороження виражається як сума цих опорів:

$$R_0 = R_{\text{в}} + R + R_{\text{н}}. \quad (2.1)$$

Величина, обернена опору теплопередачі, є коефіцієнтом тепловіддачі. Оскільки при тепловізійній зйомці досліджувалися будівлі тільки ззовні, то при розрахунку теплових втрат слід враховувати, що віддача тепла поверхнею огороження відбувається випромінюванням і конвекцією з повітрям, тобто загальну кількість тепла, яке передається, можна виразити формулою

$$Q = Q_{\text{в}} + Q_{\text{к}}, \quad (2.2)$$

де $Q_{\text{в}}$ — кількість тепла, що передається випромінюванням; $Q_{\text{к}}$ — кількість тепла, що передається конвекцією.

Кількість тепла (тепловий потік), що передається випромінюванням, визначається таким чином:

$$Q_{\text{в}} = \sigma \cdot S \cdot (T^4 - T_0^4), \quad (2.3)$$

де $\sigma = 5,65 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{К}^4 \cdot \text{м}^2)$ — стала Стефана—Больцмана; S — площа поверхні, що випромінює; T — температура поверхні, що випромінює; T_0 — температура оточуючого середовища.

Тепловізор як вимірювальний прилад реєструє потік випромінювання від досліджуваного об'єкта. При умові його калібрування по еталонному джерелу

(абсолютно чорному тілу) можна виконати розрахунок температури по вимірюваному потоку. Потік випромінювання R з 1 м^2 поверхні з урахуванням спектрального діапазону, в якому працює тепловізор, визначається як

$$R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} d\lambda, \quad (2.4)$$

де $C_1 = 2\pi hc^2$ і $C_2 = ch/k$; c - швидкість світла; h - стала Планка; k - стала Больцмана; λ — довжина хвилі випромінювання; $\lambda_1 = 3 \text{ мкм}$, $\lambda_2 = 12 \text{ мкм}$. Кількість тепла (тепловий потік), що передається конвективним механізмом, визначається як

$$Q_k = \alpha \cdot S \cdot (T - T_0), \quad (2.5)$$

де α — коефіцієнт тепловіддачі. Для зовнішніх поверхонь огорожень коефіцієнт тепловіддачі обраховується за емпіричною формулою Франка:

$$\alpha = 7,339 \cdot v^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91v}, \quad (2.6)$$

де v — швидкість вітра.

Другий член цього рівняння означає величину віддачі тепла природньою конвекцією. Тепловізійні обстеження проводилися із використанням тепловізора, виготовленого в Інституті фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, з температурною роздільною здатністю $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ і форматом кадру 256×320 пікселів. Для узгодження роботи тепловізора з персональним комп'ютером використовується оригінальне програмне забезпечення, що дає змогу візуалізувати термограми у різних палітрах псевдокольників, отримувати графіки розподілу температур уздовж вибраних ліній. Для визначення неоднорідності температури по поверхні тепловізор відкалібрований за допомогою абсолютно чорного тіла у діапазоні $-5 \div +60 \text{ }^\circ\text{C}$.

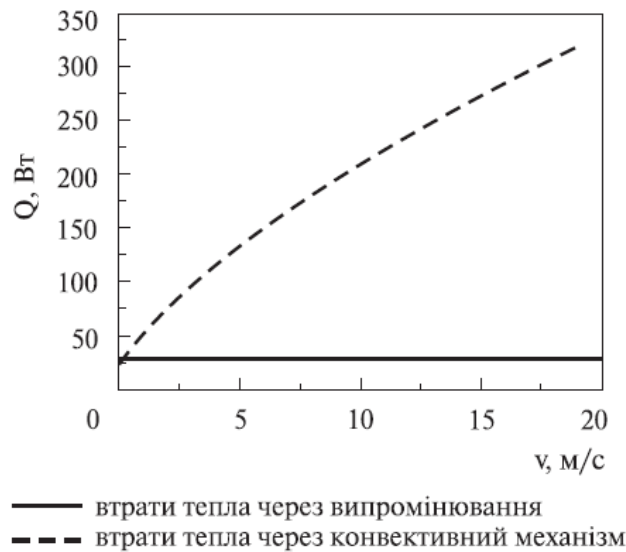


Рисунок 2.6 - Тепловтрати через вікно у залежності від швидкості вітру

На рис. 2.7-2.9 наведені термограми (а) та фотографії фрагментів у видимому діапазоні спектра (г) фасадів корпусів Міжнародного виставочного центру, отримані при їх тепловізійному обстеженні. Також на рисунках наведені графіки розподілу температури уздовж вертикальної (б) та горизонтальної (в) ліній на термограмах. Обстеження проводилися в похмурий день при температурі зовнішнього середовища $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (274 K). Температура всередині приміщення була $+16\text{ }^{\circ}\text{C}$ (289 K). При швидкості вітру $v = 5\text{ м/с}$ та при різниці температури між повітрям ззовні та зовнішньою поверхнею стіни 5 K (рис. 2.7) кількість тепла, що втрачається конвективним механізмом, становить $105,47\text{ Вт}$ з 1 м^2 площі, а шляхом випромінювання — близько 24 Вт з 1 м^2 площі. Разом це складає $129,47\text{ Вт}$ з 1 м^2 або $111,34\text{ ккал/год}$. Якщо ж різниця температури між повітрям ззовні та зовнішньою поверхнею стіни складає 13 K (рис. 2.7, область підвищених тепловтрат), то кількість тепла, що втрачається конвективним механізмом, складає $235,8\text{ Вт}$ з 1 м^2 площі, шляхом випромінювання — 65 Вт з 1 м^2 площі. Сумарні тепловтрати складають $300,8\text{ Вт}$ з 1 м^2 площі або $258,7\text{ ккал/год}$. Таким чином, через неякісне виконання будівельних робіт маємо додаткові тепловтрати $147,36\text{ ккал/год}$ з 1 м^2 площі (тобто більше приблизно у 2 рази).

На рис. 2.10 наведено термограму житлового будинку (а) та його зображення у видимому діапазоні спектра (б). Тепловізором зафіксована різниця температур $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ між звичайним вікном та склопакетом. На рис. 2.10 наведено тепловтрати через вікно в залежності від швидкості вітру. При швидкості вітру 5 м/с через вікно старого зразка площею $2,1\text{ м}^2$ втрачається на $162,22\text{ Вт}$ за годину більше, ніж через сучасний склопакет. У невеликому п'ятиповерховому будинку таких вікон близько п'ятидесяти. Таким чином додаткові тепловтрати складуть $8,11\text{ кВт}$ на годину або ж $194,67\text{ кВт}$ на добу. За опалювальний сезон це складає близько $35,04\text{ МВт}\cdot\text{год}$ або ж $8,37\text{ Мкал}$. При зовнішній тепловізійній зйомці ділянки з підвищеною фільтрацією відображаються у вигляді "гарячих" зон.

