

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

К. В. Махотіло, Л. І. Лисенко, О. В. Булгаков

ОСНОВИ ТЕРМОГРАФІЇ

Навчальний посібник
для студентів спеціальностей
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
та 144 «Теплоенергетика»

Рекомендовано
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 1 від 25.02.21 р.

Харків

2021

УДК 772.96
О 75

А в т о р и :

К. В. Махотіло, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Л. І. Лисенко, канд. техн. наук, доцент,
О. В. Булгаков, магістр,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Р е ц е н з е н т и :

О. О. Мірошник, д-р техн. наук, професор,
Харківський національний технічний університет
сільського господарства ім. Петра Василенка
Д. М. Калюжний, канд. техн. наук, доцент,
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова

Махотіло К. В., Лисенко Л. І., Булгаков О. В.

О 75 Основи термографії : навчальний посіб. / К.В. Махотіло, Л. І. Лисенко,
О. В. Булгаков. Харків : ФЛП Панов А.М., 2021. 106 с.

ISBN 978-617-7947-76-8

Розглянуто теоретичні та практичні основи проведення термографічних обстежень обладнання та будівель. Описано фактори, що впливають на точність вимірювання за допомогою сучасних портативних тепловізорів, типові помилки при проведенні термографічних обстежень та способи їх уникнення. Наведено численні приклади теплових зображень електротехнічного обладнання, механізмів та будівель з результатами їх аналізу.

Для студентів спеціальностей 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», 144 «Теплоенергетика» та фахівців з енергетичного менеджменту.

Іл. 38. Бібліогр. 5

УДК 772.96

ISBN 978-617-7947-76-8

© К. В. Махотіло, Л. І. Лисенко,
О. В. Булгаков, 2021 р.

ВСТУП

В останні десятиліття тепловізійні камери, або скорочено – тепловізори, стали незамінним інструментом для енергетичного обстеження будівель та технічної діагностики промислового обладнання.

Сучасні портативні тепловізори є засобом неруйнівного контролю, що здатний за секунди візуалізувати інформацію, яку неможливо або вкрай важко отримати іншими методами. Тепловізор – це не просто прилад, що дозволяє дистанційно вимірювати температуру. За його допомогою енергоаудитори здатні оцінити тепловтрати, виявити пошкодження ізоляції, знайти джерела проникнення вологи чи витоку повітря. Інженери-електрики можуть виявити дефекти контактних з'єднань, перевантажене чи пошкоджене електрообладнання. На виробництві тепловізор дозволяє виявити пошкоджені підшипники чи шестерні, визначити розподіл температур на поверхнях нагріву, проаналізувати завантаження та режими роботи різноманітного обладнання.

Цей посібник містить стисле викладення теоретичних основ фізичних процесів, що лежать в основі термографії, опис конструкції та характеристик сучасних тепловізорів, а також детальний розгляд факторів, що впливають на точність вимірювань температури за допомогою тепловізора, типових помилок при проведенні тепловізійних обстежень обладнання і будівель та шляхів їх уникнення. У додатках наведено табличні дані, необхідні для налаштування тепловізора, а також численні приклади тепловізійних зображень реальних об'єктів з їх аналізом. Усе це дозволяє вивчити принцип роботи тепловізора та опанувати практичні навички його застосування.

Автори посібника висловлюють подяку усім власникам авторських прав на наведені в посібнику теплові зображення та ілюстрації, що надали їх в мережі Інтернет для вільного або некомерційного використання.

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

RTC – (*reflected temperature compensation*) компенсація відбитої температури;

ІЧ – інфрачервоний;

ОВКП – опалення, вентиляція та кондиціонування повітря;

ПЗ – поле зору;

НІО – найменший ідентифікований об'єкт;

НВО – найменший вимірюваний об'єкт, або «пляма вимірювання»;

J – випромінення, що потрапляє на об'єкт (інцидентне випромінення);

J_e – випромінення, що випускається об'єктом;

J_r – відбите випромінення;

J_t – пропущене випромінення;

R – тепловий опір матеріалу;

U – коефіцієнт проникнення тепла матеріалу;

ε – коефіцієнт випромінення (тепловіддача, випромінювальна здатність);

ρ – коефіцієнт відбиття;

τ – коефіцієнт пропускання.

1. ВСТУП ДО ТЕРМОГРАФІЇ

Термографія – це спосіб отримання зображення в інфрачервоних променях, що показує картину розподілу температури вимірюваного об’єкта. Вимірювальний прилад, який використовується при термографії, називають тепловізійною камерою, або інфрачервоною камерою, або тепловізором.

Кожне тіло з температурою вище абсолютного нуля ($0\text{ K} = -273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) випускає інфрачервоне випромінення (енергію). Інтенсивність цього випромінення згідно з законом Стефана–Больцмана [1] залежить від температури тіла. Хоча інфрачервоне випромінення майже повністю невидиме для людського ока, тепловізор здатен виявити його, виміряти енергію і визначити температуру вимірюваного об’єкта без фізичного контакту.

Тепловізор, аналогічно стандартній фотографічній камері, за допомогою оптичної системи фокусує інфрачервоне випромінення на спеціальному електронному датчику. Датчик перетворює інфрачервону енергію в електричний сигнал, який після посилення і складної обробки використовується для створення теплового зображення.

Теплове зображення (або тепловий знімок, або термограма), яке відображається на екрані тепловізора, являє собою візуалізацію розподілу температури на поверхні об’єкта у фіктивних кольорах (рис. 1.1 [2]).



Рисунок 1.1 – Теплові зображення електричного роз’єму (а) та будинку (б)

Але термографія – це також і спосіб діагностування обладнання та обстеження будівель. Термографія як метод контролю базується на тому факті, що несправності більшості компонентів електричного та механічного обладнання зазвичай супроводжуються підвищенням температури. Це можуть бути ослаблені електричні з'єднання чи зношений підшипник. Вивчаючи розподіл температури в експлуатаційних компонентах системи, можна локалізувати місце несправності та оцінити її серйозність. Аналогічно, вивчаючи розподіл температури по поверхні конструкцій будівлі, можна виявити місця з пошкодженою чи недостатньою термоізоляцією, місця витоку чи притоку повітря або місця протікання води.

Сучасний тепловізор – це складний оптико-електронний прилад у портативному корпусі зі зручним управлінням. Завдяки тому, що використання тепловізора не вимагає фізичного контакту з досліджуваним об'єктом, тепловізійне обстеження може проводитись на робочому обладнанні в нормальних експлуатаційних умовах без зупинок виробництва і додаткових втрат (рис. 1.2 [2]). Області застосування тепловізора в техніці охоплюють обстеження і діагностування електроустаткування, механічного обладнання, обладнання термічної обробки, будівель та споруд.



Рисунок 1.2 – Використання тепловізора для перевірки електроустаткування та обстеження будівлі

1.1. Фізичні принципи термографії

1.1.1. Тепло та електромагнітне поле

Як відомо, частинки матерії знаходяться в стані постійного руху, що створює внутрішню кінетичну енергію об'єкта або системи, яка називається тепловою енергією. Вона вимірюється в джоулях (Дж) або калоріях (кал). *Температура* – це величина, яка характеризує середню внутрішню енергію об'єкта чи системи. Чим вища температура, тим швидше вібрують частинки матерії.

Теплова енергія може бути передана від одного об'єкта чи системи до іншого у процесі, відомому як «нагрівання». Передача теплової енергії відбувається від тіла з вищою температурою до тіла з нижчою температурою за допомогою випромінення, конвекції або теплопровідності. На практиці для розрахунків передачі теплової енергії користуються величиною теплового потоку, який вимірюється у Дж/с, кал/с або Вт. Чим більша різниця температур між двома тілами, тим вища швидкість теплового потоку. Процес передачі теплової енергії триває доти, поки не встановиться рівновага температур.

Між твердими тілами тепло передається в основному шляхом теплопровідності (кондукції), а між рідинами та газами – за допомогою конвекції. Проте тепловізійні пристрої безпосередньо виявляють лише теплове (інфрачервоне) випромінення.

1.1.2. Електромагнітний спектр

Через випромінення тепло передається у вигляді електромагнітних хвиль, які характеризуються своєю довжиною. Так, наприклад, рентгенівські промені мають короткі довжини хвиль, менше міліметра, а як радіохвилі можуть мати довжини в кілька кілометрів. Інфрачервоне випромінення поводить себе майже так само, як видиме світло. Воно може бути відбитим (як світло відбивається дзеркалом) або пропущеним (як світло проходить крізь прозоре скло).

Наше візуальне сприйняття теплового випромінення значною мірою залежить від кількості енергії, що випромінюється. Дуже гарячі об'єкти (такі, як Сонце чи розпечений метал) випромінюють теплову енергію на довжинах хвиль, які знаходяться в межах видимої області спектра, в той час, як більш холодні

об'єкти випускають випромінення на більш довгих хвилях, які не можна побачити.

На рис. 1.3 [3] показано, як розпечена частина металевого стрижня світиться білим світлом. Далі від кінчика стрижня, у міру зниження температури, світло послідовно переходить до жовтого і червоного кольору, а потім і до невидимої для ока людини інфрачервоної області спектра. Проте спеціальні датчики можуть фіксувати теплове випромінення і в інфрачервоній області.



Рисунок 1.3 – Світіння розігрітого металевого стрижня залежно від температури ділянки (звичайне фото)

Теплова енергія від нагрітого об'єкта випромінюється з різною потужністю в різних ділянках електромагнітного спектра. На рис. 1.4 показано різні форми випромінення енергії в електромагнітному спектрі.

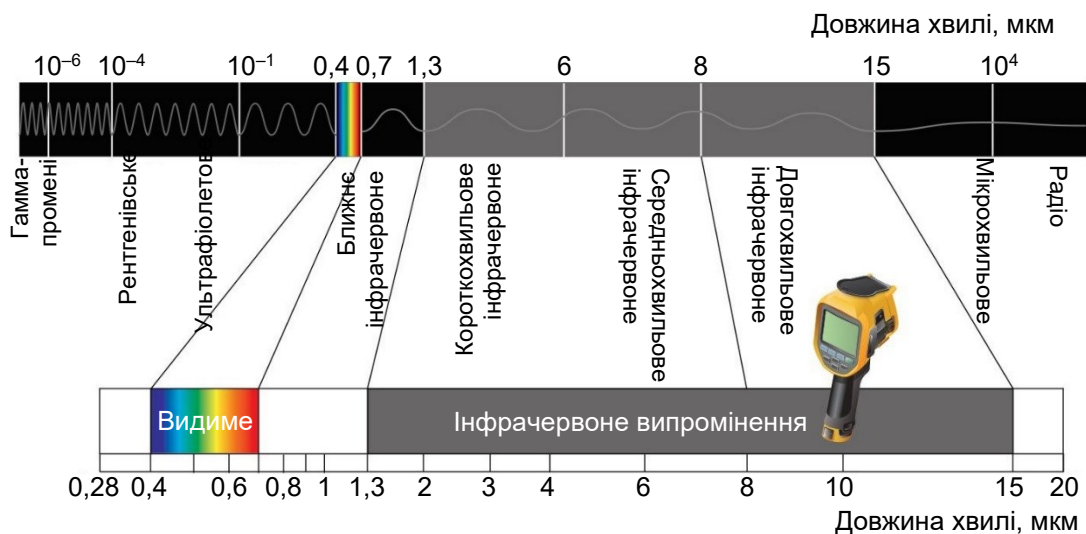


Рисунок 1.4 – Електромагнітний спектр

Електромагнітний спектр містить рентгенівські промені, ультрафіолетове, інфрачервоне і радіовипромінювання. Вони відрізняються довжиною хвилі. Людське око реагує на випромінювання в діапазоні від 0,4 до 0,75 мкм (видиме світло). Проте, для визначення температури об'єкта практичне значення має випромінювання в діапазоні від 0,2 до 20 мкм. Тепловізори зазвичай вимірюють довгохвильове інфрачервоне випромінювання в діапазоні від 8 до 14 мкм.

1.1.3. Розподіл енергії випромінювання по спектру

На рис. 1.5 показано розподіл енергії, яку випромінює «абсолютно чорне тіло» при різних температурах нагріву. Як можна бачити, чим вища температура, тіла, тим більше пікове значення енергії випромінювання (закон зміщення Віна [1]). Причому при підвищенні температури довжина хвилі, що відповідає максимальному значенню енергії випромінювання, зменшується. При низьких температурах більша частина енергії випромінюється в інфрачервоній області спектра з великими довжинами хвиль.

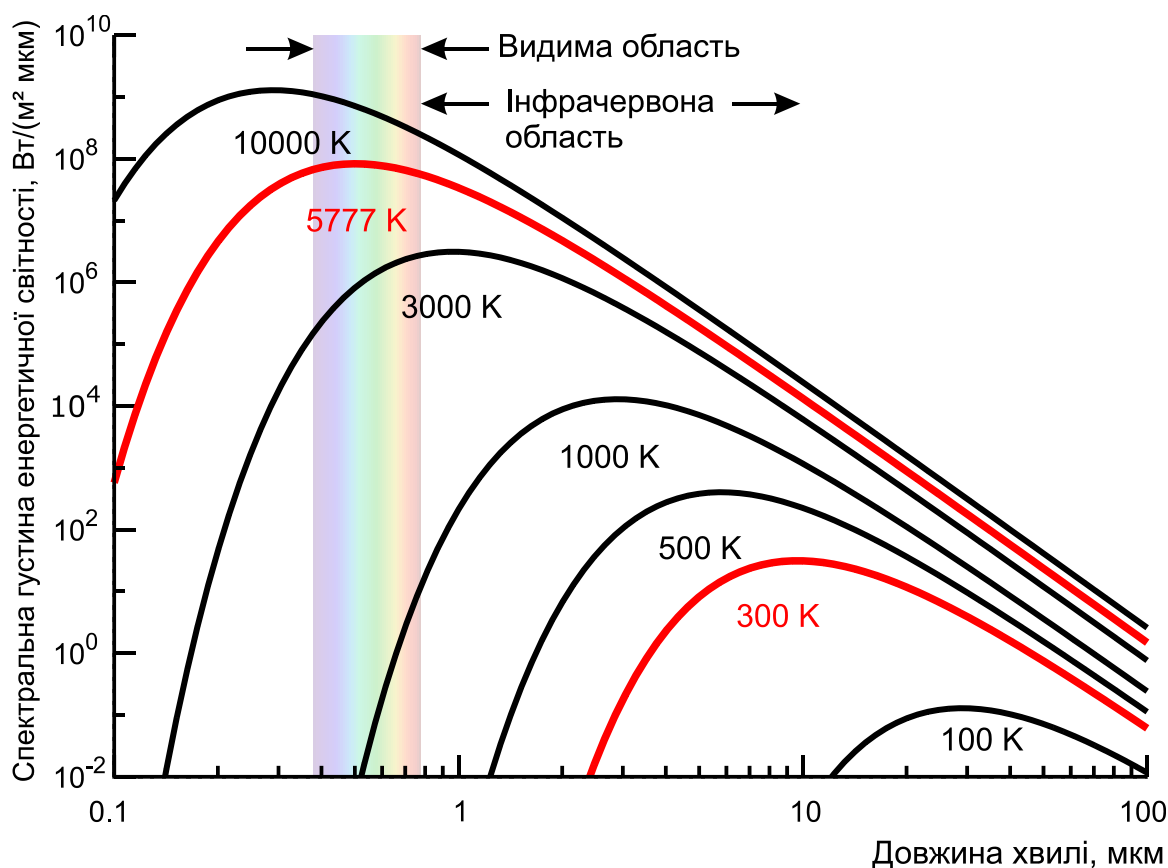


Рисунок 1.5 – Розподіл енергії інфрачервоного випромінювання по електромагнітному спектру

1.2. Вимірювання інфрачервоного випромінення

Тепловізор вимірює не безпосередньо температуру об'єкта, а тільки інфрачервоне випромінення від нього. Тому для інтерпретації отриманих за допомогою цього пристрою теплових зображень важливо розуміти фактори, які впливають на розсіювання випромінення в навколишньому середовищі та точність його вимірювання.

1.2.1. Складові вимірюваного випромінення

Датчик тепловізора, направлено на вимірюваний об'єкт, отримує енергію інфрачервоного випромінення, що має декілька складових (рис. 1.6). Частина цієї енергії випромінюється безпосередньо об'єктом. Це випромінення пов'язане з внутрішньою тепловою енергією об'єкта і, власне, є предметом уваги оператора тепловізора.



Рисунок 1.6 – Інфрачервоне випромінення та відбиття і пропускання випромінення

Однак до тепловізора потрапляє й інша складова енергії, що випромінюється іншими джерелами в оточенні вимірюваного об'єкта і відбивається від його поверхні (наприклад, відбите від металевої поверхні тепло сонця, показане на рис. 1.7 [3]). Ще одна складова енергії потрапляє до тепловізора від інших джерел після того, як проходить крізь вимірюваний об'єкт (наприклад, тепло, що проходить крізь плівку, на рис. 1.8 [3]).

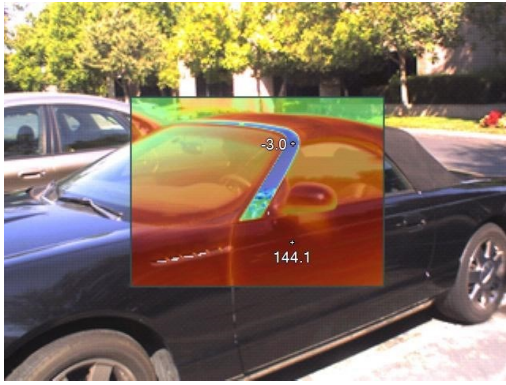


Рисунок 1.7 – Інфрачервоне випромінення відбивається від хромованої смуги

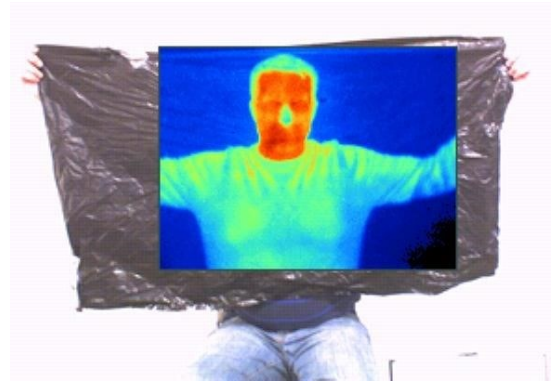


Рисунок 1.8 – Інфрачервоне випромінення проходить крізь неprozору пластикову плівку

Таким чином, повне випромінення, що залишає поверхню об'єкта, J (інцидентне випромінення), являє собою суму трьох таких компонентів: випущене випромінення J_e , відбите випромінення J_r і пропущене випромінення J_t .

$$J = J_e + J_r + J_t. \quad (1.1)$$

Усі три компоненти інцидентного випромінення виявляються тепловізором. Однак тільки випромінення J_e , випущене об'єктом, є показником його істинної внутрішньої температури T .

1.2.2. Коефіцієнт випромінення

Коефіцієнт випромінення ε (або тепловіддача, або випромінювальна здатність) є мірою здатності матеріалу випускати інфрачервоне випромінення. Об'єкт, який має здатність випромінювати максимально можливу енергію для його температури, відомий як ідеальний випромінювач – «абсолютно чорне тіло».

На практиці не існує ідеальних випромінювачів, і реальні об'єкти випромінюють менше енергії, ніж абсолютно чорне тіло. Рис. 1.9 показує, чому об'єкти не є ідеальними випромінювачами. Коли теплова енергія зсередини тіла передається до його поверхні, певна її кількість завжди відбивається назад, всередину і ніколи не покидає тіло у вигляді випромінення.

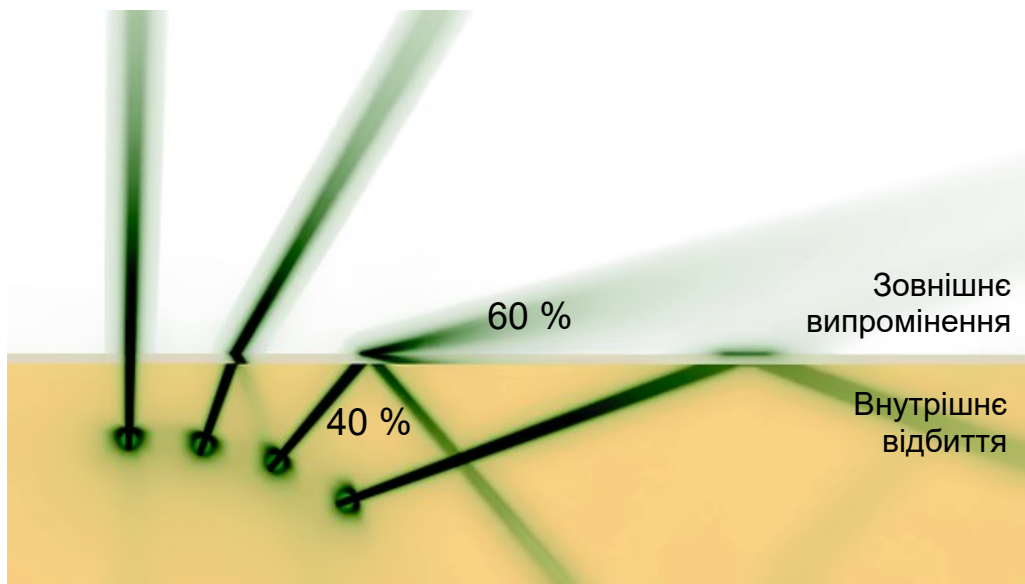


Рисунок 1.9 – Відбиття інфрачервоного випромінення всередину тіла

Коефіцієнт випромінення дорівнює відношенню кількості енергії, яка випромінюється тілом, до кількості, яку випромінює абсолютно чорне тіло з тією ж температурою:

$$\varepsilon = J_{\varepsilon}(T) / J_0(T), \quad (1.2)$$

де $J_{\varepsilon}(T)$ – випромінення об'єкта при температурі T ; $J_0(T)$ – випромінення чорного тіла при температурі T .

Значення коефіцієнта випромінення відрізняється у різних матеріалів. Більшість металів мають низьку випромінювальну здатність (наприклад, у срібла $\varepsilon \approx 0,02$, в алюмінію $\varepsilon \approx 0,03$). Тоді як такі речовини, як цегла, скло або вода мають коефіцієнт випромінення більше 0,9. Максимальний коефіцієнт випромінення $\varepsilon = 1$ в дійсності не зустрічається, бо всі реальні тіла мають $\varepsilon < 1$.

Полірована поверхня завжди матиме значно нижчий коефіцієнт випромінення, ніж шорстка поверхня того ж матеріалу. На рис. 1.10 наведено термограму (зверху) та фотографію (знизу) так званого куба Леслі. Кожна сторона цього металевого куба покрита іншим матеріалом, а сам він заповнений водою, тому усі стінки мають однакову температуру (на рисунку це близько 55 °C). Сторона

куба, що пофарбована в чорний колір, має більше значення коефіцієнта випромінювання, ніж полірована алюмінієва поверхня інших сторін куба, і тому виглядає на термограмі більш нагрітою. Її виміряна температура ($52,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) близька до дійсної температури куба. Полірована сторона куба виглядає більш холодною. Її виміряна температура ($33,9\text{ }^{\circ}\text{C}$) близька до температури навколишнього середовища. Також на полірованій стороні чітко видно теплове віддзеркалення теплої руки. На іншій парі зображень показано сторону куба, пофарбовану у білий колір. Як тут видно, хоч вона і відрізняється у видимому спектрі, біла поверхня куба має такий самий коефіцієнт випромінювання, як і чорна.