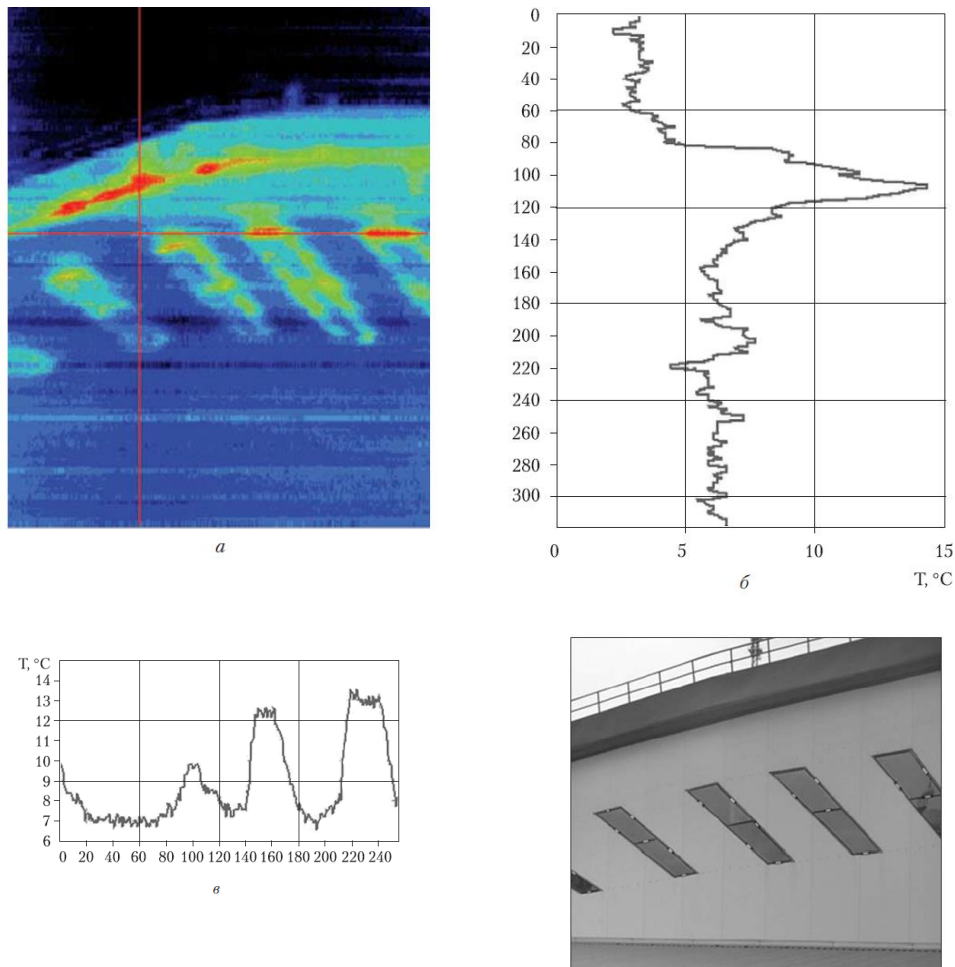


Рисунок 2.7 - Приклад термограми фрагменту будівлі (а), розподіл температури уздовж вертикальної лінії (б), розподіл температури уздовж горизонтальної лінії (в), фотографія фрагменту будівлі у видимому діапазоні (г)

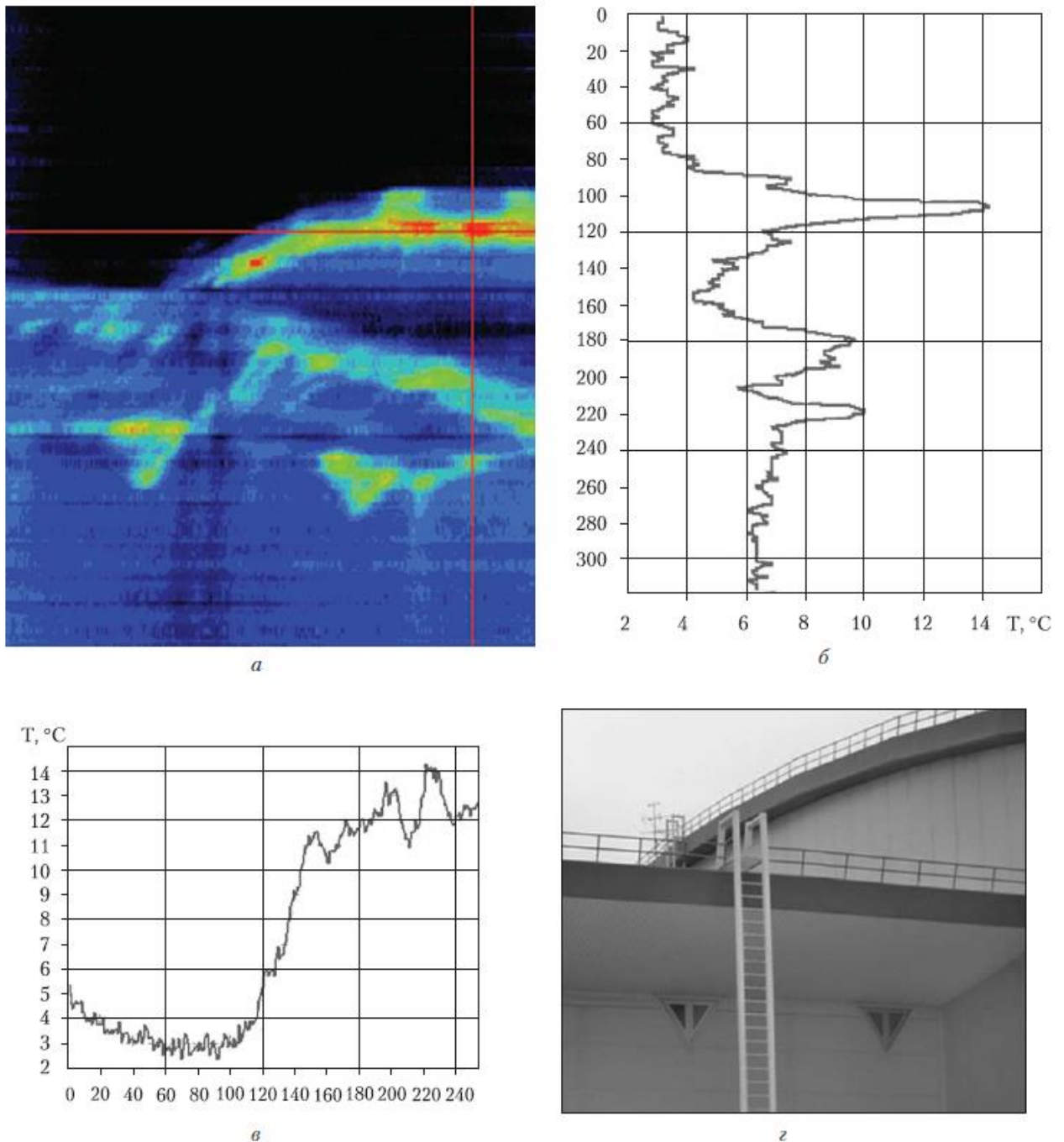
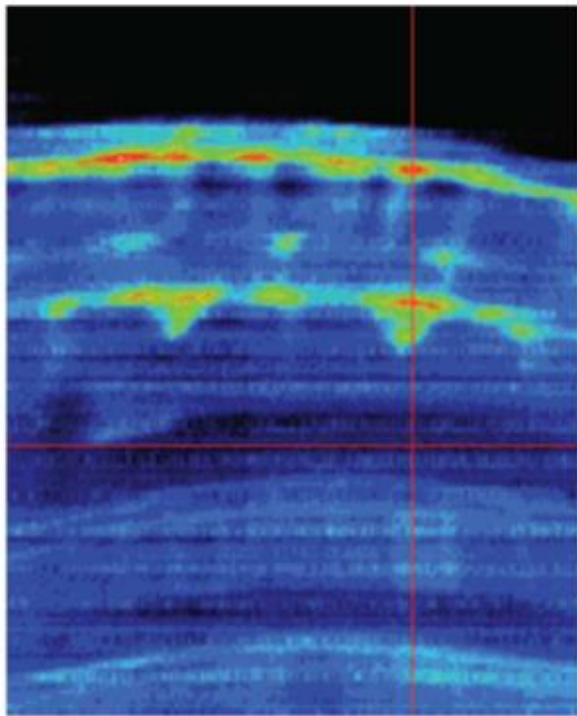


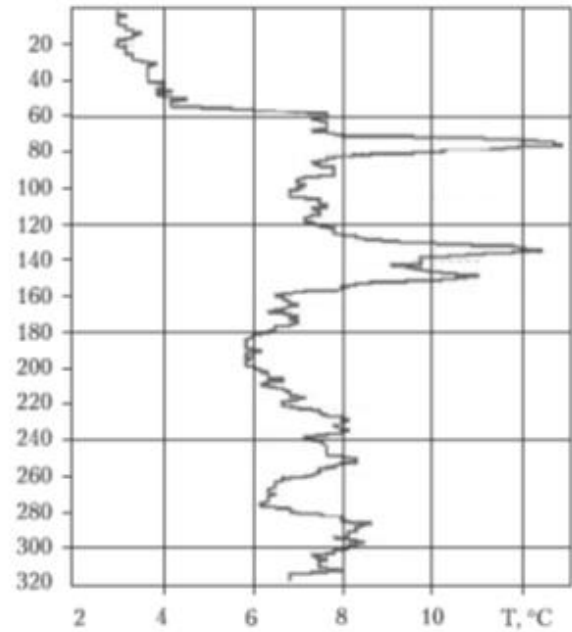
Рисунок 2.8 -Приклад термограми фрагменту будівлі Міжнародного виставкового центру (а), розподіл температури уздовж вертикальної лінії (б), розподіл температури уздовж горизонтальної лінії (в), фотографія фрагменту будівлі у видимому діапазоні (г)

Проведені дослідження показали високу ефективність застосування тепловізійного неруйнівного контролю будівель та споруд. Метою дослідження було виявлення причин, через які у корпус № 2 необхідно подавати значно більшу кількість тепла для його обігріву, ніж в корпус № 1. За результатами тепловізійного обстеження можна назвати основну причину — це погана

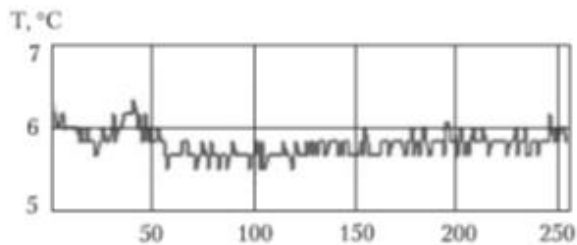
теплова ізоляція у місцях з'єднання даху з несучими конструкціями. Втрати тепла крізь стіни, вікна та двері різних корпусів порівнянні між собою і не можуть розглядатися як визначальна причина підвищеного споживання тепла.



a



б



e



z

Рисунок 2.9 - Приклад термограми фрагменту будівлі Міжнародного виставкового центру (a), розподіл температури уздовж вертикальної лінії (б), розподіл температури уздовж горизонтальної лінії (e), фотографія фрагменту будівлі у видимому діапазоні (z)

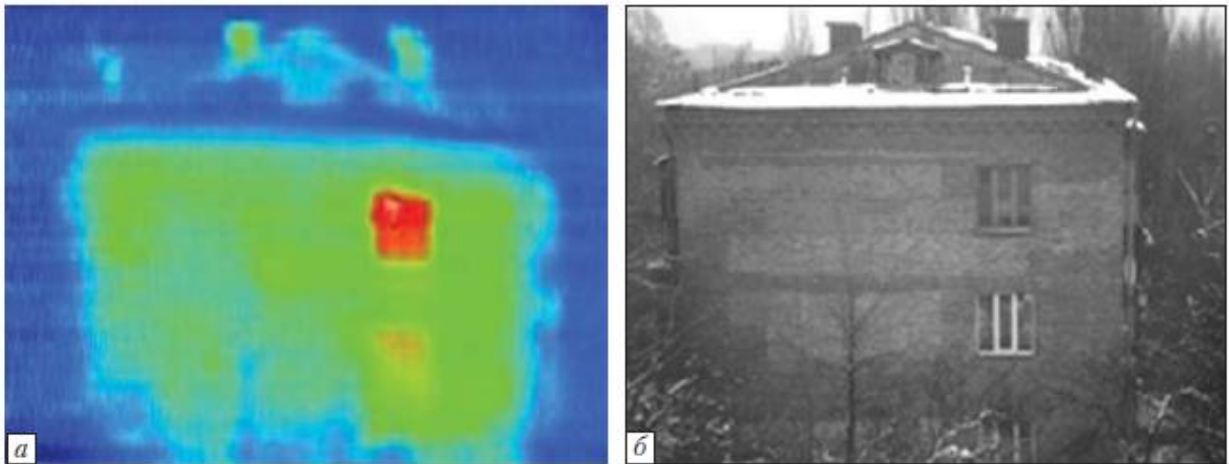


Рисунок 2.10 - Фрагмент будинку з вікном старого зразка та склопакетом: термограма (а) та фотографія у видимому діапазоні спектру (б)

2.3 Методика тепловізійного контролю теплоізоляції

Методика тепловізійного контролю якості теплоізоляції огорожуючих конструкцій розповсюджується на експертизу огорожуючих конструкцій жилих, громадських, промислових і сільськогосподарських будівель та споруд з нормованою температурою внутрішнього повітря приміщень. Дана Методика обумовлює процес тепловізійного контролю якості теплозахисту одно- та багатошарових конструкцій (зовнішніх стін, перекриття, стикових з'єднань) у реальних умовах, визначення місць та розмірів ділянок, що підлягають ремонту та відновлення необхідних теплозахисних якостей. Методика не розповсюджується на світлопрозорі частини огорожуючих конструкцій.

Сучасні тепловізійні системи дозволяють швидко і якісно виявляти ділянки з підвищеними тепловтратами та визначити їх кордони. За цими результатами можливо характеризувати якість покриття, стан матеріалу стін будівлі, тепловий режим приміщень, зазначити місця що підлягають ремонту та оптимізувати теплопостачання.

Параметр, що характеризує здатність огорожуючої конструкції чинити опір проходженню тепла крізь неї, є опір теплопередачі. Чим вище значення цього параметра, тим нижчі втрати тепла, які обумовлені теплопровідністю матеріалу будівельної конструкції. Температура поверхонь будівельних конструкції залежить від теплофізичних властивостей їх матеріалів.

Тепловізійний контроль якості теплоізоляції огорожуваних конструкцій будівель і споруд - один з основних методів контролю теплотехнічного стану огорожуваних конструкцій після закінчення будівництва, реконструкції, капітального ремонту та у період експлуатації.

Методика тепловізійного контролю дозволяє визначити наступні теплотехнічні дефекти огорожуваних конструкцій та можливі причини їх виникнення:

- місця просочування повітря та води (дефекти віконних блоків та прорізів у результаті неякісного ущільнення стін ізолюючим матеріалом, наскрізних щілин у з'єднаннях нижніх елементів коробок);

- містки тепла та холоду, зменшення опору теплопередачі (відсутність теплоізоляції, надмірна зволоженість, приховані дефекти будівництва, порушення технології виконання цегляної кладки);

- технологічні дефекти теплоізоляційних плит огорожуваних конструкцій (порушення товщини та розташування утеплювача, накопичення вологи в утеплювачі, осідання утеплювача);

- відшарування штукатурки, облицювання та інших покриттів (неякісний матеріал, порушення технології робіт, неправильний режим експлуатації).

Перераховані фактори спричиняють передчасне зниження теплозахисних властивостей огорожуваної конструкції в наслідок впливу погодних (вітер, атмосферні осадки) та природно – кліматичних (цикли тепло-холод-тепло, вологість) умов. Також, вищезазначені фактори призводять до поганого мікроклімату в приміщеннях будівель та надлишкових витрат палива внаслідок збільшення тепловтрат через дефекти огорожуваних конструкцій.

Температурні характеристики поверхонь огорожуваних конструкцій, для цілей тепловізійного обстеження, отримують на екрані тепловізора кольорового зображення, градації яскравості та кольорів якого відповідає різним температурам. Тепловізор оснащений приладом для висвітлення на екрані поверхонь і вимірювання інфрачервоного випромінювання матеріалів

огорожуючої конструкції, значення якого функціонально пов'язане з температурою поверхні що вимірюється.

Зовнішні і внутрішні поверхні огорожуючих конструкцій піддають тепловізійному контролю. За оглядовою термограмою зовнішньої поверхні огорожуючих конструкцій виявляють ділянки з порушеними теплоізоляційними властивостями, які потім піддають детальній обробці, шляхом проведення термографії з внутрішньої сторони огорожуючих конструкцій.