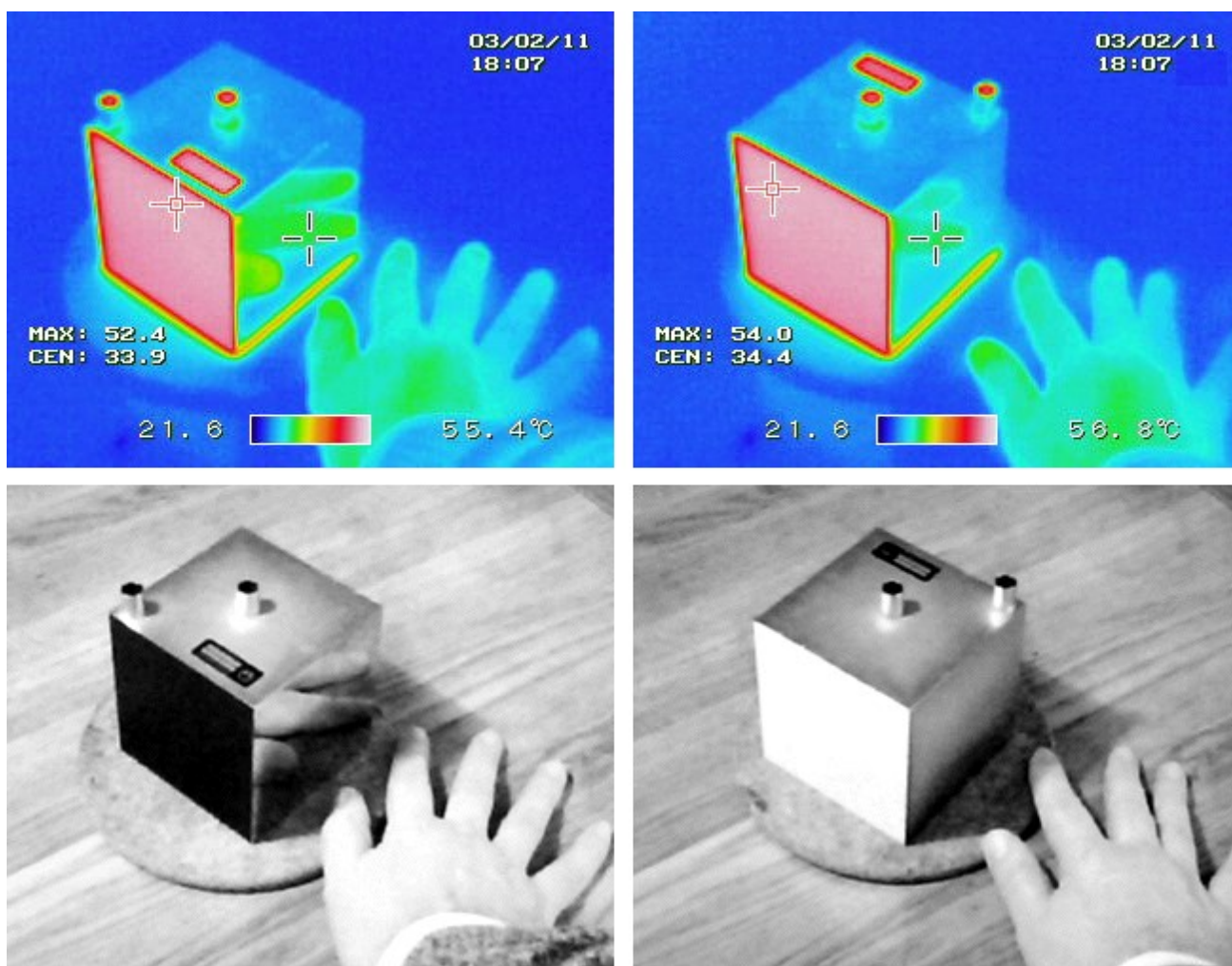
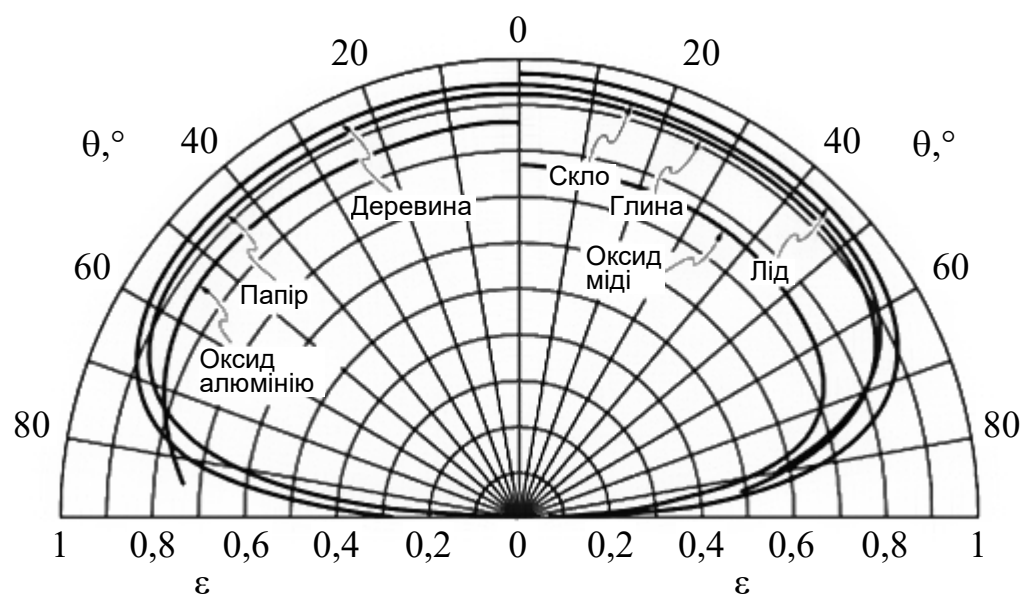


Рисунок 1.10 – Термограма та фотографія куба Леслі з різних сторін

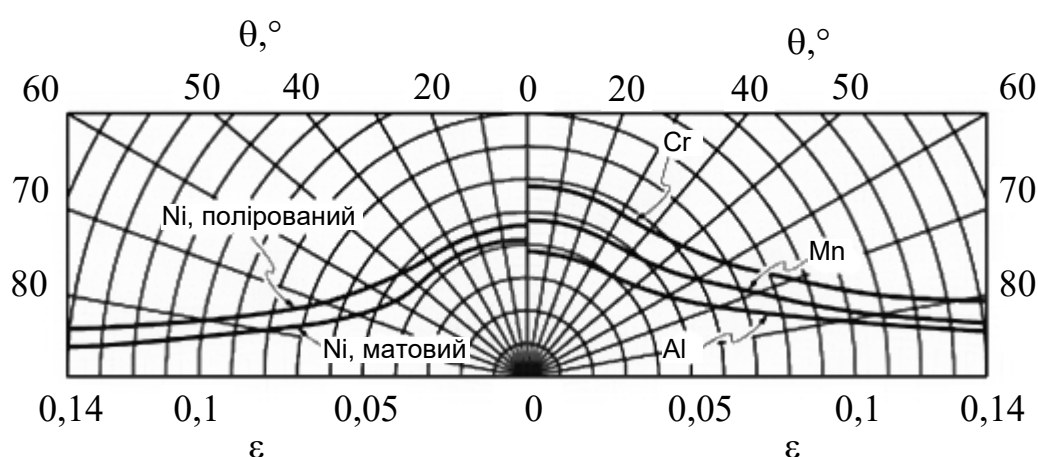
На практиці створення пазів і порожнин на поверхні є широко використовуваним методом збільшення коефіцієнта випромінювання матеріалу. Окиснення і

корозія також мають значний ефект. Наприклад, полірована латунь має коефіцієнт випромінення $\varepsilon \approx 0,04$, а окиснена – до 0,6.

Ще одним важливим фактором, який впливає на фактичне значення коефіцієнта випромінення, є кут, під яким спостерігається поверхня тіла. Цей кут називають «кут падіння» і відраховують від перпендикуляра до поверхні. На рис. 1.11 подано залежність фактичного коефіцієнта випромінення ε різних матеріалів від кута падіння.



Діелектрики



Провідники

Рисунок 1.11 – Вплив кута падіння θ на фактичний коефіцієнт випромінення ε різних матеріалів

З рис. 1.11, наприклад, видно, що коефіцієнт випромінення скла при погляді на нього під кутом $80-90^\circ$ від перпендикуляра становить менше 0,5. Разом з тим, при прямому куті падіння, $\varepsilon > 0,9$.

Як напрям відбиття видимого світла може бути переорієнтований шляхом зміни кута нахилу дзеркала, так і інфрачервоні хвилі можуть бути спрямовані в різних напрямках. Наприклад, матеріали, з якого складаються скло і пісок, мають близькі значення коефіцієнта випромінення ($\varepsilon \approx 0,92$). Проте, інфрачервоне випромінення, що випускається склом, сконцентроване в одному напрямку і може бути виявлене лише в цьому напрямку. Однак випромінення піску рівномірно розподілене у просторі. Тому на практиці матеріали поділяються на «дзеркальні», для яких коефіцієнт випромінення залежить від напрямку, або «дифузні», для яких така залежність відсутня.

Коефіцієнт випромінення блискучої металевої поверхні залежить і від її температури. Однак неметалеві матеріали (наприклад, ПВХ, бетон, органічні речовини) мають високий коефіцієнт випромінення ($\varepsilon \approx 0,8-0,95$), який не залежить від їх температури. Це пов'язано з тим, що їх випромінення припадає на довгохвильовий інфрачервоний діапазон спектра.

1.2.3. Коефіцієнт відбиття

Коефіцієнт відбиття ρ є мірою здатності матеріалу відбивати інфрачервоне випромінення. Він залежить від властивостей поверхні, температури та типу матеріалу. Загалом, гладкі, поліровані поверхні відбивають сильніше, ніж шорсткі, матові поверхні, зроблені з того ж матеріалу. Кут відбиття інфрачервоного випромінення завжди дорівнює куту падіння.

Коефіцієнт відбиття ρ дорівнює відношенню енергії, що відбита від поверхні об'єкта, до повної енергії, що потрапила на неї:

$$\rho = J_r / J_{\text{exp}}, \quad (1.3)$$

де J_r – випромінення, відбите від об'єкта; J_{exp} – повне випромінення, що потрапило на об'єкт.

Для врахування температури, яка пов'язана з інфрачервоним випроміненням, відбитим від вимірюваного об'єкта, а не випущеним ним, в тепловізорі використовується параметр налаштування «компенсація відбитої температури» RTC. На практиці при термографії об'єктів у закритих приміщеннях, значення RTC зазвичай відповідає температурі навколишнього середовища. Її можна виміряти за допомогою повітряного термометра або випромінювача Ламберта.

1.2.4. Коефіцієнт пропускання

Коефіцієнт пропускання τ є мірою здатності матеріалу пропускати інфрачервоне випромінення. Він залежить від типу і товщини матеріалу. Більшість матеріалів не пропускають крізь себе довгохвильове інфрачервоне випромінення.

Коефіцієнт пропускання τ дорівнює відношенню енергії, що пройшла крізь об'єкт, до повної енергії, що потрапила на нього:

$$\tau = J_t / J_{\text{exp}}, \quad (1.4)$$

де J_t – випромінення, що пройшло крізь об'єкт; J_{exp} – повне випромінення, що потрапило на об'єкт.

1.2.5. Взаємозв'язок між випроміненням і відбиттям

На рис. 1.12 [4] показані всі складові вимірюваного випромінення об'єкта і відповідні їм коефіцієнти випромінення, відбиття і пропускання.

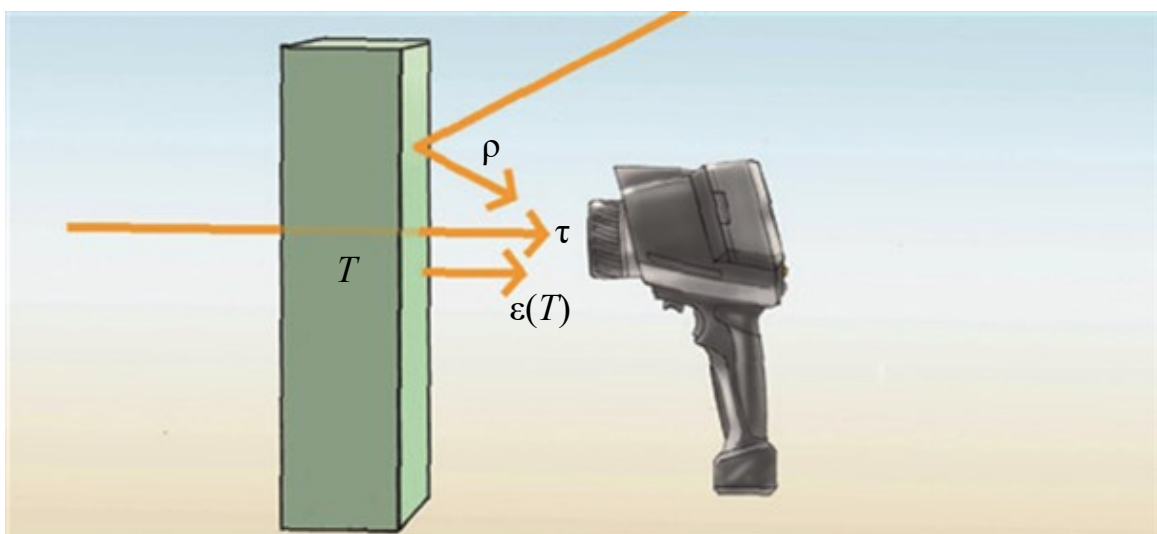


Рисунок 1.12 – Зв'язок коефіцієнтів випромінення, відбиття і пропускання

Згідно з законом Кірхгофа для випромінення, що виходить з поверхні об'єкта [1], сума коефіцієнтів випромінення, відбиття і пропускання дорівнює 1:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1. \quad (1.5)$$

Для абсолютно чорного тіла: $\varepsilon = 1$, $\rho = 0$ і $\tau = 0$. Для ідеального відбивача: $\varepsilon = 0$, $\rho = 1$ і $\tau = 0$. Для ідеального прозорого тіла: $\varepsilon = 0$, $\rho = 0$ і $\tau = 1$.

Оскільки на практиці вплив пропускання випромінення об'єктом зазвичай є малим, для реальних об'єктів коефіцієнт пропускання τ може бути опущеним, і тоді (1.5) спрощується до

$$\varepsilon + \rho = 1. \quad (1.6)$$

Для термографії це означає наступне. Чим нижчим є коефіцієнт випромінення ε , тим вищою є частка відбитого інфрачервоного випромінення ρ , тим важче визначити точне значення температури вимірюваного об'єкта і тим більш важливо, щоб у тепловізорі було встановлено правильне значення величини компенсації відбиття температури RTC.

Об'єкти з високим коефіцієнтом випромінення $\varepsilon \geq 0,8$ мають низький коефіцієнт відбиття ($\rho = 1 - \varepsilon$, $\rho \leq 0,2$). Їх температура може бути дуже точно виміряна за допомогою тепловізора. Об'єкти з середнім коефіцієнтом випромінення в діапазоні $0,6 \leq \varepsilon \leq 0,8$ мають середній коефіцієнт відбиття ($0,2 \leq \rho \leq 0,4$). Їх температура може бути достатньо точно виміряна за допомогою тепловізора. Об'єкти з низьким коефіцієнтом випромінення $\varepsilon \leq 0,6$ мають високий коефіцієнт відбиття ($\rho \geq 0,4$). Вимірювання їх температури тепловізором можливо, однак отримані результати можуть бути неточними та потребують критичної оцінки.

1.2.6. Вплив перепаду температур

В холодний зимовий день стіна будинку з опаленням випромінює тепло назовні. В літню пору та ж сама стіна, нагріта сонцем, випромінює тепло всередину будинку, особливо якщо в приміщенні увімкнене кондиціонування повітря.

Відповідно до законів термодинаміки, це відбувається тому, що тепло завжди передається від теплого об'єкта до холодного [1]. Різниця температур між двома об'єктами ΔT визначає не тільки напрямок потоку теплової енергії, а і його інтенсивність. Тепло буде продовжувати передаватись від одного об'єкта до іншого, допоки не буде досягнута тепла рівновага, але швидкість передачі при цьому буде зменшуватися зі зменшенням ΔT .

Через те що випромінювана об'єктом енергія залежить не лише від його власних характеристик, але й від оточення, ΔT є визначальною змінною для термографії. Зі збільшенням різниці між температурою вимірюваного об'єкта і температурою навколишнього середовища зростає і важливість точного визначення коефіцієнта випромінювання ε та вірного налаштування RTC (компенсації відбитої температури). Рис. 1.13 [4] демонструє приклад, коли величина ΔT значно збільшує помилку вимірювання температури об'єкта через невірно визначене ε .

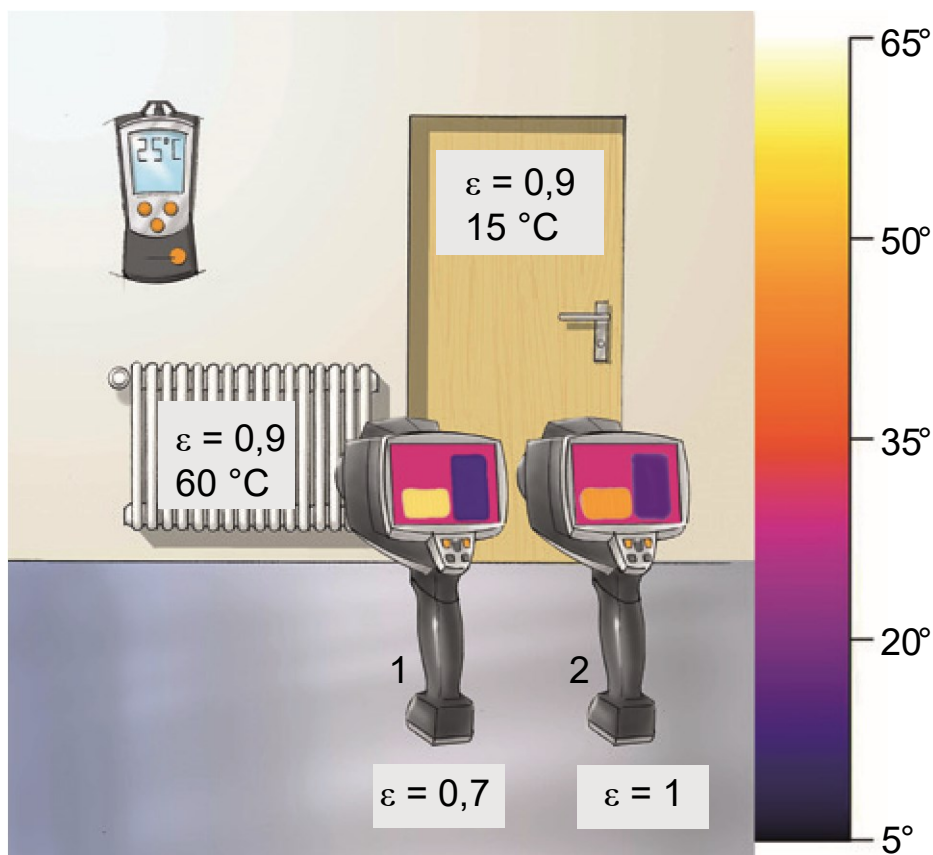


Рисунок 1.13 – Вплив установленого коефіцієнта випромінювання ε на точність вимірювання залежно від різниці температури об'єкта та оточення

У випадку, коли температура вимірюваного об'єкта ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$ у радіатора на рис. 1.13) вища температури навколишнього середовища ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$ на термометрі), завищене значення коефіцієнта випромінення ε в настройках тепловізора ($\varepsilon = 1$ у тепловізора 2 при дійсному значенні для радіатора $\varepsilon = 0,9$) призводить до занижених показань температури ($T \approx 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ у тепловізора 2). Занижене значення ε ($\varepsilon = 0,7$ у тепловізора 1) в цих умовах призводить до завищених показань температури ($T \approx 65\text{ }^{\circ}\text{C}$ у тепловізора 1).

У випадку, коли температура вимірюваного об'єкта ($15\text{ }^{\circ}\text{C}$ у двері на рис. 1.13) нижча температури навколишнього середовища ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$ на термометрі), завищене значення коефіцієнта випромінення ε в настройках тепловізора ($\varepsilon = 1$ у тепловізора 2 при дійсному значенні для дверей $\varepsilon = 0,9$) призводить до завищених показань температури ($T \approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ у тепловізора 2). Занижене значення ε ($\varepsilon = 0,7$ у тепловізора 1) в цих умовах призводить до занижених показань температури ($T \approx 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ у тепловізора 1).

Чим більшою є різниця ΔT між температурою вимірюваного об'єкта та навколишнього середовища і чим нижчим є коефіцієнт випромінення ε вимірюваного об'єкта, тим більшою є похибка вимірювання його температури тепловізором.

1.2.7. Пляма вимірювання та відстань вимірювання тепловізора

Для визначення відповідної відстані вимірювання і максимально допустимого розміру вимірюваного об'єкта необхідно взяти до уваги три змінні:

- поле зору (ПЗ);
- найменший ідентифікований об'єкт (НІО);
- найменший вимірюваний об'єкт (НВО), або «пляма вимірювання».

Поле зору тепловізора – це область, що видна його інфрачервоному датчику (рис. 1.14 [4]). ПЗ залежить від розміру датчика тепловізора та типу його об'єктива (наприклад, 32° у ширококутного об'єктива або 9° у телеоб'єктива). Ширококутні об'єктиви забезпечують більше ПЗ при меншому збільшенні теплового зображення у порівнянні з телеоб'єктивами.

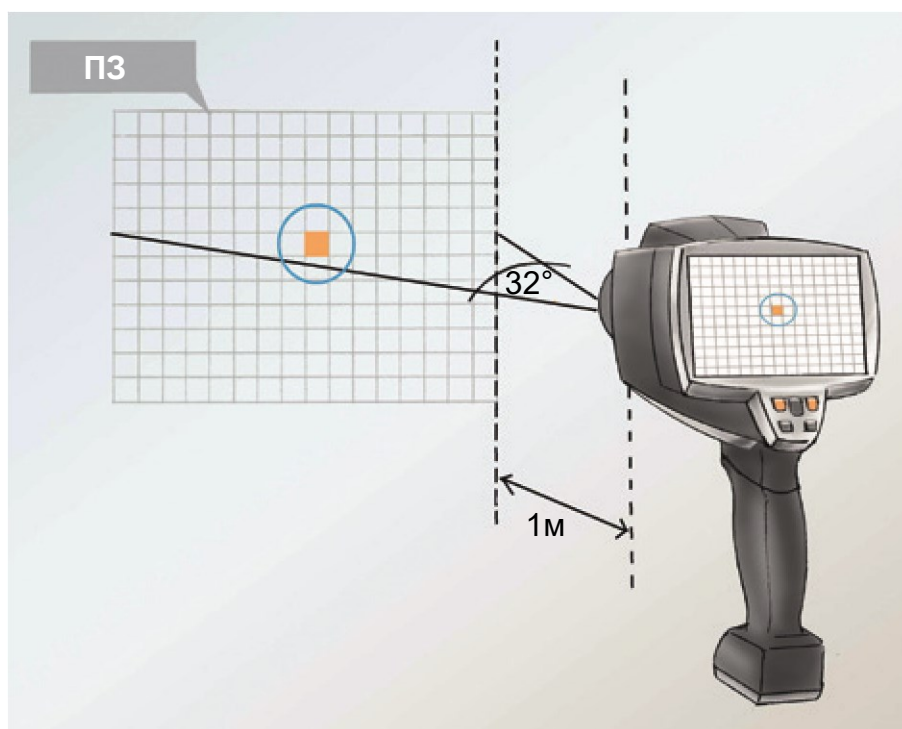


Рисунок 1.14 – Поле зору тепловізора

Розмір ПЗ, відстань вимірювання та роздільна здатність ІЧ датчика визначають найменший ідентифікований об'єкт тепловізора, тобто розмір об'єкта, що відповідає одному пікселю теплового зображення. На рис. 1.15 [4] наведено приклад визначення НІО. При просторовій (геометричній) роздільній здатності ІЧ датчика у 3,5 мрад і відстані вимірювання 1 м НІО такого тепловізора має довжину сторони 3,5 мм.

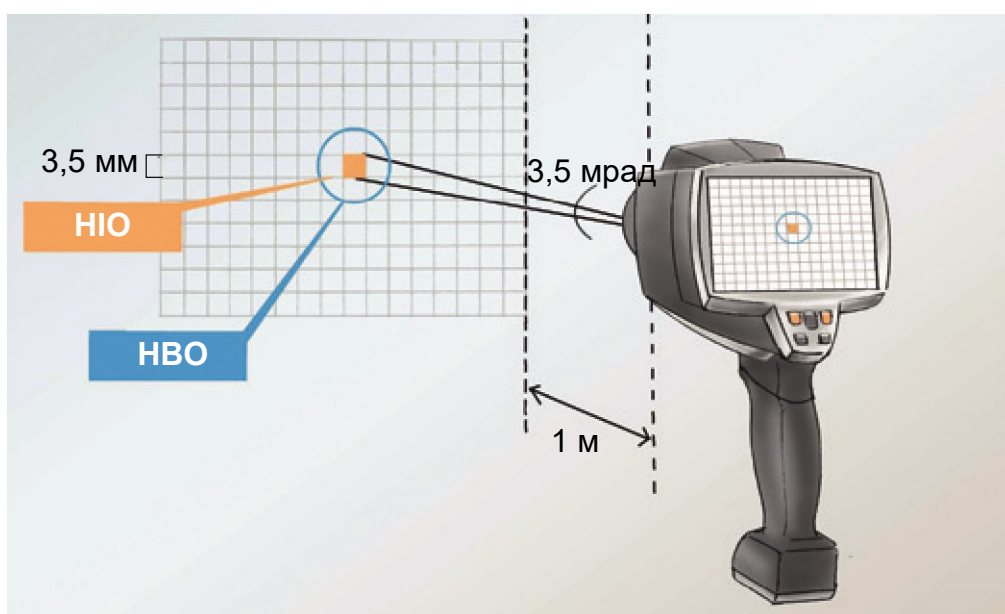


Рисунок 1.15 – Поле зору одного пікселя

Проте, щоб провести точне вимірювання температури, довжина сторони вимірюваного об'єкта повинна бути хоча б у 3 рази більшою за НІО. Тому для визначення розміру найменшого вимірюваного об'єкта тепловізора НВО застосовується правило:

$$\text{НВО} \approx 3 \times \text{НІО}. \quad (1.7)$$

Телеоб'єктиви збільшують теплове зображення вимірюваного об'єкта і забезпечують більшу просторову роздільну здатність тепловізора при меншому полі зору у порівнянні з ширококутними об'єктивами.

1.3. Тепловізор

1.3.1. Конструкція

Тепловізор – це прилад, який приймає енергію інфрачервоного випромінювання об'єктів, вимірює її та перетворює отримані дані в цифрове зображення, яке показує температуру поверхні вимірюваного об'єкта. Загальний принцип роботи тепловізора показано на рис. 1.16.

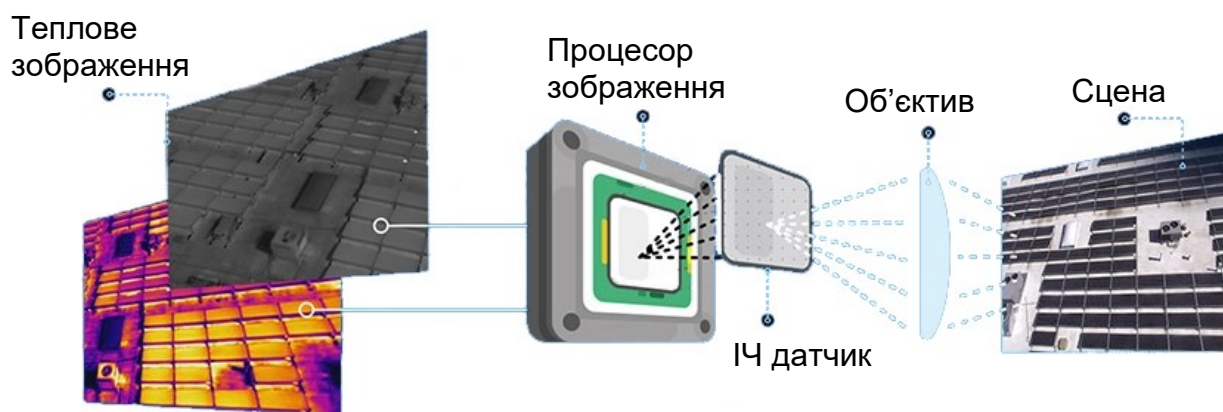


Рисунок 1.16 – Принцип роботи тепловізора

За допомогою оптичної системи лінз (рис. 1.17,б) інфрачервона енергія від сцени, що спостерігає тепловізор, фокусується на спеціальному чіпі ІЧ датчика (рис. 1.17,а), який містить тисячі детекторів (пікселів), розташованих у вигляді сітки. Кожен піксель у сітці детекторів реагує на зосереджену на ньому частку

інфрачервоної енергії від вимірюваного об'єкта і виробляє електричний сигнал. Цифровий процесор зображення збирає сигнали від усіх пікселів і за допомогою математичного алгоритму розраховує кольорову карту радіаційної температури об'єкта, в якій кожному значенню температури відповідає свій колір. Отримані дані зберігаються в пам'яті тепловізора, а матриця кольорів відображається на дисплеї як теплове зображення об'єкта.



Рисунок 1.17 – Інфрачервоний датчик (а) і об'єктив тепловізора (б)

В тепловізорах використовуються два типи інфрачервоних датчиків: теплові інфрачервоні датчики та квантові інфрачервоні датчики. Теплові ІЧ датчики простіші у використанні, але забезпечують гіршу якість зображення. Вони потребують більше часу на виявлення випромінення та повільніше реагують на його зміну. Квантові ІЧ датчики набагато більш чутливі й забезпечують чіткіше зображення. Проте вони є крихкими й мають бути розміщені в спеціальній охолоджувальній камері. Тому використання тепловізора з охолоджуванним квантовим ІЧ датчиком вимагає спеціальної професійної підготовки оператора.

Лінзи тепловізорів в основному робляться з германію, оскільки він є прозорим в інфрачервоній області спектра і має високий показник заломлення. Германій забезпечує один з найбільш ефективних способів передачі енергії інфрачервоного випромінення в ІЧ датчик і забезпечує чітке зображення.

Всі тепловізори поставляються зі стандартним об'єктивом, що підходить для більшості практичних завдань вимірювання. Але для отримання кращого фокусу і чіткішого зображення він може бути замінений на спеціальні об'єктиви залежно від передбачуваного застосування.

Ширококутні об'єктиви найкраще підходять для сканування великих цілей, що розташовані на відносно близькій відстані, таких як будівлі.

Телефотооб'єктиви дозволяють сфокусуватися на невеликих, дуже віддалених об'єктах. Вони бувають різних розмірів залежно від відстані, з якої оглядається об'єкт. Ці об'єктиви мають широке застосування при тепловізійному обстеженні електричних систем, теплоізоляції, водопровідних систем. Також вони є дуже корисними при обстеженні важкодоступних місць.

Макрооб'єктиви дозволяють сфокусуватися на малих, дуже близьких цілях. В основному вони використовуються для наукових досліджень.

На рис. 1.18 [3] наведено типові варіанти компоновки портативних тепловізорів. Більш компактні конструкції корпусу дозволяють спростити зберігання і перенесення приладу, в той час, як більш габаритні конструкції є більш довговічними та придатними для роботи в небезпечному середовищі. Конструкції можуть передбачати відкидний дисплей для зручності або більш надійний вбудований дисплей. Зараз більшість дисплеїв є сенсорними, але тепловізори також мають спеціальні механічні кнопки меню, що дозволяють роботу оператора в рукавичках або в забрудненому середовищі.



Рисунок 1.18 – Різні компоновки портативних тепловізорів

1.3.2. Технічні характеристики

1.3.2.1. Роздільна здатність ІЧ датчика

Можливо, найважливішою технічною характеристикою тепловізора є його роздільна здатність. Вища роздільна здатність забезпечує більш деталізоване і контрастне зображення, що особливо важливо при перегляді об'єктів на відстані. Тепловізори мають значно нижчу роздільну здатність, ніж найпростіші цифрові фотоапарати. У той час як навіть прості смартфони оснащуються камерами з десятками мегапікселей, тепловізори високого класу дають зображення з роздільною здатністю менше 0,1 мегапікселя (320×240).

1.3.2.2. Точність та чутливість

Точність тепловізора визначається як межа похибки його показань і, як правило, виражається у відсотках (наприклад, точність $\pm 2\%$ відповідає результату вимірювання, який відрізняється не більше ніж на 2 % від істинної температури мішені). Цю характеристику слід відрізняти від чутливості пристрою, що дорівнює найменшій зміні температури, яку він може виявити. Чутливість задається як зміна абсолютного значення температури. Для більшості тепловізорів загального призначення вона становить від 0,05 до 0,15 °C.

1.3.2.3. Тепловий діапазон

Тепловий діапазон тепловізора описує максимальну і мінімальну температури, які він може точно виміряти. Ця характеристика може значно відрізнятись для різних моделей тепловізорів. Для портативних пристроїв тепловий діапазон знаходиться в межах від -40 до $+2000$ °C. Тепловізори призначені для обстеження будівель, як правило, мають значно вужчий діапазон від -20 до $+350$ °C.

1.3.2.4. Частота кадрів

У міру того, як об'єктів переміщується від цілі до цілі, більшість сучасних тепловізорів безперервно оновлюють теплове зображення на дисплеї. Деякі моделі дозволяють записувати цей процес як відео. Частота кадрів тепловізора визначається кількістю послідовних зображень (або кадрів), які захоплюються за секунду. Ця характеристика часто виражається в герцах (Гц), де 1 Гц відповідає одному кадру в секунду.

1.3.3. Апаратні засоби

1.43.1. Система фокусування

Як і у звичайному фотоапараті, фокус тепловізора контролюється його об'єктивом. Якщо об'єкт знаходиться поза фокусом, то не лише його зображення виглядатиме розмитим, це також може призвести до неточного вимірювання температури. Більшість портативних моделей тепловізорів використовують один з трьох типів систем фокусування: з фіксованим фокусом, з ручним або з автоматичним фокусом.

Тепловізори з низькою роздільною здатністю зазвичай оснащуються системами з фіксованим фокусом. Вони сфокусовані на цілях, що розташовані не ближче мінімальної відстані (як правило ≈ 1 м) і далі від тепловізора.

Тепловізори з високою роздільною здатністю часто оснащені системою ручного чи автоматичного фокусування, які дозволяють отримати більш точні результати вимірювань в набагато ширшому діапазоні відстаней, починаючи з кількох сантиметрів. Ручний фокус вимагає більше часу для вимірювання і навичок використання. Системи з повністю автоматичним фокусуванням забезпечують швидке і точне наведення різкості, але не дають можливості обрати ціль для фокусування.

1.3.3.2. Підключення іншого обладнання

Деякі моделі портативних тепловізорів також надають можливість підключення інших пристроїв і обладнання. Наприклад, до тепловізора може бути підключений вимірювач вологості для підвищення точності вимірювання температури та збільшення здатності до виявлення вологості. Багато моделей мають підтримку Wi-Fi, що дозволяє їм вивантажувати файли й вести онлайн-трансляцію на смартфон, комп'ютер чи прямо в Інтернет.

1.3.3.3. Вбудовані апаратні засоби

Найбільш поширеними додатковими вбудованими засобами тепловізора є лампа підсвічування і лазерний покажчик, які допомагають операторам знаходити вимірюваний об'єкт у затемнених місцях. Також іноді лазерні засоби використовуються для вимірювання відстаней і автоматичного калібрування системи

фокусування. Вбудований в тепловізор звичайний фотоапарат дозволяє одночасно зберігати видиме і теплове зображення. Це є особливо корисною функцією для документування та аналізу результатів обстеження. В деяких моделях можливий режим злиття зображень, коли теплове зображення і фотографія об'єкта накладаються один на одне. Є моделі з вбудованим мікрофоном і функцією голосових приміток до теплового зображення.

1.3.4. Функції програмного забезпечення

1.3.4.1. Вбудоване програмне забезпечення

Усі тепловізори оснащені вбудованим програмним забезпеченням, яке створює зображення, виконує його коригування в режимі реального часу, а також дозволяє регулювати різні настройки й параметри. Ключовою функцією вбудованого програмного забезпечення тепловізора є можливість корекції коефіцієнта випромінювання, щоб виміряне за допомогою датчика інфрачервоне випромінювання від об'єкта було правильно перетворено в значення його температури. Деякі пристрої також надають можливість корекції коефіцієнта відбиття об'єкта.

1.3.4.2. Програмне забезпечення для комп'ютера

Окрім вбудованого, більшість тепловізорів поставляються разом з програмним забезпеченням для персонального комп'ютера, що дозволяє імпортувати, аналізувати та документувати теплові зображення. Можливості цих програмних пакетів варіюються від виконання базового аналізу зображення до застосування складних алгоритмів його обробки за допомогою сторонніх програм.

Більшість сучасних тепловізорів підтримують експорт файлів зображень у форматі JPEG, який можна переглядати стандартними засобами операційної системи персонального комп'ютера. Але існують і моделі, що використовують власні формати файлів, які можна переглядати та обробляти тільки за допомогою спеціального програмного забезпечення тепловізора.

Типове програмне забезпечення тепловізора для персонального комп'ютера підтримує такі способи обробки даних вимірювань:

- вибір способу забарвлення зображення за однією з колірних палітр (схем): «райдуга», «розжарювання заліза», «монохромна» та ін.

- вимірювання температури в певних точках кадру, обчислення максимального, мінімального або середнього значення температури всередині будь-якої певної області кадру, побудова температурних профілів, гістограм і ізотерм (рис. 1.19–1.22 [2]).
- редагування збережених параметрів об'єкта: коефіцієнт випромінювання, температура фону та ін.
- поліпшення зображення: масштабування, фільтрація та ін.

Деякі види програмного забезпечення тепловізора також включають засоби автоматизації генерування звітів про тепловізійне обстеження.

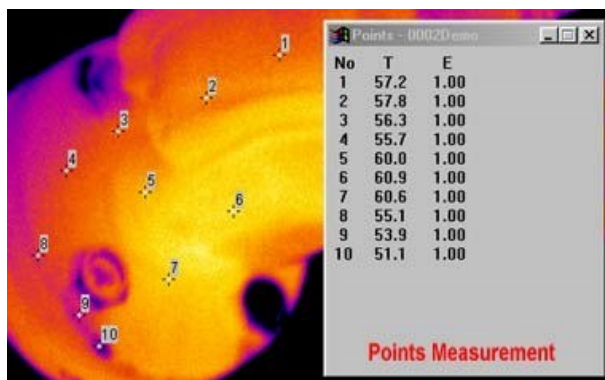


Рисунок 1.19 – Вимірювання температури у декількох точках

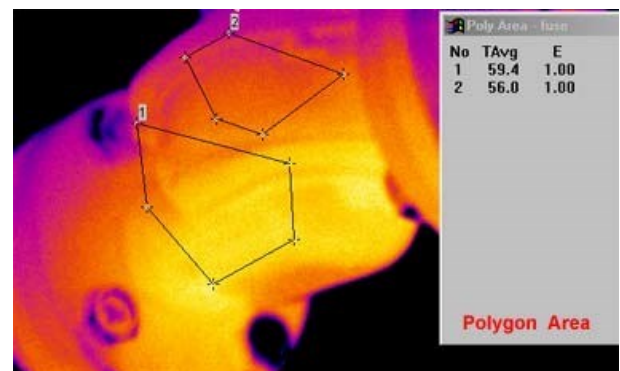


Рисунок 1.20 – Вимірювання середньої температури у кількох областях

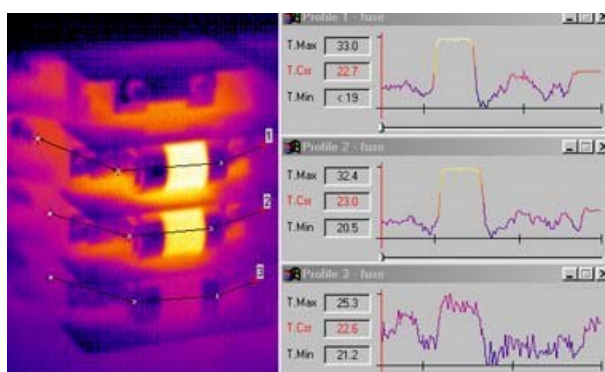


Рисунок 1.21 – Вимірювання профілів температури вздовж лінії

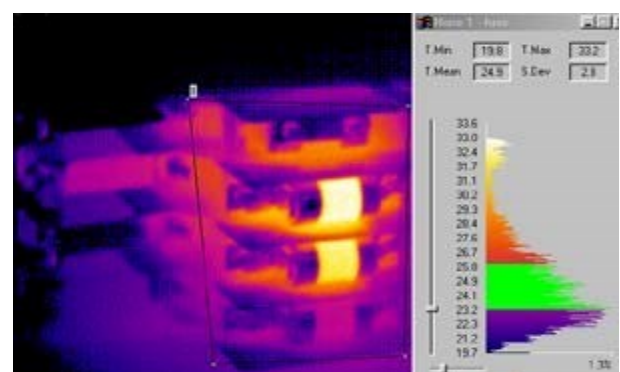


Рисунок 1.22 – Вимірювання розподілу температури у заданій області

1.4. Контрольні запитання

1. Назвіть області застосування тепловізора.
2. Яким законом пояснюється залежність між температурою тіла та інтенсивністю його інфрачервоного випромінювання?
3. Що таке «абсолютно чорне тіло»?
4. Яка мінімальна температура повинна бути у тіла для того, щоб воно генерувало інфрачервоне випромінювання?
5. Як пояснити світіння розігрітого металу у видимому спектрі?
6. Назвіть фактори, які впливають на теплове зображення об'єкта.
7. Що таке коефіцієнт випромінювання?
8. Що таке коефіцієнт пропускання?
9. Що таке коефіцієнт відбиття?
10. З чого складається повне випромінювання, що залишає поверхню об'єкта?
11. Чим пояснюється менший коефіцієнт випромінювання у полірованих поверхнях?
12. Як розраховується коефіцієнт випромінювання?
13. Що таке пляма вимірювання, та як кут огляду впливає на неї?
14. Як визначається правильна відстань вимірювання тепловізором?
15. Як визначити що об'єкт вимірювання знаходиться поза фокусом, та до чого це може призвести?
16. У чому вимірюється просторова роздільна здатність тепловізора?
17. Які типи датчиків використовуються у сучасних тепловізорах?
18. З яких матеріалів виготовляються об'єктиви тепловізорів і чому?
19. Які бувають типи об'єктивів тепловізорів та які у них сфери застосування?
20. Які способи обробки даних вимірювань доступні у типовому програмному забезпеченні тепловізора?

2. ПРАКТИКА ТЕРМОГРАФІЇ

Попри те, що тепловізор є надзвичайно корисним інструментом для оцінювання енергоефективності будівель і промислових процесів, дуже поширеним явищем є його неправильне використання або невірне тлумачення отриманих теплових зображень.

Важливо розуміти, що тепловізор вимірює лише температуру поверхні; він не може зазирнути всередину чогось або крізь щось. Багато матеріалів, які є прозорими для людського ока, такі як скло, не пропускають довгохвильове інфрачервоне випромінювання, і, таким чином, є непрозорими для тепловізора. Якщо вимірюваний об'єкт покритий таким матеріалом, тепловізор буде вимірювати тільки температуру поверхні покриття. Дійсно, розподіл температури по поверхні вимірюваного об'єкта на тепловому зображенні часто дозволяє ідентифікувати структуру його внутрішньої частини, але точне визначення температури елементів всередині вимірюваного об'єкта не є можливим.

Отримання висновків про результати тепловізійного дослідження потребує ретельної інтерпретації теплових зображень, тому що не всі коливання температури вимірюваного об'єкта обов'язково обумовлені несправністю його компонентів або будь-якими іншими проблемами. Щоб використання тепловізора було ефективним, оператор повинен впевнено знати основні закони передачі тепла, принципи роботи досліджуваних технічних пристроїв та систем, а також різні фактори, які можуть вплинути на вимірювання.

2.1. Кількісний та якісний аналіз теплових зображень

Теплові зображення, отримані за допомогою тепловізора, як правило, аналізують за допомогою кількісних або якісних методів.

Кількісний аналіз вимагає, щоб при вимірюванні була визначена істинна температура об'єкта дослідження. Але істинна температура може бути отримана лише за умови встановлення вірного значення коефіцієнта випромінювання поверхні об'єкта і врахування відбиття й пропускання інфрачервоного випромінювання. Останні фактори можуть бути суттєвою перешкодою для точного визначення

температури навіть при вірно визначеному коефіцієнті випромінення через те, що на практиці їх дуже важко оцінити кількісно. Кількісний аналіз є складним завданням і частіше застосовується у промисловості для точного вимірювання температури виробничих процесів.

Якісний аналіз, на відміну від кількісного, не вимагає будь-яких абсолютних вимірювань температури. Замість точних значень в центрі уваги знаходяться розподіл і відносні зміни температури. Цей тип аналізу є найбільш поширеним при обстеженні будівель, коли основною метою є виявлення витоків повітря, дефектів ізоляції або інших будівельних недоліків, які викликають відхилення температури від деякого базового рівня. Так саме і при обстеженні промислових об'єктів, для виявлення дефектів часто достатньо порівняння теплових картин двох схожих елементів, що працюють в однакових умовах. Точно визначати коефіцієнти випромінення і температуру об'єктів для цього нема потреби.

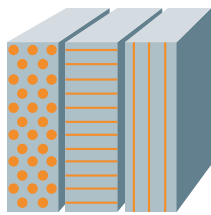
2.2. Фактори, які впливають на теплове зображення

Нижче наведено далеко не вичерпний список факторів, які можуть вплинути на зображення, отримані за допомогою тепловізора (рис. 2.1):

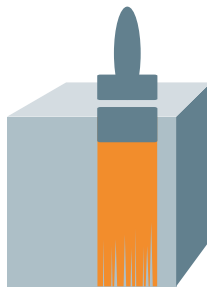
- коефіцієнт випромінення об'єкта;
- відстань від тепловізора до об'єкта;
- розмір об'єкта;
- відносна вологість навколишнього середовища;
- температура навколишнього середовища;
- атмосферна температура;
- температура зовнішньої оптики;
- коефіцієнт пропускання зовнішньої оптики;
- температурний діапазон зображення;
- діапазон довжин хвиль тепловізора;
- кут спостереження;
- оптичні властивості середовища між тепловізором і об'єктом;
- використання фільтрів зображення;

- коефіцієнт відбиття;
- швидкість вітру;
- затінення від прилеглих об'єктів;
- зволоженість об'єкта;
- термічні властивості об'єкта.

Розглянемо їх детальніше.