Методика використовується для визначення теплотехнічних дефектів, перевірки якості виконаних робіт з утеплення огорожуючих конструкцій при реалізації проєктів згідно Схеми Зелених Інвестицій з теплової санації об'єктів соціальної сфери.

Для проведення обстеження та контролю якості теплоізоляції ОК застосовують тепловізор, що має включати в себе:

- матрицю інфрачервоного випромінювання, що працює з довжиною хвилі 7...14 мкм, що здатна вимірювати необхідні температури видимого випромінювання зі значним розширенням;
- фотоелемент, що створює видиме зображення та відображає температуру видимого випромінювання з поверхні, яка перевіряється у вигляді ІЧ – зображення;
- обладнання, що дозволяє записувати ІЧ – зображення та зафіксувати виміряні цифрові дані.

При тепловізійному контролі можливо додатково використовувати таке обладнання:

- прилад для лінійних вимірювань;
- поверхневу термопару типу NR-31 чи NR-32;
- термощуп – термометр з похибкою не більше 0,5 °С;
- аспіраційний психрометр;
- анемометр.

В процесі проведення тепловізійного обстеження зовнішньої та внутрішньої поверхні ОК, тепловізором фіксуються температури у вигляді двовимірних зображень (термограм) поверхонь що досліджуються, колір яких відповідає значенню температури.

Термографічна перевірка елементів будівлі включає в себе:

- проведення тепловізійного дослідження ОК будівлі за допомогою тепловізора;
- визначення теплотехнічних характеристик дефектних ділянок ОК, наприклад, внаслідок дефектів ізоляції, присутності вологи або пропускання повітря;
- оцінку типу і розмірів дефектів.

Аналіз термограм зовнішньої поверхні ОК відповідно до результатів контактних вимірювань дозволяє:

- виявити дефектні частини ОК з підвищеними тепловтратами;
- визначити доцільність та об'єм поточного чи капітального ремонту будівлі і т. і.

Тепловізійне обстеження проводять тепловізором в умовах перепаду температур між зовнішнім і внутрішнім повітрям, що перебільшує мінімально допустимий перепад, який визначається за формулою

$$\Delta t_{\min} = \ominus R_0^* \frac{\alpha \cdot r}{1 - r}, \quad (2.7)$$

де \ominus - границя теплової чутливості тепловізора, °С;

R_0^* - проектне значення опору теплопередачі, м² °С/Вт;

α – коефіцієнт опору теплопередачі, який приймається рівним: для внутрішньої поверхні стін згідно нормативно – технічної документації; для зовнішньої поверхні стін при швидкості вітру 1,3,6 м/с – відповідно 11,20,30 Вт/(м² °С);

r – відносний опір теплопередачі, дефектної ділянки огорожуючої конструкції що підлягає виявленню, не більше 0,85.

Проведення тепловізійного дослідження будівель проводять здебільшого в осінньо - зимовий період при функціонуванні системи опалення у

приміщеннях та при звичайному ході температур зовнішнього повітря. Тепловізійні обстеження слід проводити за хмарних погодних умов або на світанку чи у нічні часи, коли теплові впливи навколишнього середовища мінімальні.

Обстеження проводять при відсутності атмосферних осадів, туману, задимленості. Бажано, щоб поверхні ОК не знаходились в зоні прямого та відбитого сонячного опромінення протягом 12 годин до проведення тепловізійного дослідження, швидкість вітру під час проведення обстеження становила не більш 5–7 м/с. Сонячна або дощова погода значно ускладнюють проведення вимірювань методами тепловізійного обстеження.

Місця влаштування тепловізора та проведення тепловізійного дослідження вибирають таким чином, щоб поверхня що досліджується тепловізором знаходилась у прямій видимості під кутом спостереження не менше 60° по вертикалі та горизонталі.

Поверхні ОК в період проведення тепловізійного контролю їх якості, шляхом тепловізійного обстеження, не повинні підлягати додатковому впливу від теплових об'єктів, джерел освітлення.

Опалювальні прилади, влаштовані на відстані 10 см до поверхні, що обстежується тепловізором або при розташуванні на сусідній до неї поверхні, необхідно екранувати термостійким матеріалом.

На поверхні, яка обстежується тепловізором обирають геометричний репер, котрим може слугувати лінійний розмір укусу вікна або відстань між стикуванням панелей ОК. При цьому кут, під яким проводиться вимірювання, не повинен перевищувати 20° по вертикалі та горизонталі.

Перед проведенням тепловізійних вимірювань на характерній ділянці поверхні що досліджується при відсутності несприятливих погодних умов оператором визначаються реперні ділянки, температури в яких мають бути виміряні контактним методом. На цих самих ділянках проводиться вимірювання температур тепловізором. Якщо існує суттєва різниця між значеннями температур (1,0-2,0 °С), що виміряні контактним та безконтактним

методами, у тепловізорі налаштовується коефіцієнт випромінювання поверхні, що дозволяє звести цю різницю до нуля або можливого мінімуму. Значення коефіцієнту випромінювання отримане у даному випадку використовується як характеристика поверхні на даній ділянці та використовується у подальших розрахунках.

Для визначення умов проведення тепловізійного контролю потрібно враховувати наступні фактори:

- технічні характеристики та можливості тепловізійного обладнання;
- характеристики ОК будівлі (відповідні типи і влаштування систем опалення, конструктивних елементів та системи теплоізоляції);
- випромінюючі властивості поверхні ОК;
- кліматичні умови;
- доступність до поверхні ОК, що обстежується;
- вплив оточуючого середовища;
- інші фактори.

Для полегшення аналізу результатів, тепловізійне обстеження бажано виконувати при незмінній, на час перевірки, різниці температур і тиску через ОК.

Коливання температури видимого зображення у ІЧ – зображенні на поверхні ОК будівлі вимірюється з точністю $\pm 0,5$ °С. Перевірку починають з виконання попереднього тестування поверхні ОК для визначення базової.

При зміні випромінювання необхідної поверхні ділянки ОК внаслідок відображення від іншої поверхні, поверхню досліджують з різних положень. При цьому відображення змінюється залежно від положення. Розташування елементів, що зображені на термограмах, відмічають на плані чи схемі будівлі.

3 ВИБІР ТА МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО КОНТРОЛЮ БУДІВЕЛЬ

3.1 Класифікація похибок вимірювань

Для порівняння існуючих методів вимірювання температури за випромінюванням необхідно провести їх аналіз шляхом порівняння точності визначення ними термодинамічної температури. Це доцільно провести шляхом зіставлення відповідних інструментальних та відповідних методичних похибок визначення температури різними методами. У таблиці 3.1 наведена загальна класифікація похибок вимірювання температури за випромінюванням і складові, які викликають виникнення відповідної складової похибки.

Завдяки впровадженню в пірометрах структурних методів підвищення точності і мікропроцесорної техніки, досягнуті значення інструментальної складової похибки порядку 0,1%. Але на практиці точність вимірювання температури за випромінюванням залишається низькою, що й обумовлює обмежене застосування пірометрів в промисловості. Причиною цього є високі значення методичної складової похибки вимірювання температури за випромінюванням і похибка експериментатора.

Таблиця 3.1 - Класифікація похибок вимірювання температури за випромінюванням

Складові похибки вимірювання	Складові впливу	Фактори, які призводять до виникнення відповідної похибки
Інструментальна складова похибки	Вплив оптичної системи	Зміна характеристик оптичних складових
		Утворення плівки
		Випромінювання, поглинання і відбивання елементів оптичної системи
	Вплив характеристик приймача випромінювання	Зміна спектральної характеристики
		Випромінювання елементів системи
		Зміна характеристик градування
		Температурна залежність
	Вплив електричної схеми приладу	Неточність алгоритмів при лінеаризації
		Зміна параметрів елементів і блоків схеми
		Електричні наводки
Інерційність процесу вимірювання	Інерційність чутливого елемента	
	Інерційність блока електричної схеми	
	Затримка при обробці результатів	
Методична складова похибки	Вплив випромінювальних властивостей об'єкта	Відсутність достовірної інформації про значення коефіцієнта випромінювання поверхні об'єкта
		Залежність випромінювальних властивостей матеріалу поверхні від шаршавості, окислення, температури, спектрального діапазону випромінювання
	Вплив проміжного середовища	Поглинання випромінювання проміжним середовищем
		Розсіювання випромінювання проміжним середовищем
		Відбивання випромінювання проміжним середовищем
		Власне випромінювання проміжного середовища
	Вплив відбитого фонового випромінювання	Відбивання фонового випромінювання від поверхні досліджуваного об'єкта
		Не враховується багаторазовий характер відбивання фонового випромінювання від поверхні об'єкта
	Теоретичні спрощення	Використання замість закону Планка законів Віна і Релея-Джінса
		Використання обмеженої ділянки спектра в радіаційному пірометрі
		Не враховується немонохроматичність спектрального каналу в монохроматичному пірометрі
		Не враховується комплексний характер температурної та спектральної залежності випромінювальних властивостей поверхонь
Людська погрішність	Не дотримання правил вимірювання	
	Реєстрація температури "на око" по кольору	
	Не виставляється на приладі значення коефіцієнта випромінювання матеріала поверхні	
	Не враховуються дані про фонове випромінювання побічних об'єктів і пропускні властивості проміжного середовища	
Погрішність в обчисленнях	Похибка округлення результату Похибка наближених обчислень	

3.2 Практичні аспекти вибору технічного забезпечення для тепловізійного обстеження будівель

Основними особливостями тепловізорів для аналізу стану будівлі є такі параметри як роздільна здатність, точність вимірювання і однорідність картини, а так само його зовнішній вигляд і портативність.

На здатність термічного сприйняття особливо впливають якість інфрачервоного детектора і оптики. Сучасний якісний дорогий тепловізор може показувати різницю температур до 0,03 градуса і може розпізнати навіть найменші відмінності в інтенсивності випромінювання. Крім того, що зображення на подібних тепловізорах дуже високої якості, їх можна використовувати протягом усього року навіть на невеликих теплових потоках. А це означає, що подібна техніка швидко окупується. Особливістю замірів зовні будівлі є певні з геометричної точки зору помилки, які можна визначити при більш уважному вивченні термограми. Здебільшого вони виникають через низьку роздільну здатність використовуваного тепловізора.

Так зараз користувачі стандартних тепловізорів обходяться здатністю 320x240IR-пікселів. А якщо, наприклад, необхідно провести замір будинку довжиною 12 метрів і заввишки 9 метрів, то на 1 піксель припадає 4см. А для розрахунку абсолютної температури необхідно принаймні 3 ІЧ-пікселя, то виходить, що вимірювану ділянку ділять на квадрати 12x12 см. А якщо причина менше 12 см. Наприклад, місток холоду, що виник через дюбель в ізоляційній плиті або через шов, заповнений розчином, то необхідно провести цілий ряд замірів фасаду. Сучасні професійні тепловізори, чиї формати обчислюються в мегапікселях, володіють такою точністю, що достатньо одного виміру для визначення причин проблеми. Відповідно, один знімок тепловізором з роздільною здатністю в декілька мегапікселів замінює 16 знімків звичайним тепловізором з роздільною здатністю 320x240. І отже не треба додатково поєднувати всі ці знімки.

Внутрішній алгоритм калібрування повинен стежити за тим, щоб тепловізор показував правильний результат при повторенні виміру і при цьому не треба

було б враховувати, при якій температурі навколишнього середовища проводився замір і де його проводили: зовні або всередині будівлі. У цьому якраз і полягають відмінності в представлених сьогодні на ринку тепловізорах. Але не всі вони заслужили право називатися вимірювальним приладом.

Багаточисленні можливості аналізу та зйомок такі як, передача інформації про різницю температур, ізотермічне визначення (визначення «точки роси»), автоматичне збільшення / зменшення, вибір альтернативної колірної гами і так далі полегшують першу оцінку будівлі на місці.

Вбудована відеокамера для одночасного збереження візуальної картини, а також синхронізовані з зображенням коментарі у вигляді титрів є допоміжними функціями для замірів всередині будівлі, так як часто на зображенні неможливо відразу розгледіти найдрібніші деталі.

Вимоги до тепловізорів при обстеженні будівель:

- максимально висока роздільна здатність, щоб можна було визначити навіть невеликі теплові потоки.
- висока геометричнороздільна здатність, щоб мінімізувати можливість помилок, пов'язаних з неправильними вимірами.
- невелика кількість перешкод і високий рівень однорідності знімка для хорошої якості знімка особливо при невеликих відмінностях в температурі.
- висока точність вимірів і якість повторів, особливо якщо мова йде про непостійні умови навколишнього середовища.
- можливість роботи при температурі від мінус 40 градусів, щоб уникнути впливу відображення випромінювання.
- РК-дисплей для того, щоб зображення одночасно було видно відразу декільком спостерігачам.
- портативність.
- надійність в експлуатації.

З інфрачервоною камерою TESTO 875 зручно і просто працювати, діапазон температур від -20 до +650 °С, точність $\pm 2\%$, теплова чутливість $<0,05$ °С. Матриця з роздільною здатністю 160 x 120 пікселів забезпечує

достатню якість інфрачервоних зображення, а 3-х мегапіксельна цифрова камера видимого спектра дозволяє робити зйомку в режимі картинка в картинці, це поєднання теплових і видимих зображень дозволяє легко ідентифікувати місця розташування і більш точно оформити тепловізійний звіт. Лазерний покажчик допомагає точно навести тепловізор на обстежуваний об'єкт, а яскрава LED лампа забезпечить підсвічування навіть в самих темних кутках. Ручне фокусування дозволяє використовувати 4-х кратний цифровий зум і забезпечує $25^{\circ} \times 19^{\circ}$ поле видимості.



Рисунок 3.1 – Тепловізор TESTO 875

FLUKE Ti400 - це професійний високотехнологічний інструмент для вимірювання температури будь-яких поверхонь, що дозволяє отримати термограми з високим розширенням. Прилад має розширений діапазон вимірюваних температур і реєструє значення в діапазоні від -20°C до $+1200^{\circ} \text{C}$, що дозволяє використовувати Fluke Ti400 для контролю температури навіть в металургії, металообробці і для контролю інших високотемпературних процесів.

Тепловізор Fluke Ti400 відрізняється високою точністю: похибка вимірювання не перевищує 2% або 2°C (по більшому значенню), що забезпечується високою чутливістю (0.075°C) і роздільною здатністю 320×240 (76800 пікселів).

Оптична система тепловізора Fluke Ti400 складається з 5-мегапіксельної камери для зйомки у видимому спектрі і ІЧ-об'єктива з фокусною відстанню

15см. ІЧ-об'єктив оснащений функцією LaserSharp, що забезпечує точне автофокусування на додаток до режиму ручного фокусування. Отримана термограма відображається на сенсорному емнісному LCD-дисплеї з діагоналлю 3,5” (640x480). Для розширення можливостей Fluke Ti400 можна доукомплектувати ширококутним або довгофокусним об'єктивами з фокусною відстанню 15см і 45 см відповідно.



Рисунок 3.2 – Тепловізор Fluke Ti400

Камера FLIR серії В дозволяє чітко документувати роботи з виявлення пошкоджень, роботи з ремонту й відновленню ізоляції й системи вентиляції й кондиціонування повітря. Камера точно показує користувачеві проблему й у підсумку дозволяє підтвердити правильність виконаного ремонту. Більше того, вона дозволяє розширити спектр сервісних робіт, пропонованих фахівцями будівельної галузі, забезпечуючи їм можливість обслуговування груп замовників на більш високому рівні. Камера версії В поставляється з адаптованим діапазоном виміру температур, функціями сигналізації вологості й стану ізоляції, які дозволяють відображати й визначати критичні зони, а також виключити необхідність застосування дорогих технологій обстеження, які вимагають значних трудових витрат, часу й руйнуючих випробувань.