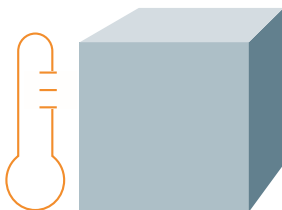
Матеріал і коефіцієнт
випромінення



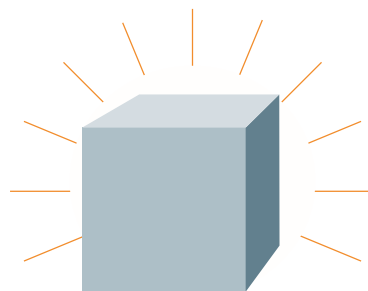
Колір



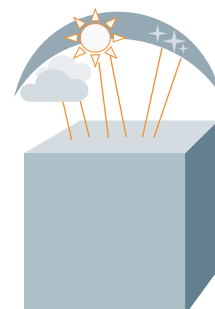
Поверхня



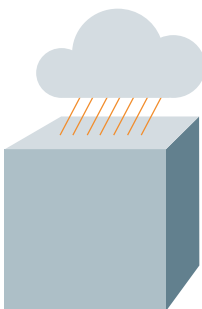
Температура
навколишнього
середовища



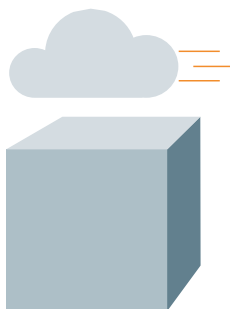
Навколишнє
випромінення



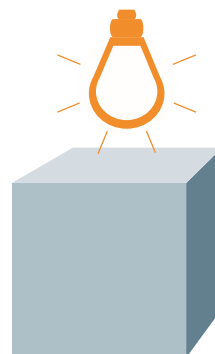
Небо



Погода



Повітря



Світло

Рисунок 2.1 – Фактори, що впливають на теплове зображення

2.2.1. Властивості вимірюваного об'єкта

2.2.1.1. Матеріал і коефіцієнт випромінення

Температура об'єкта не може бути визначена простим вимірюванням випромінюваної ним інфрачервоної енергії без знання коефіцієнта випромінення. Якщо всередину печі поряд помістити матеріали з високим і низьким коефіцієнтами випромінення і нагріти їх до однакової температури, то матеріал з низьким коефіцієнтом випромінення буде виглядати тьмянішим, тобто холоднішим, ніж матеріал з високим коефіцієнтом випромінення. Тепловізор буде «бачити» цю сцену так само, як і людське око, і видавати помилку при визначенні температури.

Коефіцієнт випромінення досліджуваного об'єкта можна визначити одним з двох шляхів:

- за довідковими даними виробника матеріалу поверхні;
- за результатами лабораторного дослідження.

При цьому значення коефіцієнта випромінення матеріалу мають відповідати робочій довжині хвилі тепловізора, бо він може суттєво змінюватись з довжиною хвилі.

Якщо матеріал поверхні досліджуваного об'єкта має невідомий або дуже низький коефіцієнт випромінення, для підвищення точності вимірювання температури можна покрити його фарбою з високою ($\epsilon \approx 1$) і постійною у широкому діапазоні довжин хвиль випромінювальною здатністю.

2.2.1.2. Колір поверхні

Колір поверхні об'єкта неважливий при вимірюванні температури за допомогою тепловізора, бо він не має помітного впливу на довгохвильове інфрачервоне випромінення, що виходить від об'єкта.

Дійсно, темні поверхні поглинають більше короткохвильового інфрачервоного випромінення, ніж світлі та, отже, швидше нагріваються. Проте, випромінювання інфрачервоної енергії залежить від температури об'єкта, а не від кольору його поверхні. Наприклад, нагрівач, який пофарбований в чорний колір, випускає точно таку ж кількість довгохвильового інфрачервоного випромінення,

як і нагрівач, пофарбований у білий колір, якщо він має ту ж саму температуру поверхні.

2.2.1.3. Поверхня

На відміну від кольору, випромінювальна здатність поверхні суттєво змінюється залежно від її структури, покриття або забруднення. Тому ці властивості поверхні вимірюваного об'єкта можуть відігравати вирішальну роль при вимірюванні його температури за допомогою тепловізора.

Гладкі, блискучі, дзеркальні й поліровані поверхні, як правило, мають трохи нижчий коефіцієнт випромінювання, ніж матові, структуровані, шорсткі, витрені й подряпані поверхні з того ж матеріалу.

У випадку дуже гладких поверхонь можливе навіть повне дзеркальне відбиття інфрачервоного випромінювання навколишнього середовища. Тому при їх вимірюванні важливо уникати впливу випромінювання від сонця, обігрівачів та ін.

Вода, сніг і іній мають відносно високий коефіцієнт випромінювання ($0,85 < \varepsilon < 0,96$), тому вимірювання цих речовин, як правило, безпроблемне. І все ж таки, природне покриття подібного роду може спотворити температуру вимірюваного об'єкта. Волога охолоджує поверхню вимірюваного об'єкта, коли випаровується, а сніг має добрі теплоізоляційні властивості. Іній зазвичай не утворює суцільне покриття, тому при вимірюванні необхідно враховувати коефіцієнти випромінювання як самого інею, та і поверхні об'єкта під ним. Тому, за можливості, треба уникати вимірювань мокрих поверхонь або поверхонь, покритих снігом чи інеєм.

Різні забруднення на поверхні вимірюваного об'єкта, такі як пил, сажа або мастило, як правило, збільшують коефіцієнта випромінювання. Отже, вимірювання брудних об'єктів, як правило, є безпроблемним. Проте, слід враховувати, що у цьому випадку тепловізор буде вимірювати температуру бруду, а не точну температуру поверхні об'єкта під ним. Тому треба уникати вимірювання поверхонь, вкритих пухким брудом, бо вони будуть спотворені теплоізоляційною властивістю повітряних бульбашок всередині бруду.

2.2.2. Властивості середовища вимірювання

2.2.2.1. Температура навколишнього середовища

Щоб тепловізор міг правильно обчислити температуру поверхні вимірюваного об'єкта, окрім коефіцієнта випромінення необхідно задати значення компенсації відбитої температури RTC. Для багатьох практичних випадків вимірювання відбита температура приймається рівною температурі навколишнього середовища. Її можна визначити за допомогою термометра для температури повітря.

Чим вище різниця температур між вимірюваним об'єктом і навколишнім середовищем, тим більший вплив має точність налаштування коефіцієнта випромінення на точність вимірювання.

2.2.2.2. Навколишнє випромінення

Кожен об'єкт з температурою вище абсолютного нуля (0 К або $-273,15^{\circ}\text{C}$) випускає інфрачервоне випромінення. Тому навколишні об'єкти з температурою, що перевищує температуру вимірюваного об'єкта, можуть перешкоджати вимірюванню своїм ІЧ випроміненням.

Щоб уникнути цього, необхідно деактивувати такі перешкоди скрізь, де можливо, за допомогою екранування (наприклад, брезентом або картонною коробкою). Але, за можливості, краще уникати вимірювання розташованих поруч дуже гарячих та дуже холодних об'єктів. При вимірюванні холодного об'єкта також слід враховувати можливість відбиття його поверхнею випромінення самого оператора тепловізора.

Зміна положення тепловізора під час вимірювання допомагає виявити відбиття випромінення від інших об'єктів. Відбите випромінення буде зміщуватись по тепловому зображенню, а вимірюваний об'єкт залишиться на місці.

Якщо випромінення від інших об'єктів не вдасться усунути, відбита температура не буде дорівнювати температурі навколишнього середовища. У цьому випадку для визначення відбитого випромінення можна застосувати випромінювач Ламберта.

2.2.2.3. Небо

В результаті потрапляння під сонячне світло об'єкти вимірювання значно нагріваються, і це впливає на температуру їх поверхні інколи протягом декількох наступних годин. Щоб уникнути такого впливу сонця, бажано проводити вимірювання назовні лише рано-вранці або коли небо вкрите щільним шаром хмар.

При вимірюваннях зовні на теплове зображення впливає також і небо. Інфрачервоне випромінення, що виходить від ясного неба, у просторіччі називають «холодним» випроміненням неба. В ясний день «холодне» випромінення неба (від -50 до -60 °C) і «тепле» випромінення сонця (≈ 5500 °C), відбиваються об'єктами вимірювання. У просторовому вимірі вплив неба на сцену в кадрі тепловізора набагато більший, ніж сонця, і ізолювати сцену від нього набагато складніше. Тому при вимірюванні назовні навіть в теплий сонячний день відбита температура, як правило, має значення нижче 0 °C.

Наприклад, на рис. 2.2 [4] можна побачити, що жолоб водостоку відображається на екрані тепловізора холоднішим, ніж стіна будинку, хоча обидва мають майже однакову температуру, близьку до зовнішньої. Такий результат пояснюється впливом випромінення неба.

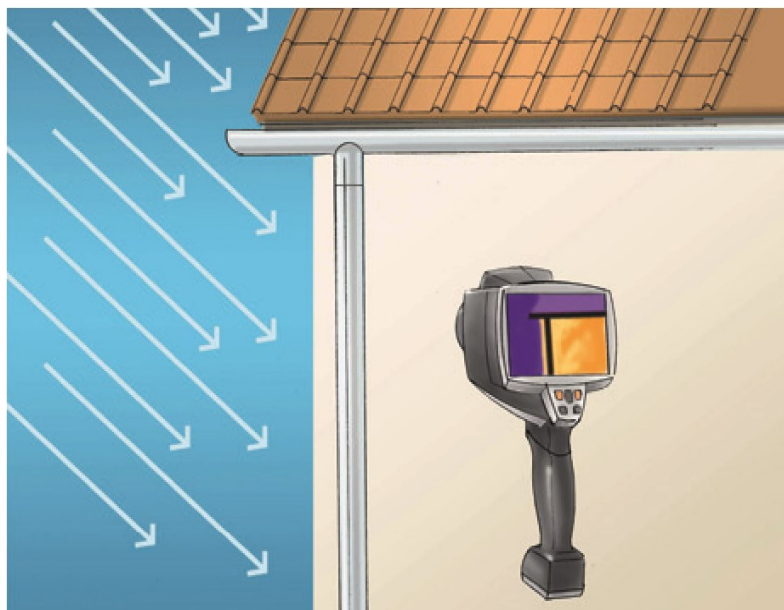


Рисунок 2.2 – Відбиття при вимірюванні на відкритому просторі

Небо на рис. 2.2 ясне, і від усіх об'єктів в кадрі, серед іншого, відбивається його «холодне» випромінення (від -50 до -60 °C). Для урахування цього тепловізор налаштований на середнє значення компенсації відбитої температури $RTC = -55$ °C.

Основним об'єктом вимірювання в цьому прикладі є стіна будинку, і тому тепловізор налаштований на її коефіцієнт випромінення $\varepsilon = 0,95$, щоб забезпечити правильне вимірювання температури. Але поверхня жолоба оцинкована і має дуже низький коефіцієнт випромінення ($\varepsilon = 0,1$). Таким чином, лише мала частка довгохвильового інфрачервоного випромінення жолоба, виходить власне від нього, а усе інше є відбитим навколишнім випроміненням. Тому жолоб з надзвичайно низьким коефіцієнтом випромінення і високим коефіцієнтом відбиття відображається дуже холодним.

За допомогою програмного забезпечення можливо отримати коректне теплове зображення цієї сцени, вказавши при постобробці вірний коефіцієнт випромінення для ділянок зображення жолоба.

Для визначення правильного RTC, слід використовувати випромінювач Ламберта.

2.2.2.4. Погода

Густий шар хмар, що вкриває небо, створює ідеальні умови для вимірювань тепловізором назовні. Він екранує вимірювані об'єкти від «холодного» випромінення неба і випромінення сонця.

Але сильні опади (дощ, сніг) можуть спотворити результат вимірювання. Вода, лід та сніг мають високий коефіцієнт випромінення і є непроникними для інфрачервоного випромінення. Крім того, вимірювання вологих об'єктів може призвести до помилок, через те, що випаровування води охолоджує поверхню вимірюваного об'єкта.

Тому вимірювання назовні бажано проводити в умовах тривалої щільної хмарності, але без опадів.

2.2.2.5. Повітря

Для точного вимірювання тепловізором необхідно, щоб відносна вологість повітря в середовищі вимірювання була досить низькою. За високої вологості відбувається конденсація вологи в повітрі (туман), на вимірюваному об'єкті та на об'єктиві (або захисному склі) тепловізора. Якщо лінза (або захисне скло) «запотіє», частина інфрачервоного випромінення, що потрапляє на тепловізор, не пройде крізь водяну плівку і не потрапить на ІЧ датчик. В умовах щільного туману краплі води в повітрі на шляху ІЧ випромінення від вимірюваного об'єкта також не пропустять його у повному обсязі до тепловізора.

Вітер або протяг у кімнаті можуть вплинути на точність вимірювання температури тепловізором. Зазвичай, завдяки теплообміну (конвекції) повітря біля поверхні об'єкта вимірювання має ту ж саму температуру, що й об'єкт. Вітер або протяг «здувають» цей шар повітря і замінюють на новий, з іншою температурою. В результаті конвекції поверхня теплового об'єкта вимірювання охолоджується, а холодного – нагрівається, допоки не зрівняються температура поверхні та навколишнього повітря. Тепловий ефект цього обміну тим більший, чим більша різниця температур між поверхнею вимірюваного об'єкта і температурою навколишнього середовища.

Деякі завислі в повітрі частинки, такі як пил, сажа і дим, а також деякі пари мають високий коефіцієнт випромінення і дуже низький коефіцієнт пропускання. Через це вони можуть суттєво завадити вимірюванню, оскільки самі випускають інфрачервоне випромінення, яке приймається тепловізором, а також розсіюють і поглинають випромінення від вимірюваного об'єкта, перешкоджаючи йому потрапити до тепловізора.

Тому при тепловізійному обстеженні рекомендується уникати вимірювань в густому тумані або крізь водяні випаровування, за наявності конденсату на тепловізорі.

Там, де це можливо, слід уникати вимірювань при сильному вітрі або за наявності інших повітряних потоків. Якщо це неможливо, необхідно визначити

та занотувати швидкість і напрямок повітряних потоків під час вимірювання для урахування цих даних при подальшому аналізі теплових зображень.

Необхідно уникати вимірювань в умовах сильно забрудненого повітря (наприклад, в щойно піднятій куряві). Але і в інших випадках, щоб звести до мінімуму вплив будь-яких можливих часток у повітрі, рекомендується проводити вимірювання на найменшій можливій відстані.

2.2.2.6. Світло

Ані промені світла, ані загальне освітлення не відіграють істотної ролі при вимірюванні за допомогою тепловізора. Він сприймає лише довгохвильове інфрачервоне випромінення, і тому вимірювання температури можна проводити навіть у суцільній темряві. Однак деякі джерела світла випускають й інфрачервоне випромінення і можуть таким чином впливати на температуру вимірюваного об'єкта і його оточення.

Тому слід уникати вимірювання температури при наявності прямого сонячного випромінення або, наприклад, поблизу гарячої лампи розжарювання. Присутність енергоефективних джерел світла, таких як світлодіодні, люмінесцентні або неонові лампи, не є критичним, оскільки вони перетворюють більшу частину використаної електричної енергії у видиме світло, а не в інфрачервоне випромінення.

2.3. Практичні методи визначення коефіцієнта випромінення і компенсації відбитої температури RTC

Щоб визначити коефіцієнт випромінення ϵ поверхні вимірюваного об'єкта, на практиці можна скористатись одним з наведених нижче способів.

- Обрати значення коефіцієнта випромінення за табличними даними для даного матеріалу поверхні (Додаток А). Однак слід враховувати, що дані в таблиці є орієнтовними, і коефіцієнт випромінення конкретного вимірюваного об'єкта може значно відрізнятися від них.
- Визначити коефіцієнт випромінення шляхом порівняльного вимірювання за допомогою контактного термометра.

- Визначити коефіцієнт випромінення шляхом порівняльного вимірювання за допомогою тепловізора.

2.3.1. Визначення коефіцієнта випромінення шляхом порівняльного вимірювання

2.3.1.1. За допомогою контактного термометра

Спочатку за допомогою контактного термометра вимірюється температура поверхні об'єкта. Потім температура поверхні об'єкта вимірюється за допомогою тепловізора з налаштованим коефіцієнтом випромінення $\varepsilon = 1$. Різниця між значеннями температури, виміряними контактним термометром і тепловізором, є результатом завищеного значення ε . Далі значення коефіцієнта випромінення в тепловізорі поступово знижується, доки не буде отримане значення температури вимірюваного об'єкта, що збігається зі значенням, отриманим за допомогою контактного термометра. Встановлене в тепловізорі значення ε буде відповідати коефіцієнту випромінення поверхні вимірюваного об'єкта.

2.3.1.2. За допомогою тепловізора

Спочатку на вимірюваний об'єкт наноситься покриття з відомим високим коефіцієнтом випромінення. Для цього зручно використовувати емісійну стрічку – спеціальну липку стрічку з матеріалу зі стабільним коефіцієнтом випромінення, наприклад $\varepsilon = 0,95$.

Зачекавши деякий час, поки стрічка набуде температури поверхні, можна виміряти температуру вимірюваного об'єкта в закlesній області за допомогою тепловізора із налаштованим коефіцієнтом випромінення емісійної стрічки. Це – еталонне значення температури. Далі слід відкоригувати налаштування коефіцієнта випромінення в тепловізорі так, щоб температура поверхні об'єкта, вимірювана поза стрічкою, збігалася з еталонною. Встановлене в тепловізорі значення ε буде відповідати коефіцієнту випромінення поверхні вимірюваного об'єкта.

За відсутності спеціальної емісійної стрічки можна нанести на вимірюваний об'єкт фарбу з відомим коефіцієнтом випромінення або покрити його товстим шаром ($> 0,13$ мм) термостійкого мастила ($\varepsilon \approx 0,82$) чи сажі ($\varepsilon \approx 0,95$). Також

можна скористатись звичайним листом паперу чи шматком тканини, бо більшість матеріалів органічного походження мають коефіцієнт випромінення, близький до 0,95. Проте, в усіх випадках необхідно дочекатись, поки нанесене покриття набуде температури вимірюваного об'єкта.

2.3.2. Визначення компенсації відбитої температури RTC

2.3.2.1. Визначення RTC за допомогою повітряного термометра

Якщо при вимірюванні тепловізором вдасться усунути всі можливі зовнішні впливи, температура інфрачервоного випромінення, відбитого від вимірюваного об'єкта, дорівнює температурі навколишнього середовища. Вона може бути виміряна за допомогою повітряного термометра і введена в тепловізор як значення компенсації відбитої температури RTC.

2.3.2.2. Визначення RTC за допомогою випромінювача Ламберта

Якщо в середовищі вимірювання залишаються сторонні джерела інфрачервоного випромінення, для забезпечення точного результату вимірювання тепловізором необхідно визначити температуру відбитого випромінення іншим шляхом. Це можна зробити за допомогою випромінювача Ламберта і тепловізора.

Випромінювач Ламберта (або ламбертівський випромінювач) – це об'єкт з ідеальною дифузною (розсіючою) поверхнею, який рівномірно у всіх напрямках відбиває випромінення, що падає на нього. Імпровізованим випромінювачем Ламберта може слугувати шматок алюмінієвої фольги, яка була зім'ята і знов розправлена. Фольга має високу відбивну здатність, а завдяки зім'ятій структурі її дифузне відбиття близьке до рівномірного.

Щоб визначити температуру відбитого випромінення, імпровізований випромінювач Ламберта розміщується поблизу вимірюваного об'єкта або, краще, безпосередньо на його поверхні. У тепловізорі налаштовується коефіцієнт випромінення $\varepsilon = 1$ і вимірюється температура випромінювача. Отримане значення може бути введено як компенсація відбитої температури RTC для подальшого вимірювання температури об'єкта. (Важливо не забути повернути в налаштуваннях тепловізора значення коефіцієнта випромінення для поверхні об'єкта).

2.4. Складнощі при вимірюванні тепловізором

2.4.1. Джерела помилок при вимірюванні температури тепловізором

Указані нижче фактори можуть спотворити результат вимірювання температури тепловізором:

- неправильне налаштування коефіцієнта випромінення ϵ для поверхні вимірюваного об'єкта;
- неправильне налаштування компенсації відбитої температури RTS ;
- несфокусоване теплове зображення;
- занадто велика або занадто мала відстань вимірювання;
- невідповідний об'єктив тепловізора;
- занадто велика пляма вимірювання i , відповідно, найменший вимірюваний об'єкт;
- перешкоди на шляху проходження випромінення (забруднення повітря, покриття та т.ін.);
- вплив зовнішніх джерел випромінення (сонце, лампи освітлення, нагрівачі та т.ін.);
- швидка зміна температури навколишнього середовища;
- неправильна інтерпретація теплового зображення через відбиття;
- неправильна інтерпретація теплового зображення через відсутність знань про конструкцію вимірюваного об'єкта.

Розглянемо детальніше їх вплив на вимірювання та шляхи його уникнення.

2.4.1.1. Вимірювання на склі

Хоча людське око бачить крізь скло, скло не пропускає інфрачервоне випромінення. Тому тепловізор може виміряти температуру лише поверхні скла, а не матеріалів за ним (рис. 2.3 [4]). Разом з тим, скло є проникним для короткохвильового випромінення, тому сонячне світло, що сяє крізь вікно, може нагріти вимірюваний об'єкт. Також скло є матеріалом з високим коефіцієнтом відбиття. Тому при вимірюванні на склі треба враховувати присутність віддзеркалення навколишніх об'єктів.

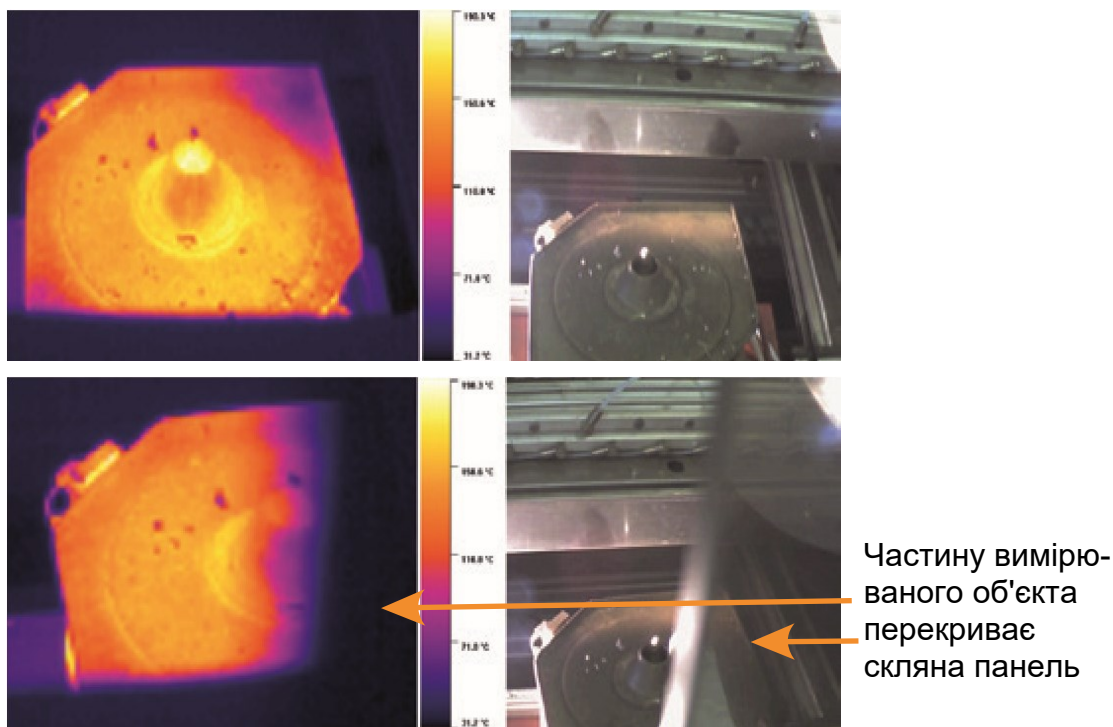


Рисунок 2.3 – Вимірювання на склі

2.4.1.2. Вимірювання на металі

Метали, особливо з блискучою поверхнею, добре відбивають довгохвильове інфрачервоне випромінення. Їх коефіцієнт випромінення дуже низький, і при достатньо високій температурі може змінюватись залежно від її значення. Це дуже ускладнює вимірювання температури металів тепловізором.

Крім правильного налаштування коефіцієнта випромінення, в цьому випадку особливо важливими є правильне налаштування компенсації відбитої температури, а також дотримання рекомендацій щодо уникнення відбиття випромінення від оточення. Якщо поверхня металу пофарбована, то вимірювання її температури тепловізором не складає проблем, оскільки фарба, зазвичай, має високий коефіцієнт випромінення. Однак, і в цьому випадку необхідно враховувати можливість відбиття навколишнього випромінення від гладкої поверхні.

2.4.1.3. Дзеркальне відбиття

Чітко видиме віддзеркалення часто є показником високої відбивної здатності поверхні, тобто низького коефіцієнта випромінення. Однак слід враховувати, що дзеркальність поверхні у видимому для людського ока діапазоні не обов'язково означає високий коефіцієнт відбиття і в інфрачервоному діапазоні.

Дзеркальне відбиття навколишнього випромінення (включаючи силует людини, що тримає тепловізор) можна часто побачити на тепловому зображенні пофарбованої поверхні. Це трапляється попри те, що фарба зазвичай має високий коефіцієнт випромінення ($\epsilon \approx 0,95$). Разом з тим, на тепловому зображенні стіни з піщаника, який має менший, ніж у фарби, коефіцієнт випромінення ($\epsilon \approx 0,67$), будь-які контури об'єктів з оточення побачити неможливо. Поясненням цього є те, що дзеркальне відбиття навколишнього випромінення обумовлене не стільки коефіцієнтом випромінення поверхні, скільки її структурою.

На рис. 2.4 [4] наведено приклад теплового зображення алюмінієвої фольги, ліва половина якої є гладкою, а права – зім'ятою. Будь-яке випромінення завжди відбивається під тим самим кутом, під яким воно потрапляє на поверхню. Це видно на збільшеному поперечному перерізі гладкої половини алюмінієвої фольги (ліва сторона). На цій половині фольги інфрачервоне випромінення людини, що здійснює вимірювання, відбивається під тим кутом, під яким воно потрапило на її поверхню. На тепловому зображенні чітко видно контур людини та фон позаду неї. Це – дзеркальне відбиття.

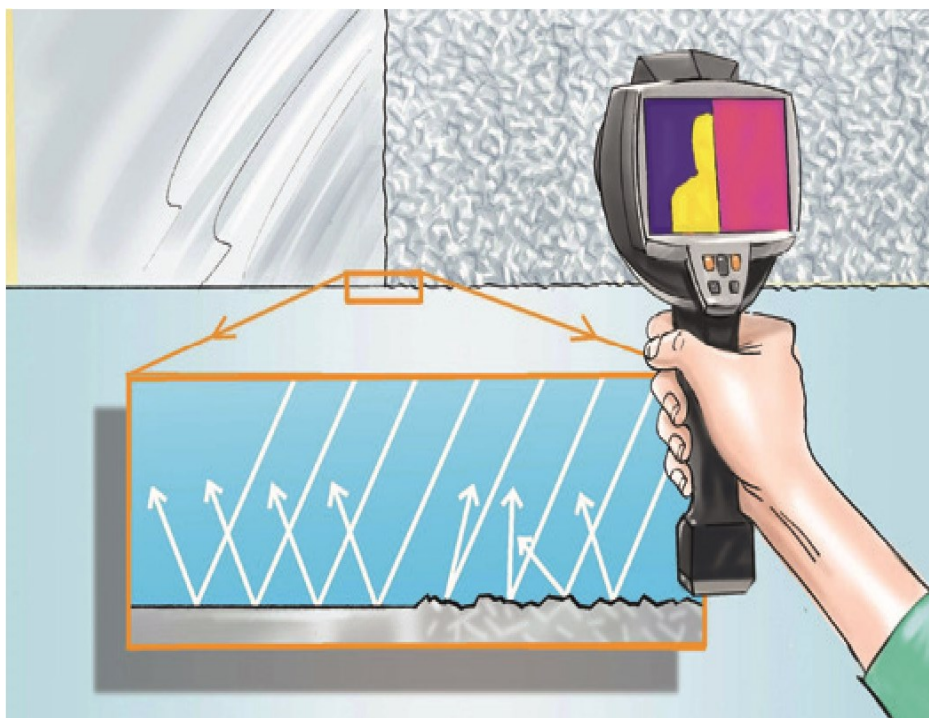


Рисунок 2.4 – Дзеркальне і дифузне відбиття випромінення

Разом з тим, на зім'ятій половині фольги (права сторона) те ж саме правило «кут відбиття дорівнює куту падіння» призводить до іншого результату. Тут інфрачервоні промені падають не на пласку поверхню, а на різні ділянки поверхні з різними кутами нахилу. Тому вони відбиваються в різних напрямках, і на тепловому зображенні жодних обрисів джерел відбитого випромінення не видно. Віддзеркалення на зім'ятій половині алюмінієвої фольги є сумішшю інфрачервоного випромінення людини з тепловізором і фону позаду неї. Це – дифузне відбиття, як у випромінювача Ламберта.

Таким чином, навіть поверхні, на яких не спостерігається дзеркальне відбиття випромінення, можуть мати високий коефіцієнт відбиття. Тому при вимірюванні тепловізором завжди слід враховувати можливий вплив свого власного інфрачервоного випромінення.

При обстеженні гладких поверхонь слід змінювати кути та напрямки вимірювання, щоб визначити, які неоднорідності розподілу температури на тепловому зображенні обумовлені характеристиками вимірюваного об'єкта, а які – відбиттям від його поверхні.

2.4.1.4. Нестационарний нагрів від сонця

Сталий у часі теплообмін розглядається як «стаціонарний». На противагу цьому, тимчасовий нагрів від сонця вважається «нестационарним», або «перехідним».

Нестационарний нагрів являє собою більшу проблему для тепловізійного обстеження назовні, хоча різкі перепади температури між сторонами будівлі можуть вплинути й на результати термографії всередині неї. Наприклад, південно орієнтовані стіни можуть нагрітись сонцем протягом дня і внаслідок цього виглядати на термограмі, як погано ізольовані. Нестационарний нагрів також може зберігатись і після того, як джерело нагріву було усунене. Зовнішні стіни можуть залишитись теплішими ще більш ніж через годину після заходу сонця. Більш того, ефект від нестационарного нагріву може бути ще складнішим, якщо поблизу присутні навколишні об'єкти, тіні від яких переміщаються по будівлі у міру того, як сонце рухається по небу.

Тому тепловізійне обстеження зовні рекомендується проводити вранці, незадовго до сходу сонця, коли вплив нестаціонарного нагріву від сонця зведений до мінімуму.

2.4.1.5. Несприятливі погодні умови

При тепловізійному обстеженні рекомендується уникати дощу, снігу, туману або сильного вітру. Як обговорювалося раніше, опади змочують зовнішню поверхню будівлі, що призводить до її випарного охолодження. Вітер також знижує загальну температуру поверхні шляхом конвективного перенесення тепла, який значною мірою залежить від швидкості вітру. Достатньо сильний вітер може суттєво зменшити контраст між сусідніми ділянками поверхні та унеможливити виявлення аномалій на ній.

2.4.1.6. Навколишні об'єкти

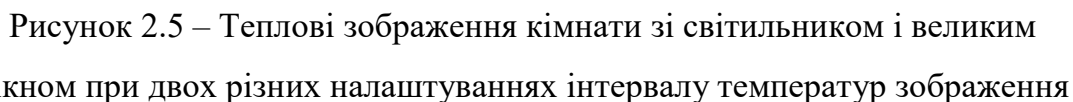
Будівлі, як правило, оточені безліччю різних об'єктів: сусідніми спорудами, рослинністю, припаркованими автомобілями, хмарами на небі та клубами пари чи диму на землі. Усі вони випромінюють самі й поглинають інші випромінювання, що призводить до теплообміну з вимірюваним об'єктом. Такий теплообмін складним чином залежить від відстані між об'єктами та кутами, під якими вони повернені один до одного, і може бути дуже суттєвим за величиною. Взаємодія будівлі з нічним небом, внаслідок якої радіаційні втрати тепла ясної ночі більші, ніж хмарної, також може бути віднесена до цього типу теплообміну.

Якщо не враховувати існування такого теплообміну, то поверхні, які закриті від нічного неба або суміжні з іншими нагрітими об'єктами, можуть бути помилково інтерпретовані як погано теплоізовані через те, що мають більшу температуру.

2.4.1.7. Налаштування зображення

Інфрачервоне випромінювання, що потрапляє на датчик тепловізора, формує цифрове зображення на його екрані. Рівні інтенсивності випромінювання можуть передаватися як відтінки сірого або у псевдокольоровій гамі. Найбільш поширеною є кольорова палітра, в якій відтінки червоного представляють високі рівні інф-

Для коректної візуалізації показань тепловізора дуже важливим параметром є «інтервал температур» колірної палітри (схеми) зображення: різниця в кольорі між найбільшими й найменшими значеннями температури на зображенні. Рис. 2.5 [3] відображає ту ж саму сцену з використанням двох різних інтервалів температур. Перше зображення (див. рис. 2.5,*а*) використовує широкий інтервал температур від 18 до 35 °С, який охоплює весь діапазон температур у приміщенні. А на іншому зображенні (див. рис. 2.5,*б*) обрано вужчий інтервал температур від 19 до 28 °С. Як видно, температура світильника в нижньому лівому куті на рис. 2.5,*б* знаходиться за межами звуженого діапазону, і весь він спрощено передається білим кольором. Проте, на цьому зображенні набагато легше розпізнати тонкі зміни температури стелі над вікном, які і є основним об'єктом дослідження.



46

З іншого боку, розширення інтервалу температур також може дозволити виявити деталі. На рис. 2.6 [4] показано, як примусово збільшений інтервал температур (від -24 до $3\text{ }^{\circ}\text{C}$) дозволяє побачити на обробленому тепловому зображенні будинку (див. рис. 2.6,б) електричний кабель (над дахом будинку), який не було видно на первісному зображенні (див. рис. 2.6,а) з автоматично обраним інтервалом (від -11 до $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$).

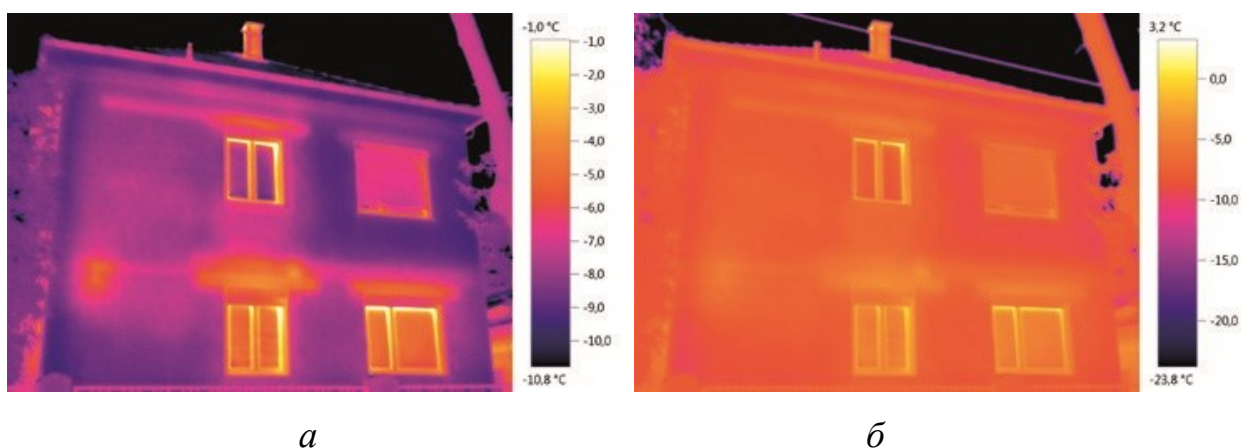


Рисунок 2.6 – Теплові зображення будинку та електричного кабелю при двох різних налаштуваннях інтервалу температур зображення

За необхідності інтервал температур зображення може бути налаштовано і пізніше, при обробленні зображення в спеціальному програмному забезпеченні тепловізора на комп'ютері.

2.4.1.8. Кут зйомки

Інфрачервоне випромінювання матеріалу буває дифузним і дзеркальним. Дифузне випромінювання випускається рівномірно у всіх напрямках і може вимірюватись під будь-яким кутом, а рівень дзеркального випромінювання матеріалу суттєво залежить від кута, під яким він спостерігається. Отже, для точного вимірювання будь-якого матеріалу тепловізор має бути розташований перпендикулярно до його поверхні або максимально наближено до прямого кута.

2.4.2. Оптимальні умови та порядок тепловізійного обстеження

Підсумовуючи усі розглянуті фактори впливу, можна описати такі умови для проведення достовірного тепловізійного обстеження.

Найголовнішою умовою є стабільність (незмінність) навколишнього середовища під час вимірювання. Лише це дозволяє оцінити усі можливі фактори впливу і провести порівняльний аналіз результатів тепловізійного обстеження.

При обстеженні необхідно виконати такі кроки:

- визначити та встановити в тепловізорі правильний коефіцієнт випромінювання для поверхні вимірюваного об'єкта;
- визначити та встановити в тепловізорі правильне значення компенсації відбитої температури RTC;
- досягти сфокусованого теплового зображення в момент зйомки, оскільки його різкість не може бути покращена після;
- обрати найменшу відстань вимірювання, але не порушуючи мінімальну відстань фокусування тепловізора;
- зробити вірний вибір між телефото та ширококутним об'єктивом тепловізора;
- кадрувати зображення так, щоб достатньою мірою охопити вимірюваний об'єкт;
- забезпечити, щоб пляма вимірювання тепловізора не перевищувала розміри вимірюваного об'єкта;
- уникнути перешкод на шляху до вимірюваного об'єкта;
- усунути або екранувати зовнішній вплив при отриманні теплового зображення об'єкта;
- уникнути виникнення конденсату на об'єктиві тепловізора при переході від холодного до теплого середовища вимірювання;
- використати за можливості тепловізор з термостабілізованим ІЧ датчиком;
- використати штатив для точного вимірювання деталей;
- перевірити декілька кутів зйомки для виявлення відбиття випромінювання від зовнішніх джерел;
- знати та враховувати тип і конструкцію вимірюваного об'єкта;
- провести фотозйомку вимірюваного об'єкта одночасно з тепловою.

При тепловізійному обстеженні зовні необхідно обирати умови, близькі до оптимальних:

- стала погода;
- хмарне небо до і під час вимірювання;
- відсутність опадів чи туману;
- відсутність вітру або протягів;
- не потрапляння прямого сонячного випромінення на об'єкт до і під час вимірювання (найкращий час обстеження – до сходу сонця);
- сухість та чистота поверхні вимірюваного об'єкта;
- наявність на поверхні вимірюваного об'єкта ділянок з високим коефіцієнтом випромінення.

Тепловізійне обстеження будівель зовні слід проводити при різниці температур між їх внутрішньою та зовнішньою частинами не меншій, ніж 10 °С. Це збільшить інтенсивність втрат тепла і дозволить виявити проблемні зони будівель. Закриті вікна і двері в будівлі допоможуть відрізнити звичайні конвективні потоки повітря від небажаних витоків.

При всіх видах обстеження корпус тепловізора має бути такої ж температури, як і навколишнє повітря. Зазвичай для цього після зміни місця зйомки необхідно витримати паузу не менше 30 хв (час стабілізації температури).

Деякі параметри теплового зображення можуть бути відкориговані й після обстеження за допомогою спеціального програмного забезпечення тепловізора для персонального комп'ютера:

- коефіцієнт випромінення поверхні;
- компенсація відбитої температури (RTC);
- колірна палітра зображення;
- інтервал температур зображення.

Для того щоб після проведення вимірювань можна було здійснити детальний аналіз результатів тепловізійного обстеження, під час кожної зйомки необхідно фіксувати такі параметри:

- внутрішня і зовнішня температури повітря;

- внутрішня і зовнішня відбита температура;
- внутрішня і зовнішня вологість;
- швидкість вітру назовні;
- відстань від тепловізора до об'єкта;
- кут огляду до поверхні об'єкта;
- коефіцієнт випромінення матеріалу об'єкта.

2.5. Обстеження виробничого обладнання

2.5.1. Обстеження електричних установок

Об'єктами вимірювання при термографічному обстеженні електричного обладнання, зазвичай, є роз'єми, з'єднувачі, вимикачі, реле, ізолятори, конденсатори та двигуни. Несправності в електричних установках часто проявляються у вигляді гарячих точок, які можуть бути виявлені за допомогою тепловізора. Такі гарячі точки часто є результатом підвищеного опору в колі, перевантаження або пошкодження ізоляції. На рис. 2.7 [2] показано приклад гарячих точок на тепловому зображенні електричної установки розподільчої системи.

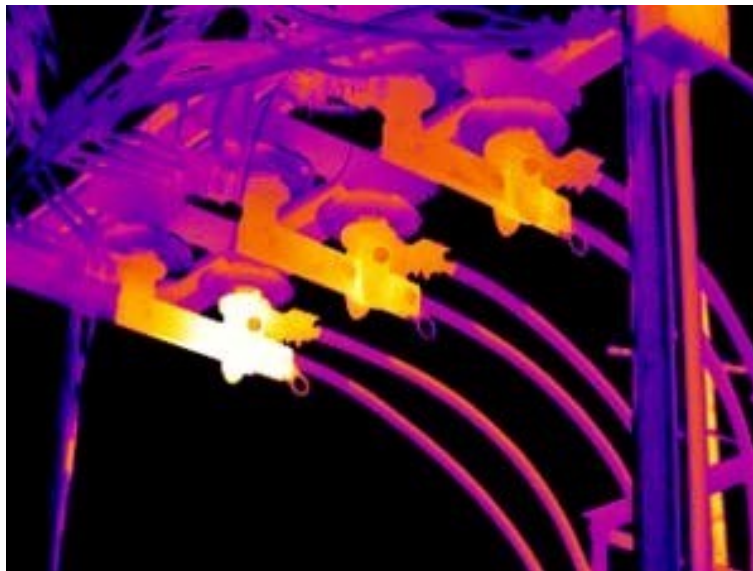


Рисунок 2.7 – Гарячі точки при обстеженні системи електропостачання

При обстеженні з'єднувачів, роз'ємів, вимикачів і реле зручним методом виявлення дефектів є порівняння кількох аналогічних з'єднань під навантаженням. Погане з'єднання матиме вищу температуру через більший контактний

опір, що виник через ослаблення з'єднання, окиснення або корозію контактів. На рис. 2.8 [2] показано запобіжники в шафі управління електричного двигуна. Дефект роз'єму у верхній частині правого запобіжника створив гарячу точку, яку можна легко побачити за допомогою тепловізора.

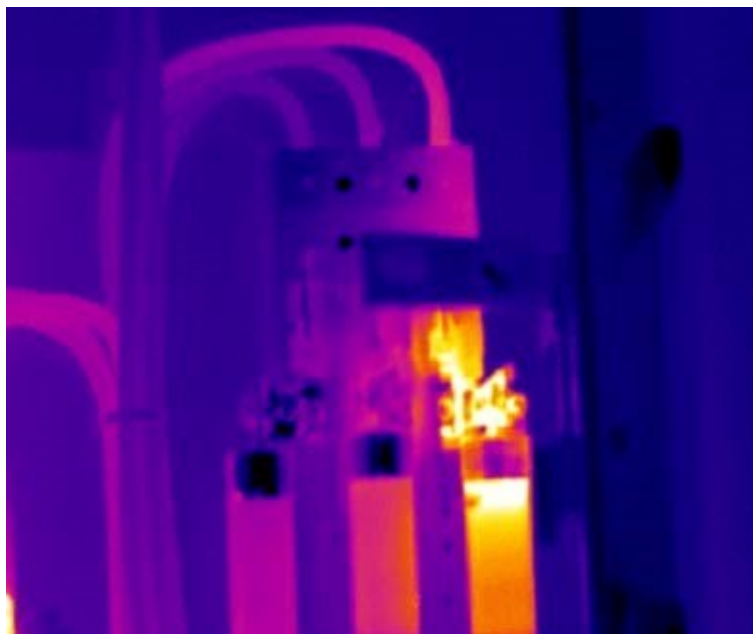


Рисунок 2.8 – Гаряча точка на контакті запобіжника

При обстеженні трифазних двигунів слід звертати увагу на баланс фаз і відповідність робочій температурі двигуна. На рис. 2.9 наведено термограму двигуна під час роботи, на ній чітко видно температуру корпусу в місці розміщення обмоток статора, а також гарячі точки в їх окремих ділянках.

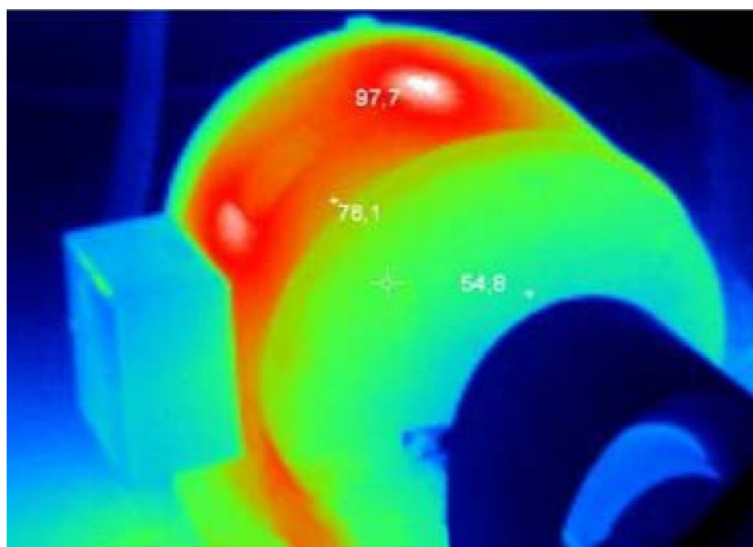


Рисунок 2.9 – Термограма двигуна під навантаженням

Нерівномірний нагрів або перегрів значно зменшують термін служби та енергетичну ефективність електричного двигуна. Як показує практика, кожним 10 °С перевищення максимально допустимої температури двигуна відповідає скорочення терміну його служби приблизно на 50 % через пошкодження ізоляції обмоток.

2.5.2. Обстеження механічного обладнання

Об'єктами вимірювання при термографічному обстеженні механічного обладнання, зазвичай, є обертові механізми: підшипники, шестерні, приводні ремені, сполучні муфти, вали, насоси та компресори.

На рис. 2.10 [2] наведено приклад термограми підшипників при обстеженні насоса. Гаряча точка на поверхні корпусу правого підшипника може бути результатом внутрішніх пошкоджень. Надмірне тепло може виділятися від тертя через зношення, неспіввісність або недостатнє змащення підшипника.

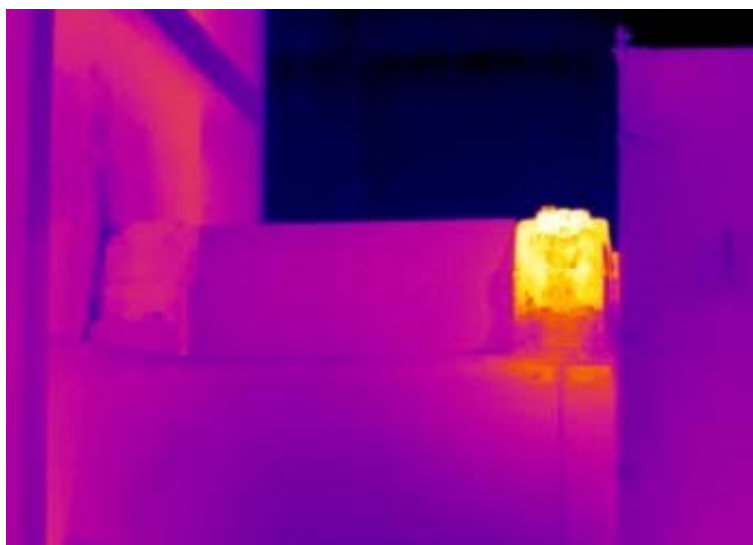


Рисунок 2.10 – Гаряча точка на корпусі підшипника

Як і у випадку електричних установок, обстеження механічного обладнання слід проводити під час його експлуатації. Інтерпретація результатів обстеження має здійснюватися на підставі порівняння обладнання, що працює в аналогічних умовах при однакових навантаженнях, або шляхом аналізу тенденцій зміни у часі величини та розподілу температури.