Проаналізувавши дані моделі тепловізорів, в подальшому розглянемо тепловізор FLIR B400, оскільки його характеристики і цінова категорія є оптимальними для тепловізійного обстеження будівель.

Тепловізор FLIR B400 від компанії FLIR Systems компактний й має мінімальну вагу. Він з'єднується із програмним забезпеченням і світом навколо як ніякий інший. Має унікальні функції, такі як touch-screen, текстові коментарі й можливість малювати схеми. Він має поворотний блок з об'єктивами й простий в використанні.

Включено багато інших функцій: цифрова фото камера, функція об'єднання інфрачервоного й видимого зображення як у камері, так і в програмному забезпеченні ThermaCam 8.

Тепловізори FLIR B-Series у будівельній індустрії дозволяють проводити контроль для:

- збереження будинків і будівельних споруд і збільшення строків їх безпечної експлуатації;
- контроль якості ремонту;
- детектування пошкоджень конструкцій, що розвиваються протягом тривалого часу;
- детектування й запобігання цвілі й гниття будівельних конструкцій і матеріалів;
- визначення й запобігання утворення конденсату;
- детектування й запобігання проникнення вологи в будинки й споруди;
- превентивний контроль перед реконструкцією або відновленням .



Рисунок 3.3 – Тепловізор FLIRB400

3.3 Обробка результатів тепловізійного обстеження

1. Якісний аналіз результатів тепловізійного обстеження.

1.1 Обробка результатів обстежень при проведенні аналізу зводиться до розшифровки термограм. Збережені на електронному носії теплові зображення об'єктів аналізуються оператором після чого визначаються базові та дефектні ділянки. Дефектні ділянки класифікують за характерними ознаками: дефекти елементів ОК, дефекти матеріалу утеплювача чи порушення технології виконання робіт.

1.2 Виконується поєднання натурального та теплового зображення однієї і тієї ж ділянки ОК, а також виділення контуром дефектних зон.

1.3 Теплотехнічні дефекти ОК відображають на термограмах у вигляді зон підвищеної або зниженої температури, які відповідають:

- конструктивним особливостям;
- неоднорідності теплообміну з навколишнім середовищем;
- неоднорідності коефіцієнту випромінювання поверхні;
- різноманітного роду дефектам.

2 Кількісний аналіз результатів тепловізійного обстеження.

2.1 На основі отриманих даних якісного аналізу результатів обстеження будівлі тепловізійним методом проводиться кількісний аналіз значень теплотехнічних параметрів зовнішніх ОК з використанням спеціалізованого програмного забезпечення.

2.2 Кількісна оцінка теплотехнічних дефектів ОК виконується з метою виявлення ступеню їх впливу на нормальне функціонування будівлі.

2.3 Проводиться комплексний аналіз термографічних зображень з налаштуванням рівня діапазону температур у °С та оцінкою характеристик даних зображень.

2.4 З метою створення якісного відображення теплотехнічних дефектів ОК оцінюється та налаштовується палітра ІЧ зображень.

3 Звіт тепловізійного обстеження.

3.1 Звіт про виконання тепловізійного обстеження включає в себе:

- 1) загальні характеристики об'єкту та повна його адреса;
- 2) типи матеріалів поверхні, що використовуються у спорудах та розрахункове значення випромінювальної здатності цих матеріалів;
- 3) специфікація обладнання, що використовується, включаючи виробника, модель та серійний номер;
- 4) дата і час перевірки;
- 5) зовнішня та внутрішня температура повітря;
- 6) інформаційне наповнення, що включає в себе: налаштування ПЧ та натурального зображення, температурні характеристики в певних точках та додаткова інформація щодо зображення;
- 7) загальні кліматичні умови на час проведення тепловізійного обстеження;
- 8) висновок щодо проведення тепловізійного обстеження.

3.4 Метрологічний аналіз технічного забезпечення для тепловізійного контролю споруд

Для проведення метрологічного аналізу засобу для тепловізійного обстеження будівель тепловізором FlirB400 перш за все необхідно визначити основні фактори впливу на результат вимірювання. Таке дослідження зручно подати у вигляді діаграми Ісікави.

Фактори впливу на процес тепловізійного контролю:

Похибка градування – похибка при градуванні шкали ізотерм.

Тепловізійне послаблення - послаблення сигналу від шару до шару матриці за рахунок “розмитості” випромінювання.

Проміжне середовище – можливий вплив неоднорідності проміжного середовища на точність вимірювання.

Зміна коефіцієнта випромінювання від 0,1 до 1, поправка на відбиту температуру навколишнього повітря.

Додаткові складові похибки - робоча відстань, навколишнє середовище (температура, вологість повітря, швидкість вітру).

Властивості вимірювальної поверхні – шорсткість тіла, чорнота тіла.

Таблиця 3.2 - Кількісний опис складових похибок

Джерела похибок тепловізійного контролю	Значення похибки
Похибка вимірювання температури в діапазоні $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Delta t = 2\% (\pm 2^{\circ}\text{C})$
Похибка вимірювання температури при повторюваності	$\Delta t_{\text{п}} = 1\% (\pm 1^{\circ}\text{C})$