2.5.3. Обстеження вогнетривких структур

Об'єктами вимірювання при термографічному обстеженні вогнетривких структур зазвичай є електродугові печі, металургійні ковші, печі для термообробки, склоплавильні печі, обертові печі та сушильні машини. Теплові візерунки на зовнішніх поверхнях вогнетривких структур цих технологічних установок дозволяють виявити гарячі точки, викликані зношенням та ерозією вогнетривів. Такі дефекти можуть бути легко усунені під час технічного обслуговування, і термін служби вогнетривких структур може бути продовжений понад нормативний.

На рис. 2.11 [2] показано приклад аномального розподілу температури на стінці печі для випалювання цементу, обумовленого ерозією вогнетривкого цегляного облицювання.

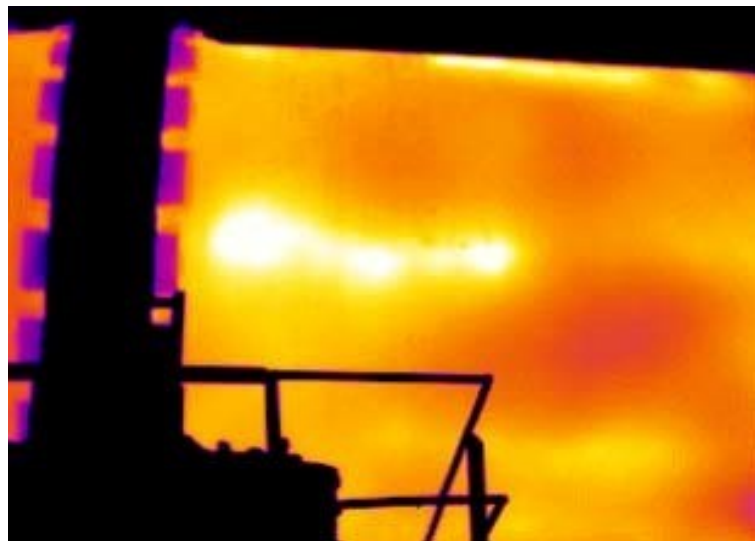


Рисунок 2.11 – Гарячі точки на термограмі футеровки обпалювальної печі

Більше прикладів з практики обстеження виробничого обладнання наведено в Додатку Б.

2.8. Обстеження будівель

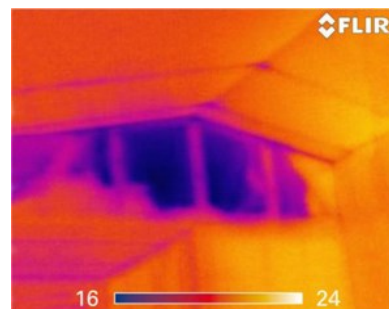
З розвитком сучасних технологій термографії портативні тепловізори стали потужним інструментом для обстеження будівель. На рис. 2.12 наведено типові об'єкти вимірювання температури за допомогою тепловізора.



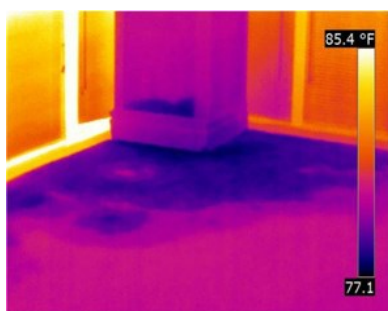
Загальні втрати тепла



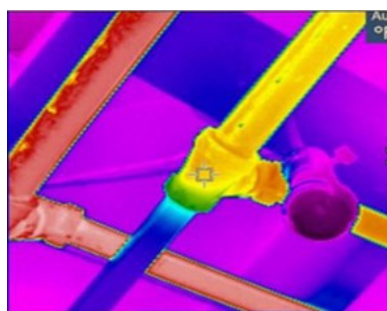
Відсутня ізоляція



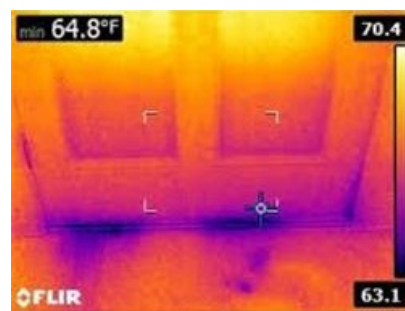
Проникнення вологи



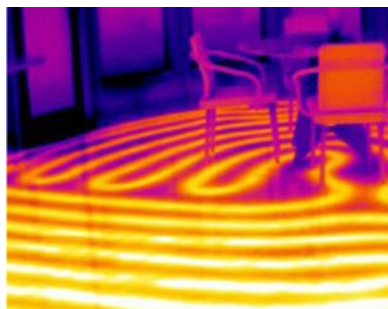
Витоки води



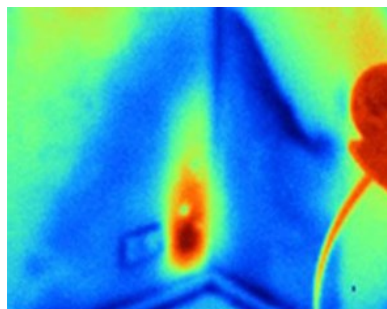
Засмічення
водопровідних труб



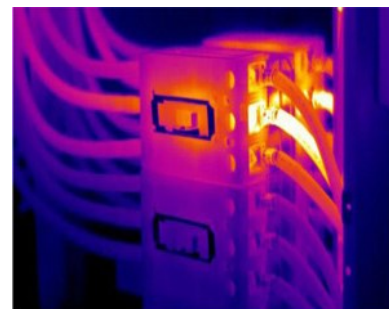
Повернення холодного
повітря



Системи опалення і
кондиціонування



Отвори у стінах



Проблеми в електричних
колах

Рисунок 2.12 – Об'єкти тепловізійного контролю
під час обстеження будівель

Як інструмент неруйнівного контролю, тепловізори широко використовуються для виявлення різних помилок будівництва, конструктивних вад, старіння

будівельних матеріалів та інших джерел втрат тепла, які можна запобігти. У багатьох випадках виявлення проблем на тепловому зображенні потребує менше часу, ніж при використанні традиційних методів обстеження. При цьому додатковою перевагою є можливість візуального документування процесу обстеження, яке може бути включене до звіту.

2.8.1. Теплова динаміка будівель

При оцінці теплообміну всередині будівлі головна увага приділяється трьома основним явищам: потокам тепла при кондуктивному теплообміні (через теплопровідність), конвективним потокам повітря і проникненню води.

2.8.1.1. Кондуктивний теплообмін

Кондукція (теплопровідність) є одним з трьох основних шляхів, якими передається тепло. Кондукція відбувається крізь тверді компоненти будівлі, наприклад, коли тепло переходить від теплої внутрішньої сторони стіни до її холоднішої зовнішньої сторони. Величина коефіцієнта теплопровідності матеріалу або величина його теплового опору R визначають інтенсивність кондукції тепла. Більш теплопровідні об'єкти з низькими значеннями R (наприклад, металеві труби, металеві віконні рами або металеві стійки) створюють шляхи, через які може передаватися велика кількість тепла.

Для зменшення передачі тепла крізь зовнішні огороження будівель використовуються ізоляційні матеріали з низькою теплопровідністю. Їх ізоляційна здатність оцінюється величиною теплового опору R або зворотною величиною коефіцієнта проникнення тепла U матеріалу. Правильно розташована ізоляція здатна розірвати шляхи кондуктивної передачі тепла і зменшити теплопровідність зовнішніх огорожень будівель. Проте відсутні, погано спроектовані, неправильно змонтовані або пошкоджені шари ізоляції є поширеною проблемою в будівництві.

Потік теплової енергії завжди шукає шляхи з найменшим тепловим опором. Концентрація потоків тепла на цих шляхах призводить до виникнення зон з температурами, що суттєво відрізняються від оточення. Ці зони називаються «тепловими мостами» або, залежно від температури – «холодними мостами»

(іноді «містками холоду») та «гарячими мостами». «Теплові мости» поділяються на геометричні та структурні і можуть відповідати або не відповідати зонам втрати тепла.

Геометричні теплові мости обумовлені планом будівлі. Вони виникають на стиках дахів, підлог і стін. Кондуктивний потік тепла від плоскої ділянки теплої внутрішньої поверхні стіни передається до такої ж за площею плоскої ділянки холоднішої зовнішньої поверхні стіни (рис. 2.13 [3]). Проте, у випадку кута, площа прилеглих ділянок зовнішньої поверхні стіни набагато перевищує площу внутрішнього кута, що призводить до передачі назовні більших обсягів тепла. І хоча при проектуванні будівлі можна мінімізувати кількість кутів і стиків, в багатьох випадках геометричні теплові мости неминучі.

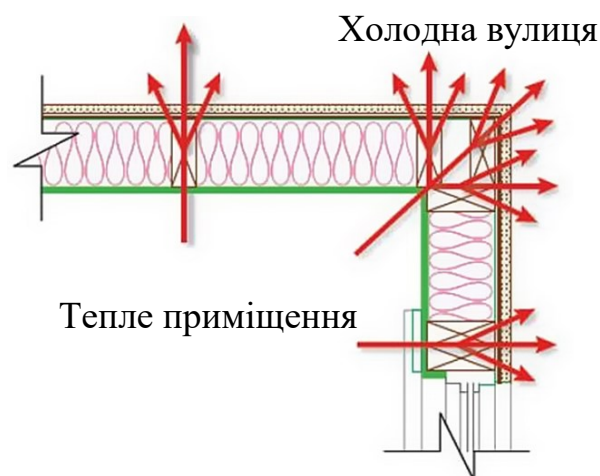


Рисунок 2.13 – Кути забезпечують більшу площу поверхні теплообміну у порівнянні з плоскими ділянками стіни

Структурні теплові мости обумовлені конфігурацією і розміщенням будівельних матеріалів. Цей тип теплових мостів охоплює проміжки між шарами ізоляції, витоки вологи всередині повітряних порожнин, погано ізольовані бетонні плити або анкерні болти, які використовуються для кріплення ізоляції до стін. Залежно від основної причини, структурні теплові мости часто можуть бути послаблені або зовсім усунені.

Хоча геометричні та структурні теплові мости слід відрізняти один від одного, їх наслідки можуть взаємодоповнюватись. Так, наприклад, відсутність теплової ізоляції призводить до посилення втрат тепла, спричинених геометричним тепловим мостом на стику стін.

2.8.1.2. Конвективний потік повітря

Рух повітря крізь зовнішні огороження будівлі та всередині самої будівлі є ще одним суттєвим джерелом втрат енергії (рис. 2.14 [3]). Загальновідомо, що тепле повітря піднімається вгору, до верхніх рівнів будинку, залишаючи перший поверх і підвал холоднішими. Це відбувається через конвекцію. Деякі типи конвективних потоків повітря є бажаними й активно створюються мешканцями будинку: починаючи від кухонних витяжних вентиляторів і закінчуючи вікнами, відкритими в спекотний день. Однак у багатьох інших випадках ці потоки повітря є небажаними й можуть бути причиною значних втрат тепла.

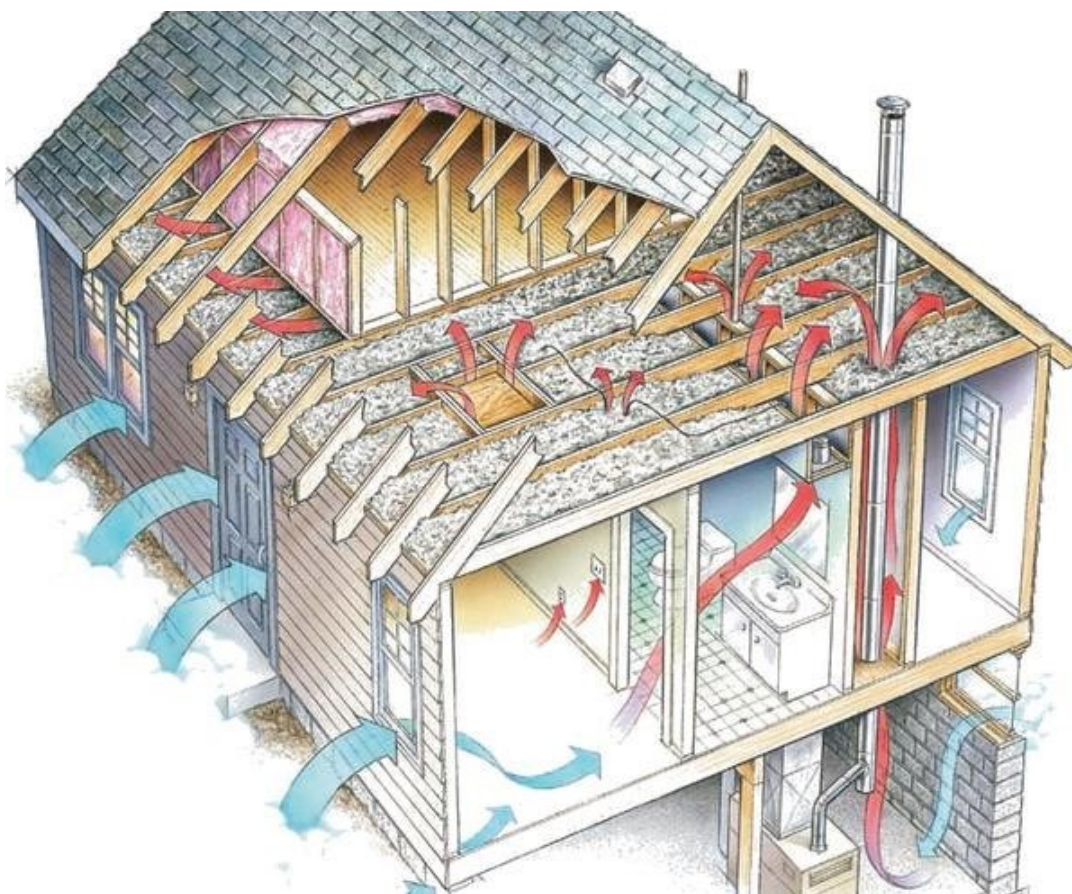


Рисунок 2.14 – Рух повітря в будівлі

Витоки повітря є поширеним явищем в різних отворах і проходах, створених для електропроводки, водопроводу, повітропроводів, вентиляційних каналів, димоходів і вбудованих світильників. Примикання до цоколю будівлі, де фундамент з'єднується з конструкціями стін, також є типовою проблемною зоною.

Особливо проблематичними є витоки повітря всередину горища. Коли цінне нагріте повітря піднімається догори будинку, воно не лише залишає приміщення, а й створює розрідження, яке втягує всередину холодне повітря крізь вікна, двері та різні отвори. До того ж, потоки повітря, що проходять крізь порожнини в підлозі чи стінах будівлі, знецінюють ефективність використаних в них ізоляційних матеріалів.

2.8.1.3. Проникнення води

Запобігання проникнення вологи є однією з основних функцій зовнішніх огорожень будівлі. Небажана волога може проникати в будівлю у вигляді протікання дощової води, дифузії пари, протікання водопровідних труб, проникнення ґрунтових вод, залишкової вологи з будівельних матеріалів або вологих повітряних потоків. Хоча вологе повітря саме по собі може бути проблемою, більшість його шкідливих наслідків виникає, коли воно охолоджується нижче «точки роси» – температури, при якій водяна пара конденсується в рідку форму.

С точки зору теплової динаміки будівлі, волога може мати охолоджуючий або підігрівуючий ефект. Зниження температури поверхні відбувається через випарне охолодження. Випаровування – це фазовий перехід речовини з рідкої форми у газоподібну. Таке перетворення потребує енергії, тому в міру випаровування вода поглинає тепло з навколишнього середовища. Як результат – знижується температура і самої рідини, і поверхні, з якою вона контактує. З іншого боку, внаслідок своєї високої теплоємності вода здатна утримувати тепло і, протікаючи з одних частин будівлі до інших, нагрівати їх.

Також, якщо вода просякне ізоляційні матеріали будівлі, їх теплопровідність різко збільшиться, і сенс ізоляції буде втрачено.

2.8.2. Особливості термографії будівель

2.8.2.1. Візуалізація потоку тепла

Хоча тепло передається через теплопровідність, конвекцію і випромінювання, тепловізори здатні безпосередньо вимірювати лише випромінене тепло. Але це не означає, що кондуктивні втрати тепла чи конвективні потоки повітря не можуть бути виявлені. Теплопровідність і конвекція впливають на температуру елементів будівлі, що, своєю чергою, впливає на рівень тепла, який вони випромінюють. Звідси незвичні рівні інфрачервоного випромінення елементів будівлі можуть бути ознаками певних проблем. Так, наприклад, аномально тепла частина стіни може свідчити про відсутність ізоляції, а надмірно холодна віконна рама – вказувати на витік повітря.

2.8.2.2. Виявлення вологи

Запобігання накопичення вологи є значною проблемою в експлуатації будівель. Хоча тепловізори не можуть безпосередньо виміряти вміст води, її присутність може бути виявлена за тепловими зображеннями.

На тепловому зображенні мокрі поверхні можуть проявлятися як більш холодні ділянки через дію випарного охолодження (рис. 2.15 [3]). І місце контакту з водою може бути видно навіть тоді, коли сама вода невидима неозброєним оком.

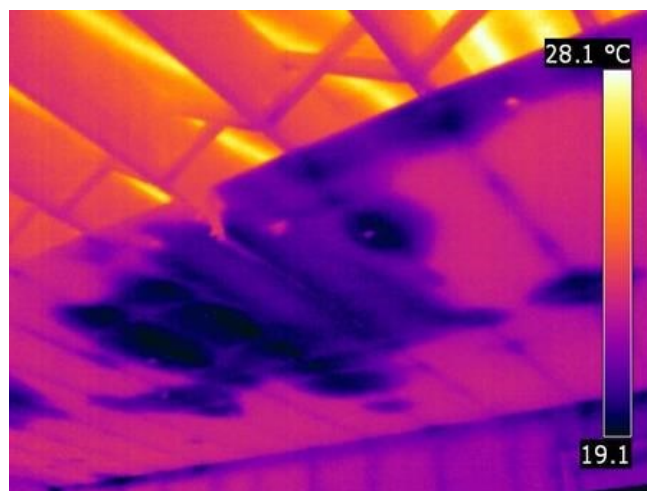


Рисунок 2.15 – Холодна пляма від накопиченої у стелі вологи

Але такі випадки вимагають ретельної інтерпретації. Через погодні умови зовнішні стіни будівлі можуть тимчасово охолоджуватись, формуючи на тепловому зображенні візерунок, що є схожим з проблемною вологою областю, але не свідчить про неї. І все ж таки, варіант прояву випарного охолодження повинен розглядатись в першу чергу.

При обстеженні будівель також треба виявляти ділянки, де температура будівельних структур зменшується нижче точки роси. В таких місцях існує ризик конденсації та накопичення вологи з повітря.

2.8.2.3. Обстеження специфічних частин будівлі

Кожен компонент будівлі має специфічні теплові властивості, а отже, і специфічний тепловий «підпис».

Наприклад, «яскраві гарячі» вікна є елементами, що відразу впадають в око на тепловому зображенні (рис. 2.16 [3]). Вікно може виглядати так через високий коефіцієнт відбиття скла: частина інфрачервоного випромінення, що виходить від нього насправді є відбитим випроміненням сусідніх джерел. Проте, правильно ізольовані вікна є ключовим елементом енергоефективної будівлі, а проблемні вікна з високими втратами тепла є дуже поширеним явищем. Тому при проведенні тепловізійного обстеження будівлі кожне «яскраве» вікно вимагає детального вивчення і визначення, чи свідчить воно про наявні теплові втрати, чи просто про відбиття.

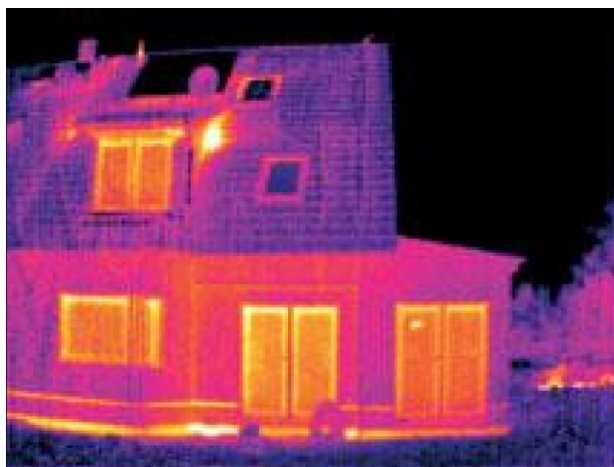


Рисунок 2.16 – Теплове зображення будинку з характерними «підписами» елементів

Але з іншого боку, аналізуючи теплові «підписи» елементів будівлі, слід враховувати, що через відмінність коефіцієнта випромінення матеріалів і кутів огляду елементів, їх відносні температури не можна порівнювати на одному тепловому зображенні. Наприклад, на рис. 2.16 не можна одночасно точно визначити температури даху, стін і вікон, але можна порівнювати між собою температури різних вікон, температури різних ділянок стіни, або температури різних ділянок даху.

Більше прикладів з практики обстеження будівель наведено в Додатку Б.

2.9. Контрольні запитання

1. Поясніть різницю між кількісним і якісним аналізом теплових зображень?
2. Що треба зробити, щоб виміряти температуру об'єкта із невідомим коефіцієнтом випромінення?
3. Чи впливає колір вимірюваного об'єкта на точність вимірювання температури?
4. Як визначається значення компенсації відбитої температури RTC?
5. Які погодні умови найбільш сприятливі для термографічного обстеження будівель?
6. Назвіть джерела помилок при вимірюванні температури тепловізором.
7. Для чого потрібно налаштовувати інтервал температур колірної палітри (схеми)?
8. Перелічіть у правильній послідовності порядок дій при тепловізійному обстеженні.
9. Яким явищам приділяється увага при оцінюванні теплообміну всередині будівлі?
10. Що таке кондукція (теплопровідність)?
11. Чому полум'я від газового пальника на даній термограмі Б.6 практично прозоре?
12. Про що свідчить термограма запобіжників на рис. Б.25?
13. Чому деякі склопакети у вікнах на рис. Б.67 відрізняються за кольором?
14. Про що свідчить тепловий рисунок двигуна на рис. Б.22?

15. Чому ніс людини на термограмі на рис. Б.7 синьо-зелений?
16. На що вказує перегрів на одному контакті роз'єднувача на рис. Б.16?
17. Чому на тепловому зображенні будівлі на рис. Б.4 купол має синій колір?
18. Про що свідчить термограма стінки котла на рис. Б.46?
19. Чи можна визначити рівень рідини в ємності за термограмою на рис. Б.62?
20. В чому причина втрат тепла на термограмі дверей на рис. Б.83?

ГЛОСАРІЙ

Абсолютний нуль

Найнижча можлива температура, яка становить $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (0 K). Тіла, температура яких дорівнює абсолютному нулю, не випромінюють інфрачервоне випромінення. Абсолютний нуль на практиці недосяжний.

Відносна вологість (відсоток вологості)

Процентне значення рівня насиченості повітря водяною парою. Наприклад, при відносній вологості 33 % повітря містить приблизно 1/3 максимального обсягу водяної пари, яку воно може поглинути при цій температурі та тиску. При відносній вологості повітря понад 100 % починається процес конденсації, оскільки повітря вже не може вбирати додаткову кількість вологи, і газоподібна водяна пара, що міститься в повітрі, перетворюється у рідину – конденсат. Чим вище температура повітря, тим більше водяної пари воно може поглинути без утворення конденсату. Через це конденсація завжди починається на холодних поверхнях.

Випромінювач Ламберта

Об'єкт з ідеальною дифузною (розсіюючою) поверхнею, який відбиває падаюче випромінення рівномірно у всіх напрямках.

Двоточкове вимірювання

При двоточковому вимірюванні на дисплеї тепловізора відображаються не одне, а два перехрестя в місцях вимірювання температури й відповідно два значення температури.

Еквівалентна шуму різниця температур (NETD)

Еквівалентна шуму різниця температур (NETD – *noise equivalent temperature difference*), або температурна чутливість датчика теплового випромінювання – показник, що характеризує найменшу різницю температур, яку може розрізнити тепловізор. Він дорівнює різниці температур вимірюваного об'єкта, при якій різниця у величині вихідного сигналу датчика дорівнює шуму, який він виявляє.

Еквівалентна шуму різниця температур зазвичай визначається у мілікельвінах (мК) і знаходиться в діапазоні 40–80 мК. Чим менше це значення, тим вища чутливість тепловізора.

Ізотерма

Область на тепловому зображенні, що складається з сукупності точок, ліній чи ділянок, які мають однакове значення температури (тобто однакову довжину хвилі інфрачервоного випромінення).

Інфрачервоний датчик (детектор)

Напівпровідниковий прилад, який приймає інфрачервоне випромінення і перетворює його в електричний сигнал. Геометрична роздільна здатність датчика характеризується кількістю пікселів зображення, а теплова роздільна здатність – еквівалентною шуму різницею температур.

Інфрачервоне (теплове) випромінення

Інфрачервоне випромінення – це електромагнітне випромінення, що охоплює діапазон довжин хвиль від 0,75 до 1000 мкм між діапазоном видимого світла і мікрохвильовим випроміненням. Кожен об'єкт з температурою вище абсолютного нуля ($0\text{K} = -273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) випускає інфрачервоне випромінення. Тепловізори здатні вимірювати інфрачервоне випромінення в діапазоні від 1 до 14 мкм, але зазвичай вимірюють довгохвильове інфрачервоне випромінювання в діапазоні від 8 до 14 мкм, оскільки атмосфера в цьому діапазоні довжин хвиль найбільш проникна для інфрачервоного випромінення.

Калібрування

Процедура отримання і порівняння показань приладу (фактичні значення) і показань еталонного приладу (номінальні значення). За допомогою отриманих результатів можна зробити висновок, чи знаходяться фактичні значення приладу в межах допустимого діапазону відхилення. На відміну від процедури налаштування, встановлене відхилення просто документується без налаштування приладу до номінального значення. Частота проведення калібрування залежить від завдань вимірювання та вимог до них.

Коефіцієнт випромінення (ϵ)

Міра здатності матеріалу випускати інфрачервоне випромінення. Коефіцієнт випромінення (або тепловіддача, або випромінювальна здатність) залежить від властивостей поверхні, матеріалу, а для деяких матеріалів – також від температури об'єкта. Об'єкт, який має здатність випромінювати максимально можливу енергію для його температури – «абсолютно чорне тіло».

Коефіцієнт відбиття (ρ)

Міра здатності матеріалу відбивати інфрачервоне випромінення. Коефіцієнт відбиття (або відбивна здатність) залежить від властивостей поверхні, температури та типу матеріалу. Кут відбиття інфрачервоного випромінення дорівнює куту падіння.

Коефіцієнт пропускання (τ)

Міра здатності матеріалу пропускати крізь себе інфрачервоне випромінення. Коефіцієнт пропускання залежить від типу і товщини матеріалу. Більшість матеріалів не пропускають довгохвильове інфрачервоне випромінення.

Колірна палітра (схема)

Палітра, що використовується для колірного позначення вимірюваної температури. Зазвичай яскравіші кольори відповідають більшій температурі, а темніші – меншій. Для теплових зображень існує багато різних колірних палітр (схем забарвлення), таких як «райдуга», «розжарювання заліза», «монохромна» та ін.

Вибір палітри залежить від завдань вимірювання та бажаної контрастності теплового зображення. Палітра термограми легко може бути змінена як під час вимірювання, так і після.

Кольоровий (селективний) випромінювач

Об'єкт з коефіцієнтом випромінення, який менше одиниці та залежить від довжини хвилі випромінення (його температури). Більшість металів є кольоровими випромінювачами. Наприклад, коефіцієнт випромінення алюмінію збільшується при нагріванні металу ($\epsilon = 0,02$ при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ та $\epsilon = 0,03$ при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Компенсація відбитої температури (RTC)

При падінні інфрачервоного випромінення на вимірювану поверхню певна його частка відбивається і потрапляє на датчик тепловізора. Це явище також називають «відбиттям температури». Для урахування впливу відбитого інфрачервоного випромінення на вимірюване значення температури об'єкта використовується параметр «компенсація відбитої температури» (RTC – *reflected temperature compensation*), що задається у градусах.

У більшості випадків, величина компенсації відбитої температури дорівнює температурі навколишнього середовища (зокрема при термографії в приміщенні). Але якщо на поверхні вимірюваного об'єкта відбивається інфрачервоне випромінення від джерел, температура яких значно відрізняється від температури оточуючого середовища, компенсацію відбитої температури слід визначати інструментально (наприклад, за допомогою випромінювача Ламберта).

Конвекція

Процес поширення тепла в рідинах, газах або сипких середовищах потоками самої речовини (вимушено або мимоволі).

Конденсація

Процес переходу газу або насиченої пари в рідину чи тверде тіло внаслідок охолодження або стиснення. Волога з повітря може конденсуватися на поверхні, якщо її температура, а отже, і температура повітря на поверхні, нижча за температуру точки роси.

Кондукція (теплопровідність)

Процес поширення тепла між частками тіла, що знаходяться в контакті. На відміну від конвекції, при кондукції (теплопровідності) частки не переміщуються. Теплова енергія передається всередині тіла від тепліших до холодніших часток внаслідок їх коливального руху.

Куб Леслі

Пристрій для вивчення теплового випромінення різних типів поверхонь вимірюваних об'єктів.

Сучасний куб Леслі являє собою порожній алюмінієвий куб з різними поверхнями стінок: полірованою, матовою, чорною та білою. Порожнину куба заповнюють гарячою водою, щоб стінки набули однакової температури, і здійснюють вимірювання інфрачервоного випромінення поверхонь.

Лазерний вказівник / маркер

За допомогою лазера полегшується наведення тепловізора на вимірюваний об'єкт в складних умовах. Червона точка лазера добре видна на відстані, але у випадку простого вказівника вона не точно відповідає центру теплового зображення, оскільки лазер і об'єктив тепловізора лежать на різних оптичних осях. Лазерний маркер відрізняється тим, що його мітка відображається без паралакса і співпадає з центром дисплея тепловізора.

Найменший вимірюваний об'єкт (пляма вимірювання)

Найменший вимірюваний об'єкт, або «пляма вимірювання» – розмір найменшого об'єкта, температуру якого можна точно виміряти за допомогою тепловізора. Він у 2–3 рази більший за найменший ідентифікований об'єкт.

Найменший ідентифікований об'єкт

Розмір об'єкта, що відповідає одному пікселю теплового зображення. Найменший ідентифікований об'єкт визначається просторовою (геометричною) роздільною здатністю інфрачервоного датчика тепловізора та відстанню вимірювання.

Об'єктив

Розмір поля зору тепловізора і, відповідно, розмір найменшого вимірюваного об'єкта (плями вимірювання) змінюється залежно від типу його об'єктива.

Ширококутний об'єктив (наприклад, стандартний об'єктив з кутом поля зору 32°) найкраще підходить для дослідження розподілу температури по великій поверхні. Для точного вимірювання маленьких деталей рекомендується використовувати телеоб'єктив (наприклад, з кутом поля зору 12°). Для вимірювання найдрібніших деталей з великої відстані існують спеціальні супертелеоб'єктиви (наприклад, з кутом поля зору 5°).

Поглинання

Коли електромагнітне інфрачервоне випромінення потрапляє на об'єкт, він поглинає певну частку цієї енергії. При поглинанні інфрачервоного випромінення об'єкт нагрівається. Тепліші об'єкти випромінюють більше інфрачервоного випромінення, ніж холодніші, тому інфрачервоне випромінення, що було поглинене об'єктом, перетворюється у його власне інфрачервоне випромінення. Коефіцієнт поглинання, таким чином, відповідає коефіцієнту випромінення. Та частка інфрачервоного випромінення, що падає на об'єкт і не поглинається ним, відбивається від об'єкта та/або пропускається (проходить крізь об'єкт).

Поле зору

Область, що видна інфрачервоному датчику тепловізора. Поле зору визначається як кут (наприклад, 32°) і залежить від розміру датчика тепловізора та типу його об'єктива.

Сірий випромінювач (випромінювач сірого тіла)

Об'єкт з коефіцієнтом випромінення, який менше одиниці та не залежить від довжини хвилі випромінення (його температури). На відміну від ідеального чорного випромінювача, реальний сірий випромінювач не поглинає та не випромінює 100 % випромінення, що потрапляє на нього ($\epsilon < 1$), але на відміну від кольорового випромінювача, його коефіцієнт випромінення є незмінним ($\epsilon = \text{const}$). Багато будівельних або органічних матеріалів можна вважати сірими випромінювачами.

Температура

Фізична величина, яка описує стан термодинамічної системи. Температура тіла є мірою його нагріву. Її чисельне значення пов'язано з середньою кінетичною енергією молекул тіла.

Теплове зображення

Створене за допомогою тепловізора зображення, яке представляє розподіл радіаційної температури поверхні з використанням різних кольорів для різних значень температури.

Тепловізор

Система для сприйняття інфрачервоного випромінення, що створює теплові зображення на базі дійсної радіаційної температури поверхні.

Термограма

Задokumentоване (наприклад, збережене на електронному носії) теплове зображення.

Термографія

Визначення та візуалізація розподілу поверхневої температури шляхом вимірювання довжини хвилі інфрачервоного випромінення від поверхні за допомогою тепловізора.

Точка роси (температура роси)

Температура, при якій повітря досягає стану насиченості водяною паром (відносна вологість 100 %), і вона починає конденсуватися у росу (рідину). Чим нижчою є відносна вологість повітря при поточній температурі, тим нижчою є точка роси. При відносній вологості 100 % (тобто при насиченні), точка роси збігається з фактичною температурою повітря.

Холодна точка та гаряча точка

Найхолодніша та найгарячіша точки на тепловому зображенні. Зазвичай помічаються на зображенні при використанні функції «Автоматичне розпізнавання гарячої/холодної точки» для полегшення їх виявлення.

Час стабілізації температури

Проміжок часу, необхідний тепловізору для набуття температури навколишнього середовища на місці проведення вимірювань. Зазвичай він складає близько 30 хв. Точне значення часу стабілізації вказується в інструкції з експлуатації тепловізора.

Частота оновлення зображення

Показник того, як часто оновлюється теплове зображення на екрані тепловізора. Частота оновлення може складати від 9 до 60 Гц (раз за секунду).

Чорний випромінювач (випромінювач чорного тіла)

Об'єкт з коефіцієнтом випромінення, який дорівнює одиниці. Чорний випромінювач поглинає всю енергію падаючого на нього інфрачервоного випромінення, перетворює її у власне інфрачервоне випромінення і повністю випромінює його ($\varepsilon = 1$) без відбиття або пропускання випромінення. Абсолютно чорне тіло – це ідеальний випромінювач. Об'єктів з такими властивостями в природі не існує.

Для калібрування тепловізорів використовують прилад, який називається випромінювач чорного тіла, однак його коефіцієнт випромінення все ж менше одиниці ($\varepsilon \approx 0,95\text{--}0,99$).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Теплотехніка : основи термодинаміки, теорія теплообміну, використання теплоти в сільському господарстві / О. С. Миронов, М. Р. Брижа, В. Б. Бойко., О. В. Золотовська – Дніпропетровськ: ТОВ «ЕНЕМ», 2011. – 424 с
2. A Basic Guide to Thermography / Land Instruments International. – Dronfield : Land Instruments International Ltd., 2004. – 14 p.
3. Plowright A. Using thermal cameras to promote energy efficiency in buildings / A. Plowright. – Vancouver : University of British Columbia, 2016. – 32 p.
4. Thermography Pocket Guide Theory – Practice – Tips & Tricks / Testo SE & Co. – Lenzkirch : Testo SE & Co. KGaA, 2017. – 56 p.
5. Introduction to Thermography Principles / Created in Cooperation with Fluke Corporation and The Snell Group. – Orland Park, IL. : American Technical Publishers, Inc., 2009. – 68 p.

ЗМІСТ

Вступ	3
Скорочення та умовні позначення	4
1. Вступ до термографії.....	5
1.1. Фізичні принципи термографії	7
1.1.1. Тепло та електромагнітне поле	7
1.1.2. Електромагнітний спектр	7
1.1.3. Розподіл енергії випромінення по спектру.....	9
1.2. Вимірювання інфрачервоного випромінення	10
1.2.1. Складові вимірюваного випромінення	10
1.2.2. Коефіцієнт випромінення.....	11
1.2.3. Коефіцієнт відбиття	15
1.2.4. Коефіцієнт пропускання.....	16
1.2.5. Взаємозв'язок між випроміненням і відбиттям	16
1.2.6. Вплив перепаду температур.....	17
1.2.7. Пляма вимірювання та відстань вимірювання тепловізора.....	19
1.3. Тепловізор	21
1.3.1. Конструкція	21
1.3.2. Технічні характеристики	24
1.3.3. Апаратні засоби.....	25
1.3.4. Функції програмного забезпечення.....	26
1.4. Контрольні запитання	28
2. Практика термографії	29
2.1. Кількісний та якісний аналіз теплових зображень	29
2.2. Фактори, які впливають на теплове зображення	30
2.2.1. Властивості вимірюваного об'єкта	32
2.2.2. Властивості середовища вимірювання	34
2.3. Практичні методи визначення коефіцієнта випромінення і компенсації відбитої температури RTC.....	38
2.3.1. Визначення коефіцієнта випромінення шляхом порівняльного вимірювання.....	39
2.3.2. Визначення компенсації відбитої температури RTC	40
2.4. Складнощі при вимірюванні тепловізором	41
2.4.1. Джерела помилок при вимірюванні температури тепловізором	41

2.4.2. Оптимальні умови та порядок тепловізійного обстеження.....	47
2.5. Обстеження виробничого обладнання	50
2.5.1. Обстеження електричних установок.....	50
2.5.2. Обстеження механічного обладнання.....	52
2.5.3. Обстеження вогнетривких структур	53
2.8. Обстеження будівель	53
2.8.1. Теплова динаміка будівель.....	55
2.8.2. Особливості термографії будівель	59
2.9. Контрольні запитання	61
Глосарій.....	63
Список літератури.....	71
Додаток А Значення коефіцієнта випромінення	74
Додаток Б Приклади теплових зображень та їх аналізу	77
Б.1. Теплові зображення навколишнього середовища	77
Б.2. Теплові зображення електричного обладнання.....	79
Б.3. Теплові зображення промислового обладнання.....	88
Б.4. Теплові зображення елементів промислових теплотехнічних систем	91
Б.5. Теплові зображення елементів систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря.....	94
Б.6. Теплові зображення баків і ємностей	95
Б.7. Теплові зображення будівель	98

Додаток А

ЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВИПРОМІНЕННЯ

Подана нижче табл. А.1 є загальним керівництвом для вибору коефіцієнта випромінення матеріалу в інфрачервоному спектрі. Вона містить значення коефіцієнта для деяких поширених матеріалів з урахуванням впливу температури та властивостей поверхні. Проте, наведені значення слід розглядати лише як орієнтир. Точне значення коефіцієнта випромінення ϵ для вимірюваного об'єкта має бути визначено інструментально.

Таблиця А.1 – Коефіцієнт випромінення ϵ

Матеріал (температура матеріалу)	Коефіцієнт випромінення
Алюміній, неокиснений (25 °C)	0,02
Алюміній, неокиснений (100 °C)	0,03
Алюміній, сильно окиснений (93 °C)	0,20
Алюміній, полірований (100 °C)	0,09
Алюміній, прокат заготовки (170 °C)	0,04
Бавовна (20 °C)	0,77
Бетон (25 °C)	0,93
Гіпс (20 °C)	0,90
Глина, обпалена (70 °C)	0,91
Граніт (20 °C)	0,45
Гума, жорстка (23 °C)	0,94
Гума, м'яка, сіра (23 °C)	0,89
Дерево (70 °C)	0,94
Залізо прокат (20 °C)	0,77
Залізо чорне (100 °C)	0,80
Залізо, шкурене (20 °C)	0,24
Латунь, окиснена (200 °C)	0,61

Продовження табл. А.1

Матеріал (температура матеріалу)	Коефіцієнт випромінювання
Лід, гладкий (0 °С)	0,97
Людина (36 °С)	0,98
Мрамур, білий (40 °С)	0,95
Мідь, злегка потьмяніла (20 °С)	0,04
Мідь, окиснена (130 °С)	0,76
Мідь, полірована (40 °С)	0,03
Мідь, прокат (40 °С)	0,64
Папір (20 °С)	0,97
Піщаник (40 °С)	0,67
Пластмаса: ПЕ, ПП, ПВХ (20 °С)	0,94
Пробка (20 °С)	0,70
Радіатор, чорний, анодований (50 °С)	0,98
Свинець (40 °С)	0,43
Свинець, окиснений (40 °С)	0,43
Свинець, сірий (40 °С)	0,28
Скло (90 °С)	0,94
Сталь, окиснена (200 °С)	0,79
Сталь, термічно оброблена (200 °С)	0,52
Сталь, холоднокатана (93 °С)	0,75–0,85
Фарба олійна (всі кольори) (90 °С)	0,92–0,96
Фарба біла (90 °С)	0,95
Фарба жовта, 2 шари на алюмінієвій фользі (40 °С)	0,79
Фарба синя, 1 шар на алюмінієвій фользі (40 °С)	0,78
Фарба чорна матова (80 °С)	0,97
Фарба трансформаторна (70 °С)	0,94
Фарфор (20 °С)	0,92

Продовження табл. А.1

Матеріал (температура матеріалу)	Коефіцієнт випромінення
Хром (40 °С)	0,08
Хром, полірований (150 °С)	0,06
Цегляна кладка (40 °С)	0,93
Цинк, окиснений	0,1
Чавун, окиснений (200 °С)	0,64
Штукатурка (20 °С)	0,93

Додаток Б

ПРИКЛАДИ ТЕПЛОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗУ

Усі теплові зображення в додатку Б наведені за джерелом [5].

Б.1. Теплові зображення навколишнього середовища

На рис. Б.1 показано, що навіть льодовики на вершинах гір випускають інфрачервоне випромінювання і видні на тепловому зображенні. Водночас небо на тепловому зображенні виглядає абсолютно холодним.

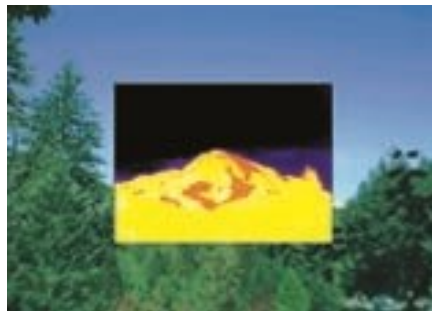


Рисунок Б.1 – Термограма гір

Теплове зображення великого контейнерного судна на рис. Б.2 показує, що його вихлопну трубу і машинне відділення можна виявити навіть на дуже великій відстані і вночі.

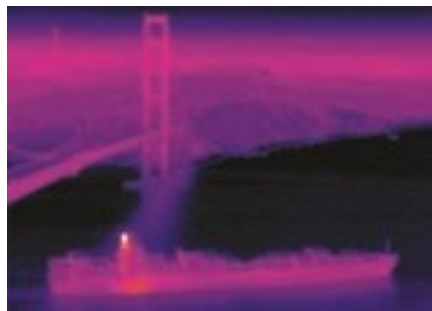


Рисунок Б.2 – Термограма контейнерного судна

На рис. Б.3 показано приклад, коли на фотографії міста у видимому спектрі дуже важко чітко побачити деталі панорами крізь туман. Водночас на тепловому зображенні легко можна розрізнити не лише окремі будівлі, а й різні типи хмар на небі.

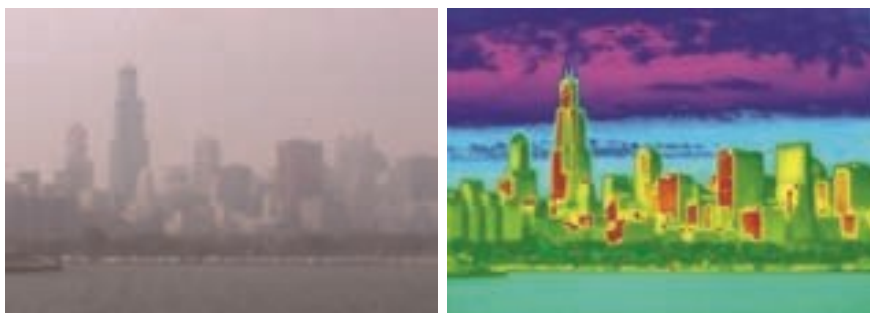


Рисунок Б.3 – Термограма міського горизонту

Позолочений купол будівлі на рис. Б.4 відбиває небо і тому виглядає холоднішим за інші частини фасаду.



Рисунок Б.4 – Термограма фасаду будівлі

Як видно на рис. Б.5, візерунок на тепловому зображенні чавунної сковороди повторює форму конфорки газової плити.



Рисунок Б.5 – Термограма чавунної сковороди

Хоча газовий пальник виглядає гарячим на рис. Б.6, саме полум'я практично непомітне на тепловому зображенні. Воно має значний коефіцієнт пропускання і в інфрачервоному діапазоні майже прозоре.

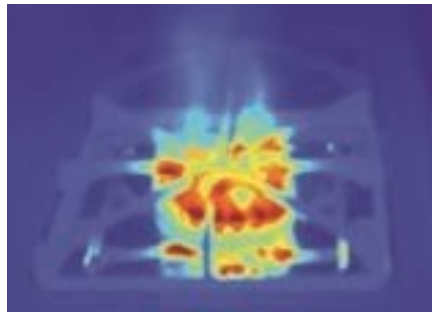


Рисунок Б.6 – Термограма газового пальника

Як показано на рис. Б.7, ніс людини зазвичай холодніший за інші частини тіла через менший кровотік і сильніше конвективне охолодження.



Рисунок Б.7 – Термограма обличчя людини

Б.2. Теплові зображення електричного обладнання

«Гаряча» пляма на перемичці лінії електропередачі на рис. Б.8 вказує на з'єднання з високим опором через корозію. При збільшенні навантаження воно може мати серйозні наслідки.



Рисунок Б.8 – Термограма з'єднання на лінії електропередачі

«Гаряча» зона на наконечнику трансформатора на рис. Б.9 є явною ознакою проблеми електричного з'єднання.

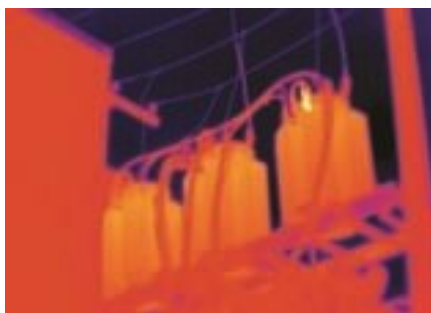


Рисунок Б.9 – Термограма трансформатора

Як показано на рис. Б.10, деякі проблеми з перегрівом трансформаторів можна виявити навіть на великій відстані (зображення ліворуч). Більш ретельний аналіз часто вимагає використання телеоб'єктива (зображення праворуч) або зменшення відстані зйомки.