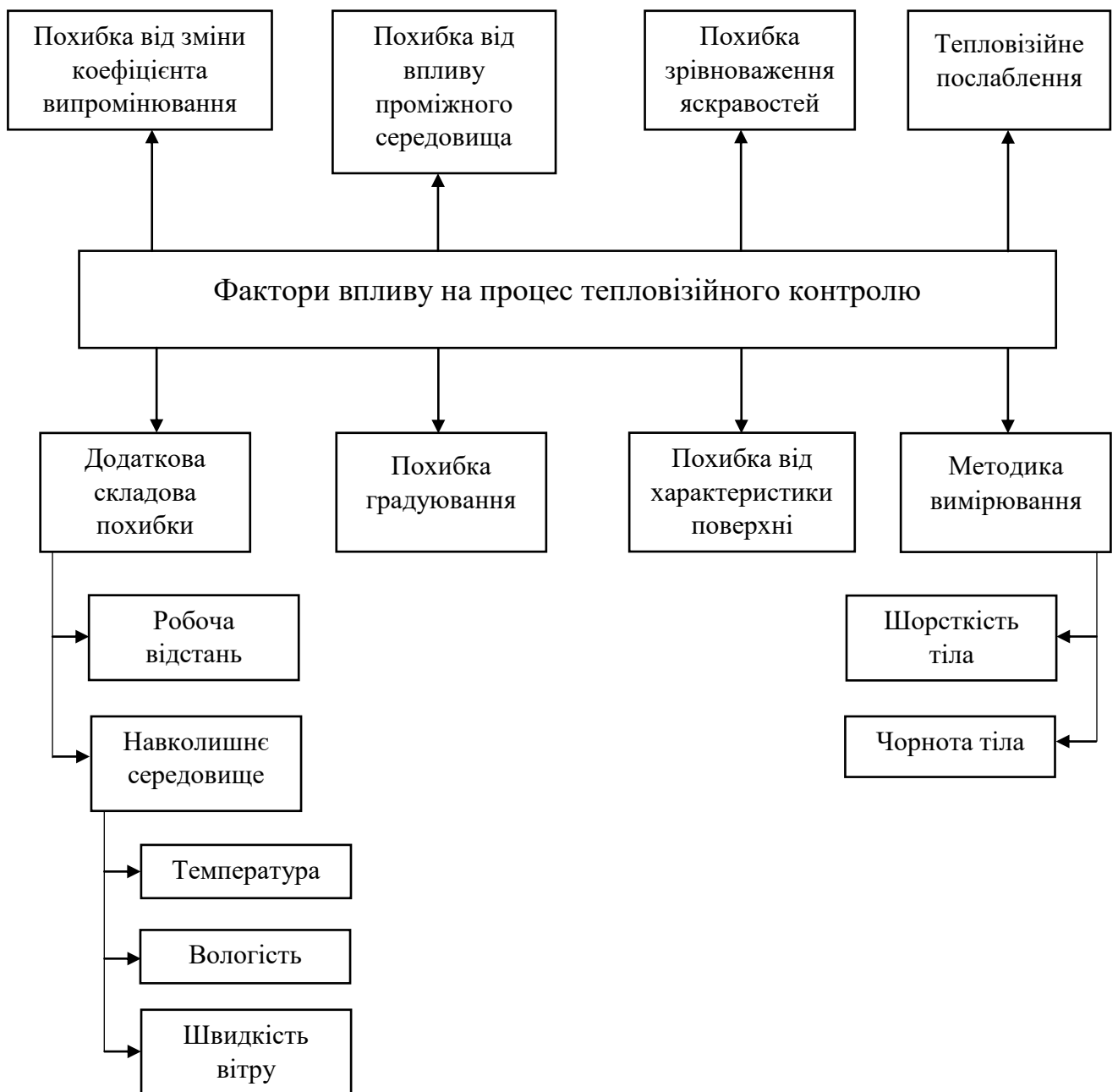


Рисунок 3.4 – Діаграма Іскави

Похибки визначення тепловтрат $\Delta W/W$ і опору теплопередачі, в основному, обумовлені помилками вимірювання щільності потужності теплового потоку Q_i температури зовнішніх огорожувальних T_{out}^w конструкцій:

$$\frac{\Delta W}{W} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta T_{out}^w}{T_{out}^w - T_{out}^{air}}\right)^2}, \quad (3.1)$$

де T_{out}^{air} - температура повітря зовні приміщення.

В умовах реальної тепловізійної зйомки величина $\Delta W/W$ може досягати 30...100%, при чому основним джерелом похибки є неточне вимірювання температури зовнішніх стін (вікон), якщо прийняти, що основна похибка сучасних вимірювачів теплового потоку дорівнює 5%.

Слід зауважити, що все вище сказане врівній мірі відноситься до визначення опору теплопередачі за результатами тепловізійної зйомки, коли щільність потужності теплового потоку вимірюють в окремих точках, а її середні значення по фасаді розраховується, визначаючи середню температуру по фасаді.

Експериментальні результати

На першому етапі вимірювали зовнішні температури стіни з червоної цегли і двокамерного склопакета при температурах внутрішнього і зовнішнього повітря відповідно +22 °С і +2 °С. Таким чином, температурний напір склав 20 °С, що відповідає вимозі ГОСТ 26629-85 «Метод тепловізійного контролю якості теплоізоляції огорожувальних конструкцій». На об'єктах зйомки розміщували два маркера: полівінілхлоридну плівку чорного кольору (рекомендоване значення коефіцієнта випромінювання $\varepsilon=0,95$) і алюмінієву фольгу. Згідно відомим рекомендаціям роботи з тепловізорами була виміряна величина відбитої температури фону $T_{refl} = -2,1$ °С, а потім коефіцієнтів випромінювання червоної цегли ($\varepsilon=0,93$) і віконного скла ($\varepsilon=0,85$). Виміри проводилися після включення тепловізора всередині приміщення і виносу його

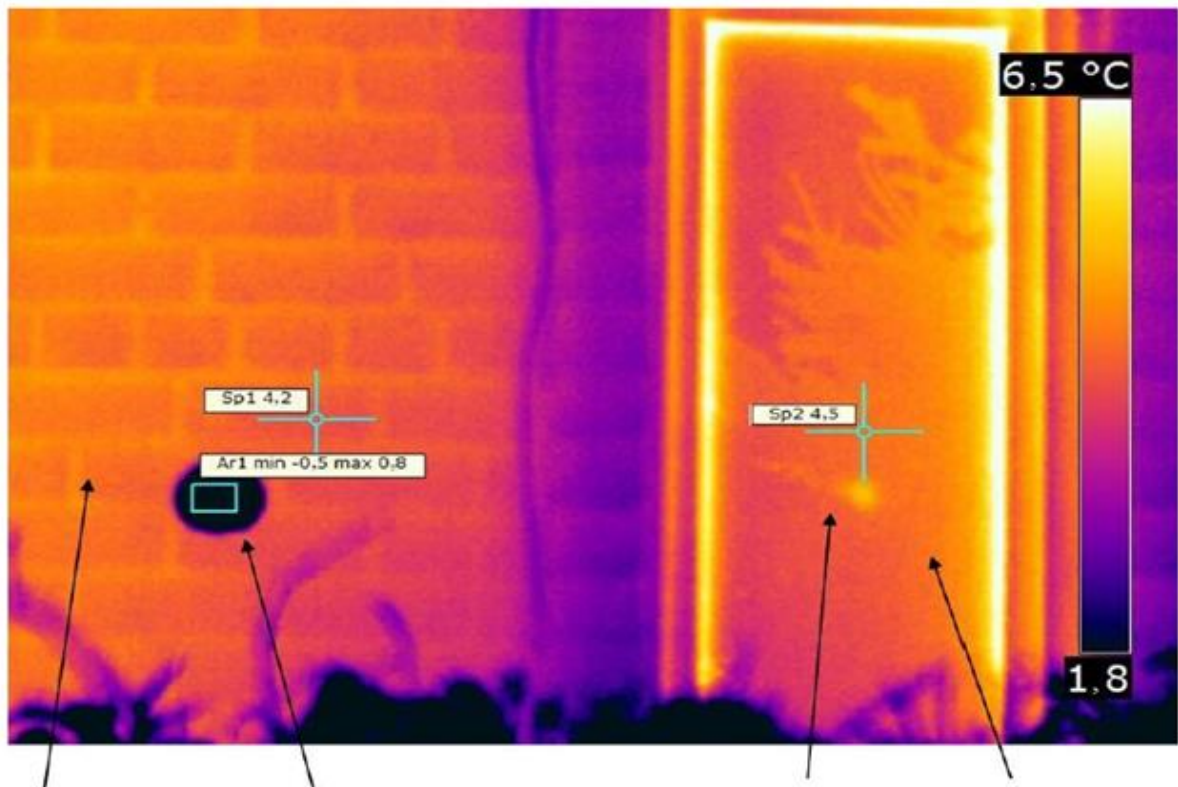
назовні протягом 60 хвилин (зазвичай рекомендують починати вимірювання через 20 хвилин після включення тепловізора).

Результати експерименту наведено в табл. 3.3 для двох випадків:

1) коефіцієнт випромінювання $\varepsilon = 0,95$ - часто використовується практиками значення за замовчуванням, а величина $T_{refl} = +2$ °С, тобто дорівнює температурі зовнішнього повітря;

2) вищевказані параметри обрані істинними: $\varepsilon = 0,93$ для цегли, $\varepsilon = 0,85$ для скла та $T_{refl} = -2,1$ °С. Прийнято, що справжні значення температур стіни та повітря виміряні через 60 хвилин після включення тепловізора.

Дані табл. 3.4 показують, що нехтування часом вимірювання і коригувальними параметрами призводить до похибок вимірювання температури від 0,3 до 1,8 °С, у той час як введення правильних коригувальних параметрів забезпечує похибку від 0,4 до 1,1 °С, іншими словами, всупереч поширеній думці коригувальні параметри незначно покращують результати вимірювань в порівнянні з інтуїтивно вибраними параметрами тепловізійної зйомки. Подальші оцінки похибок тепловізійних вимірювань при різних комбінаціях коригувальних параметрів, а саме, відображеної температури фону T_{refl} , коефіцієнта випромінювання ε , відстані до об'єкта зйомки L і вологості атмосфери w , наведено в табл. 3.5. Дані табл. 3.5 показують, що, відповідно з відомими рекомендаціями, найбільші похибки пов'язані з неточним заданням відображеної температури фону і коефіцієнта випромінювання. Проте, незначний розкид в заданні цих параметрів призводить до похибок вимірювання не більше 0,4 °С. Відповідно, відстань до об'єкту зйомки і вологість атмосфери не впливають на результати тепловізійних вимірювань в будівництві.



Стіна Алюмінієвий маркер Полівінілхлоридний маркер Маркер

Рисунок 3.5 – ІЧ термограма, яка відображає експериментальну процедуру

Таблиця 3.4 – Точність тепловізійних вимірювань температури в залежності від часу зйомки після ввімкнення тепловізора Flir B400

Час після ввімкнення в приміщенні (+22 °C) винесення на вулицю (+2 °C)хв.	Температура			
	стіни	вікна	стіни	вікна
	$T_{out}^{air} = +2 \text{ °C}$	$T_{out}^{air} = +2 \text{ °C}$	$T_{out}^{air} = +2 \text{ °C}$	$T_{out}^{air} = +2 \text{ °C}$
	$T_{refl} = +2 \text{ °C}$	$T_{refl} = +2 \text{ °C}$	$T_{refl} = -2,1 \text{ °C}$	$T_{refl} = -2,1 \text{ °C}$
	$\varepsilon = 0,95$	$\varepsilon = 0,95$	$\varepsilon = 0,93$	$\varepsilon = 0,85$
2	3,3 (0,4)*	3,5 (1,0)	3,6 (0,1)	4,4 (0,1)
4	2,8 (0,9)	3,2 (1,3)	3,2 (0,5)	4,1 (0,4)
7	2,4 (1,3)	2,8 (1,7)	2,8 (0,9)	3,6 (0,9)
11	2,4 (1,3)	2,7 (1,8)	2,6 (1,1)	3,5 (1,0)
17	2,8 (0,9)	3,1 (1,4)	3,1 (0,6)	3,9 (0,6)
27	2,3 (1,6)	2,6 (1,9)	2,9 (0,8)	3,6 (0,9)
45	2,4 (1,3)	3,0 (1,5)	3,2 (0,5)	4,1 (0,4)
60	3,4 (0,3)	3,6 (0,9)	3,7**	4,5**

* В дужках абсолютна похибка вимірювання. ** Значення прийняте як істинне

Таблиця 3.5 – Точність тепловізійних вимірювань температури в залежності від різних комбінацій коректуючих параметрів (*Значення прийняте як істинне. ** В дужках абсолютна похибка вимірювання)

Час після ввімкнення в приміщенні (+22 °C) і винесення на вулицю (+2 °C) рівно 60 хв. (базова вологість атмосфери $W = 30 \%$, базова відстань $L = 4$ м, крім зазначених нище змін)	Температура стіни, °C $T_{out}^{air} = +2$ °C $T_{refl} = -2,1$ °C	Температура вікна, °C $T_{out}^{air} = +2$ °C $T_{refl} = -2,1$ °C
$T_{out}^{air} = +2$ °C, $T_{refl} = -2,1$ °C, $\varepsilon = 0,93$ (стіна), $\varepsilon = 0,85$ (вікно)	3,7*	4,5*
$T_{out}^{air} = +4$ °C, $T_{refl} = -2,1$ °C, $\varepsilon = 0,93$ (стіна), $\varepsilon = 0,85$ (вікно)	3,7 (0)**	4,5 (0)
$T_{out}^{air} = 0$ °C, $T_{refl} = -2,1$ °C, $\varepsilon = 0,93$ (стіна), $\varepsilon = 0,85$ (вікно)	3,8 (0,1)	4,5 (0)
$T_{out}^{air} = +2$ °C, $T_{refl} = 0$ °C, $\varepsilon = 0,93$ (стіна), $\varepsilon = 0,85$ (вікно)	3,6 (0,1)	4,1 (0,4)
$T_{out}^{air} = +2$ °C, $T_{refl} = -4$ °C, $\varepsilon = 0,93$ (стіна), $\varepsilon = 0,85$ (вікно)	3,9 (0,2)	4,8 (0,3)
$T_{out}^{air} = +2$ °C, $T_{refl} = -2,1$ °C, $\varepsilon = 0,96$ (стіна), $\varepsilon = 0,88$ (вікно)	3,6 (0,1)	4,3 (0,2)
$T_{out}^{air} = +2$ °C, $T_{refl} = -2,1$ °C, $\varepsilon = 0,90$ (стіна), $\varepsilon = 0,82$ (вікно)	3,9 (0,2)	4,7 (0,2)
$T_{out}^{air} = +2$ °C, $T_{refl} = -2,1$ °C, $\varepsilon = 0,93$ (стіна), $\varepsilon = 0,85$ (вікно) $L = 10$ м	3,8 (0,1)	4,5 (0)
$T_{out}^{air} = +2$ °C, $T_{refl} = -2,1$ °C, $\varepsilon = 0,93$ (стіна), $\varepsilon = 0,85$ (вікно) $W = 60 \%$	3,7 (0)	4,5 (0)

Отримано експериментальні оцінки похибки тепловізійного вимірювання температури фасадів будівельних споруд, які можуть досягати 1,8 °C при невиконанні методичних рекомендацій з правилами проведення тепловізійних зйомок, 1,1 °C - при введенні коригувальних параметрів із занадто коротким часом зйомки після включення тепловізора і 0,4 °C - у разі повного дотримання методичних правил зйомки і наявності відносно слабких відхилень значень відбитої температури фону і коефіцієнта випромінювання від істинних. В цілому, якщо надлишкова температура зовнішніх фасадів щодо температури зовнішнього повітря становить від 1,5 до 5 °C в залежності від фактичного опору теплопередачі огорожувальних конструкцій і кліматичних умов, то похибка визначення теплових втрат і опору теплопередачі може становити від

12 до 170% згідно з формулою (3.1). При цьому найбільші похибки мають місце при обстеженні огороджувальних конструкцій з високим опором теплопередачі при неточному заданні коригувальних параметрів і недотриманні методичних вимог до тепловізійної зйомці, зокрема, при використанні тепловізора зразу після включення в умовах низьких температур зовнішнього повітря.

ВИСНОВКИ

В ході виконання магістерської роботи було розглянуто технічне забезпечення за допомогою якого можна провести термографічний аналіз теплоізоляції споруд.

Проаналізовано основні типи та класи приймачів тепловізорів, встановлено зв'язок між типом приймача, сферою його застосування та об'єктом контролю.

В магістерській роботі приведені характеристики тепловізорів які використовуються для контролю теплоізоляції споруд. Також описано критерії вибору тепловізорів які використовуються для контролю теплоізоляції споруд.

В третьому розділі магістерської роботи було проаналізовано основні складові та здійснено оцінку сумарної похибки тепловізійного контролю.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Арестов, О. П. Теплотехнічні виміри : Навч. посібник для вузів / О. П. Арестов . - Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2008. 176 с.
2. Принцип роботи тепловізора. <https://ekspertiza.com.ua/uk/tse-korisno-znati/791-pryntsyp-roboty-teplovizora>
3. Неня О.В. Сучасні тепловізори для спеціального та повсякденного застосування. Сучасна спеціальна техніка №4(47), 2016. С.108-120.
4. Ілюшенко В.І. Вимірювання в енергетиці / В.І.Ілюшенко, А.І.Туяхов, С.М.Саф'янц. - Донецьк:Норд-Прес, 2008. 352 с.
5. <http://www.dissercat.com/content/teplovoi-metod-nerazrushayushchego-kontrolya-i-diagnostiki-tekhnicheskogo-sostoyaniya-materiz>.
6. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань температури. Безконтакт-ні засоби вимірювання температури: ДСТУ 3194:2005. – [Чинний від 2005-02-28]. – К.: Держспоживстандарт України, 2005. 15 с.
7. <http://praci.vntu.edu.ua/article/download/1316/763>.
8. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко // Навчальний посібник. - Львів: Видавництво "Безкид Біт", 2003. 544 с.