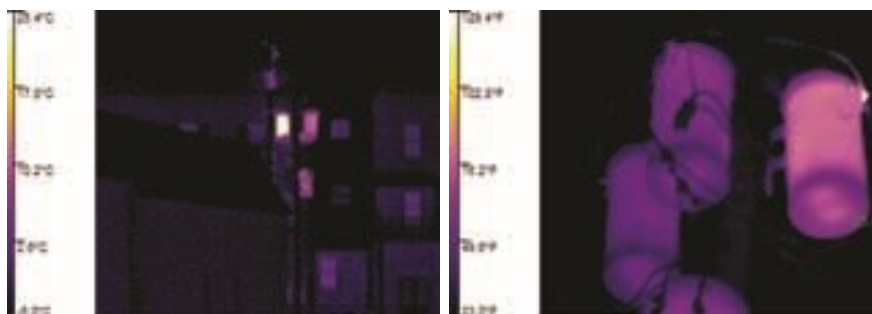


Рисунок Б.10 – Термограма трансформаторів з різної відстані

Середній трансформатор на рис. Б.11, який є теплішим, ніж інші, вказує на можливі проблеми в ньому.



Рисунок Б.11 – Термограма трансформаторів на повітряному блоці

Теплове зображення трифазного сухого трансформатора на рис. Б.12 показує, що основний ввід на лівій фазі має ненормальний нагрів.



Рисунок Б.12 – Термограма сухого трансформатора

Теплове зображення на рис. Б.13 свідчить про те, що в трансформаторі справа може бути несправність.



Рисунок Б.13 – Термограма трансформаторів побутової мережі

Як показано на рис. Б.14, за умови достатнього навантаження, при невеликому вітрі або його відсутності, не складно виявити таку проблему, як гарячі губки та ніж високовольтного роз'єднувача.



Рисунок Б.14 – Термограма високовольтного роз'єднувача

На тепловому зображенні на рис. Б.15 видно нагрів роз'єднувача через ненормально високий опір. Це є серйозною проблемою, оскільки навіть порівняно невисокі температури можуть викликати його пошкодження.

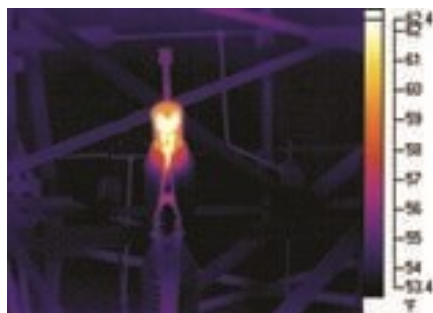


Рисунок Б.15 – Термограма роз'єднувача

У роз'єднувача на рис. Б.16 є два паралельних підключення, тому перегрів одного з них свідчить про якісне з'єднання, а місцем, де насправді існує проблема, є холодна частина.

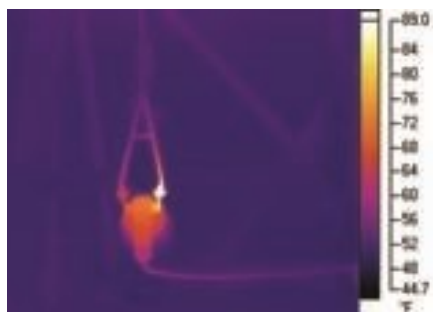


Рисунок Б.16 – Термограма підключень роз'єднувача

Область «гарячих» кольорів на тепловому зображенні маслonaповненого роз'єднувача на рис. Б.17 свідчить про те, що внутрішнє з'єднання кришки введення зі стрижнем є ненормально нагрітим.



Рисунок Б.17 – Термограма маслonaповненого роз'єднувача

Два з шести вводів маслonaповненого вимикача на рис. Б.18 мають ненормальний нагрів, що свідчить про стан, який може призвести до серйозних наслідків.

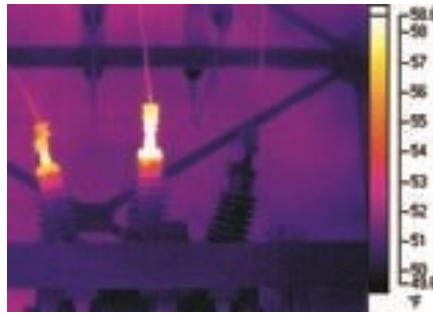


Рисунок Б.18 – Термограма введів маслонаповненого вимикача

Теплове зображення нормально працюючого електродвигуна на рис. Б.19 показує нормальне розсіювання тепла через вентиляційні отвори.

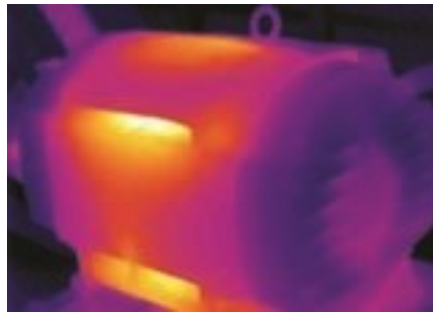


Рисунок Б.19 – Термограма електродвигуна

Хоча два різних двигуни й насоси на рис. Б.20 мають різні теплові візерунки, обидва вони свідчать про нормальний робочий стан. Тому важливо порівнювати результати температурних замірів із нормативними значеннями температур обладнання.

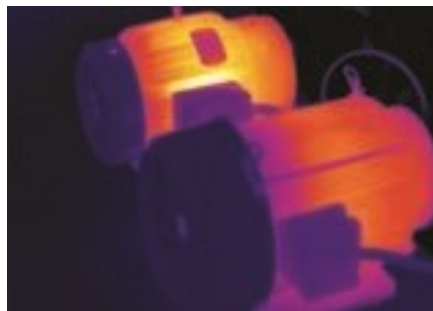


Рисунок Б.20 – Термограма електродвигунів різних насосів

На термограмі (рис. Б.21) одразу видно температуру в декількох ключових точках двигуна, що дозволяє швидко перевірити, чи нормально він працює.



Рисунок Б.21 – Термограма корпусу асинхронного електродвигуна

Як показано на рис. Б.22, тепловий візерунок нормально працюючого двигуна насоса повинен мати рівномірний розподіл температури.

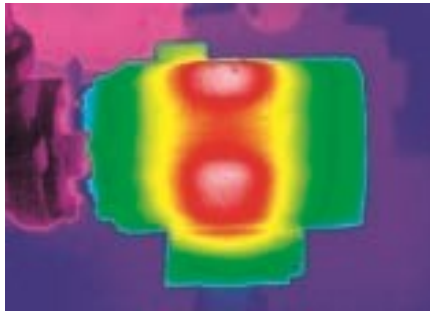


Рисунок Б.22 – Термограма електродвигуна

Як показано на рис. Б.23, «гаряча» пляма на тепловому зображенні не завжди вказує на основну проблему. Однаково вірогідно як те, що з ладу вийшов верхній запобіжник, так і те, що є проблема з центральним запобіжником.

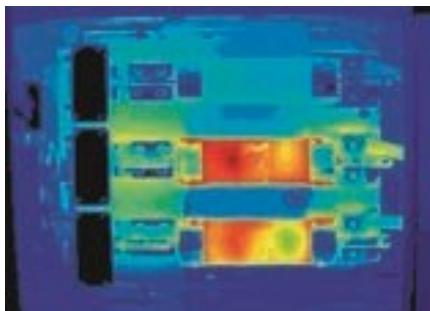


Рисунок Б.23 – Термограма запобіжників

На рис. Б.24 область «гарячого» кольору на зображенні блока запобіжників вказує на можливі проблеми, пов'язані з високим опором з'єднання на центральній фазі.

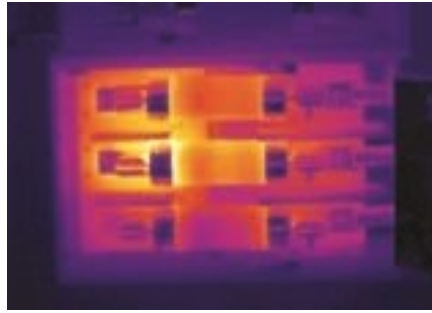


Рисунок Б.24 – Термограма запобіжників

Як показано на рис. Б.25, щоб побачити дисбаланс навантаження на запобіжниках, необхідно правильно відрегулювати межі вимірювання температури.

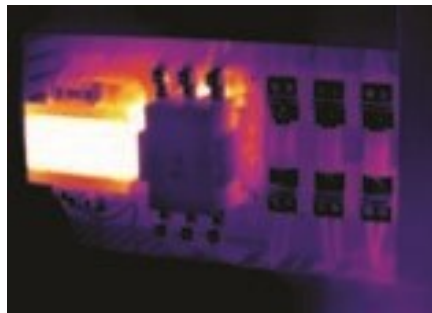


Рисунок Б.25 – Термограма запобіжників із неналежним діапазоном вимірювань

Щоби виявити приховані проблеми в обладнанні на рис. Б.26, необхідно порівняти теплові зображення схожих елементів у схожих умовах роботи.

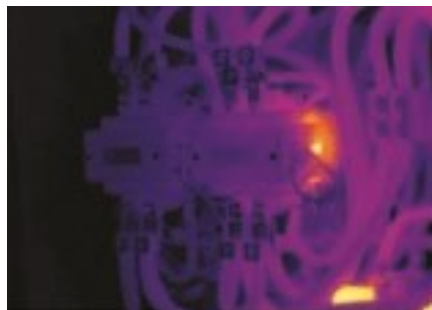


Рисунок Б.26 – Термограма з'єднань

На рис. Б.27 показано під'єднання тримача запобіжника в панелі управління двигунами, яке має ненормальний нагрів.



Рисунок Б.27 – Термограма тримачів запобіжників

Теплове зображення на рис. Б.28 чітко вказує на з'єднання з високим опором або несправний елемент автоматичного вимикача. На звичайному фото цього не видно.

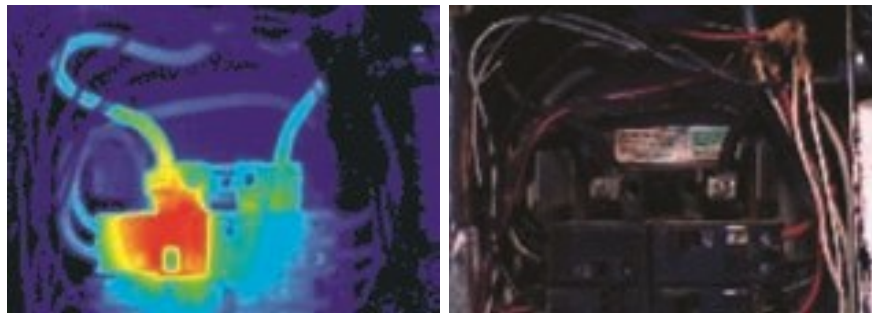


Рисунок Б.28 – Термограма автоматичного вимикача

На тепловому зображенні електричної шафи на рис. Б.29 чітко виявляються проблеми із внутрішніми елементами панелі керування двигунами.



Рисунок Б.29 – Термограма шафи керування двигунами

Навіть незначні підвищення температури поверхні стіни на рис. Б.30 вказують на можливе перевантаження загального нейтрального провідника або дефекти заземлення. Це може викликати нагрівання кабельних каналів у стіні до температури займання.

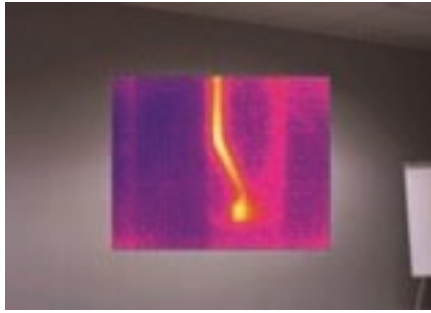


Рисунок Б.30 – Термограма внутрішньої проводки у будівлі

Теплове зображення на рис. Б.31 дозволяє виявити несправність у нагрівальних кабелях зовнішніх водопроводів.

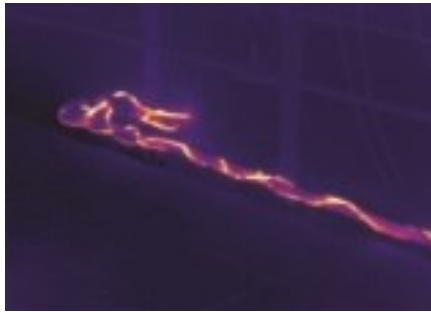


Рисунок Б.31 – Термограма нагрівального кабелю

Права розетка серверної стійки на рис. Б.32 має тепловий візерунок, який вказує на з'єднання з високим опором або на проблеми з проводкою.



Рисунок Б.32 – Термограма серверної стійки

«Гарячі» плями на рис. Б.33 вказують на з'єднання з високим опором або відмову компонента.

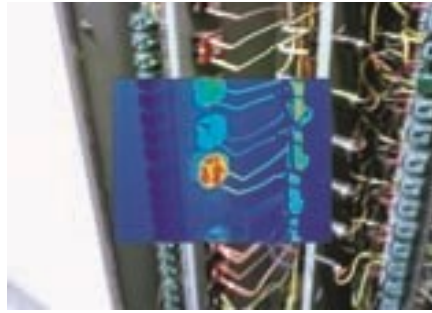


Рисунок Б.33 – Термограма шафи управління освітленням

Теплове зображення шафи системи управління низької напруги на рис. Б.34 показує контактні з'єднання з високим опором, які нагріваються більше за інші.

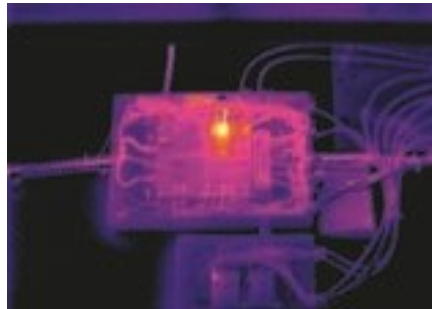


Рисунок Б.34 – Термограма комутаційної шафи

Б.3. Теплові зображення промислового обладнання

Багатоступеневий повітряний компресор на рис. Б.35 працює правильно, як видно з поступового збільшення температури на кожному ступені.

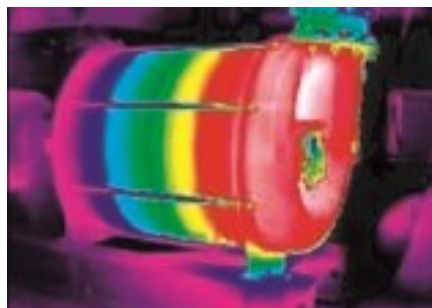


Рисунок Б.35 – Термограма відцентрового компресора

Теплове зображення двоступеневого насоса на рис. Б.36 показує якість роботи кожного його ступеня.

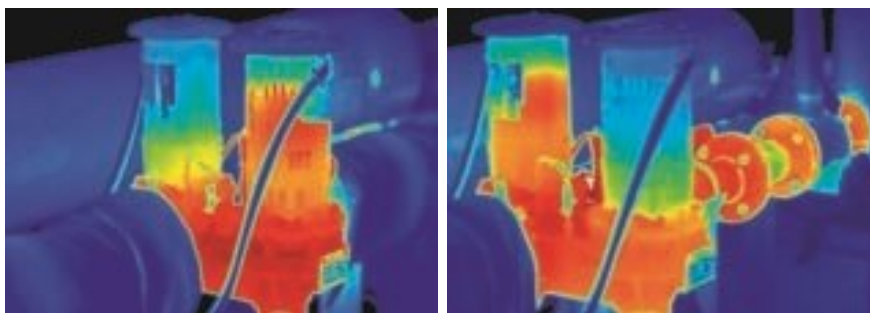


Рисунок Б.36 – Термограма двоступеневого насоса

«Гаряча» зона на тепловому зображенні, наведеному на рис. Б.37, – це підшипник конвеєрної стрічки. Його перегрів може призвести до надмірної витрати енергії, а з часом, і до розтягування ланцюга приводу.



Рисунок Б.37 – Термограма підшипника конвеєрної стрічки

Тертя стрічки підвісного конвеєра на рис. Б.38 створює зону перегріву на його тепловому зображенні. Стрічка перекошується через зношений ролик в підшипнику. В результаті підвищене тертя призводить до перегріву приводного двигуна.



Рисунок Б.38 – Термограма конвеєрної стрічки

На рис. Б.39 області «гарячого» кольору на тепловому зображенні показують кілька підшипників конвеєра, які мають ненормальний нагрів.

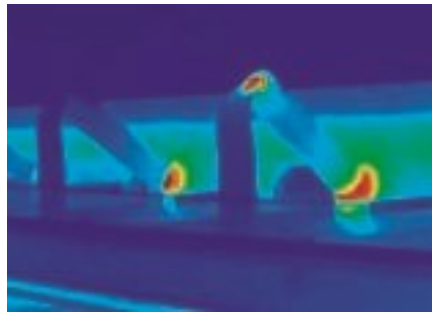


Рисунок Б.39 – Термограма підшипників конвеєра

На рис. Б.40 наведено теплове зображення двигуна і муфти зчеплення з «гарячими» тепловими слідами з обох сторін муфти. Це може свідчити про порушення співвісності зчеплення. Водночас, на звичайному фото ознаки несправності не спостерігаються.

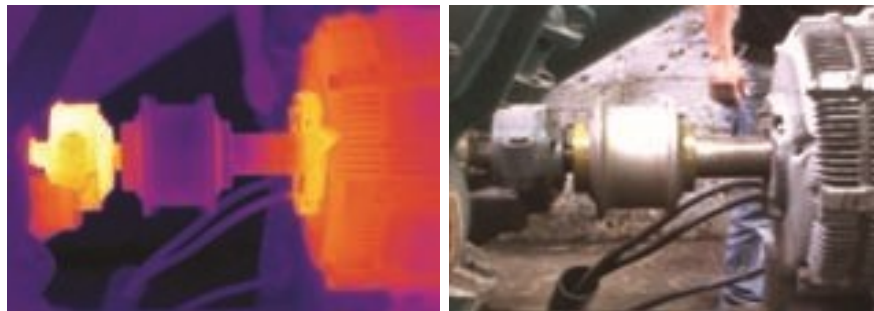


Рисунок Б.40 – Термограма двигуна і муфти зчеплення

Права кришка підшипника вентиляційної установки на рис. Б.41 значно тепліше лівої, що вказує на можливу проблему з мастилом, співвісністю або ремнем передачі.

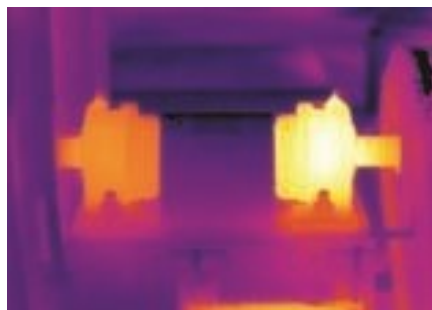


Рисунок Б.41 – Термограма кришок підшипників

«Гарячі» області на тепловому зображенні ремня і шківів на рис. Б.42 вказують на можливі проблеми співвісності.

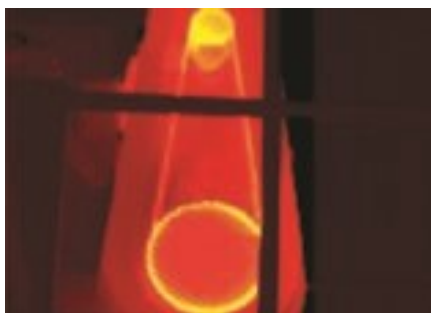


Рисунок Б.42 – Термограма ремінної передачі

Б.4. Теплові зображення елементів промислових теплотехнічних систем

На рис. Б.43 показано, як теплові сліди на печі відпалу вказують на знос вогнетривкої футерівки.



Рисунок Б.43 – Термограма футерівки печі відпалу

Двигун циркуляційного вентилятора на правій частині печі відпалу на рис. Б.44 може бути несправний, оскільки його робоча температура вище, ніж в інших.



Рисунок Б.44 – Термограма циркуляційних вентиляторів

«Гарячі» зони на тепловому зображенні на рис. Б.45 свідчать про порушення цілісності футерівки цементної печі.

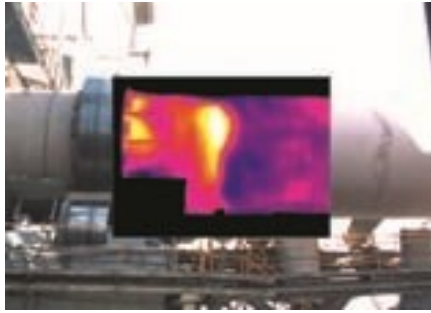


Рисунок Б.45 – Термограма футерівки цементної печі

Теплі ділянки на поверхні котла на рис. Б.46 вказують на можливий знос вогнетривкої футерівки, витоки повітря або обидві причини.

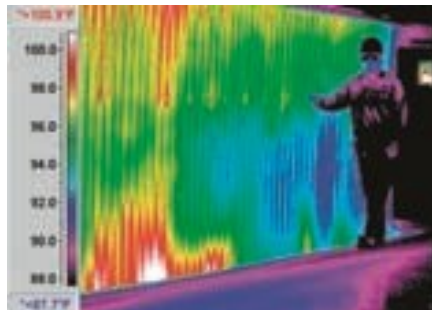


Рисунок Б.46 – Термограма стінки котла

На рис. Б.47 циліндр дизельного двигуна електростанції, в якому відбувається пропуск займання, має нижчу температуру, ніж нормально працюючі циліндри.

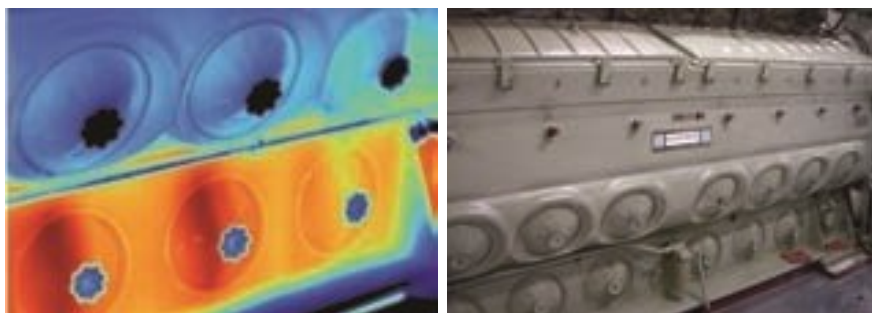


Рисунок Б.47 – Термограма двигуна дизельної електростанції

Як показано на рис. Б.48, використання кольору насичення монохромної палітри може бути корисним для визначення того, які вентиля гарячої води та пари відкриті або закриті, і чи правильно вони працюють.

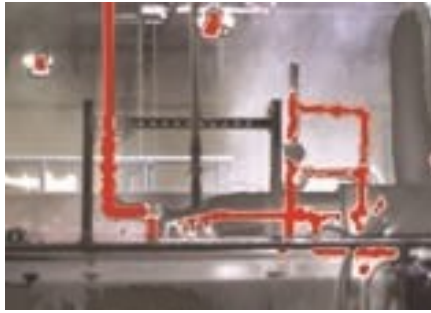


Рисунок Б.48 – Термограма трубопроводів з кольорами насичення

Як показано на рис. Б.49, правильно працюючий конденсаційний горщик на тепловому зображенні повинен бути теплішим з боку пари та холоднішим з боку конденсату.



Рисунок Б.49 – Термограма конденсаційного горщика

Теплове зображення на рис. Б.50 показує нормально працюючий відкритий гідравлічний клапан.

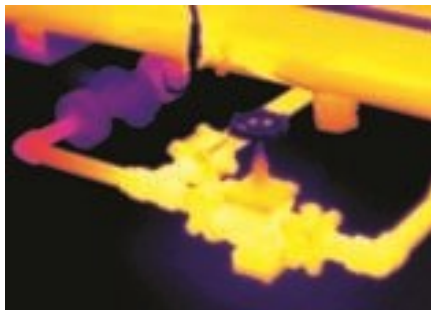


Рисунок Б.50 – Термограма гідравлічного клапана

Області «гарячих» кольорів на рис. Б.51 вказують, що на неізольованих ділянках паропроводу біля засувок втрачається тепло.

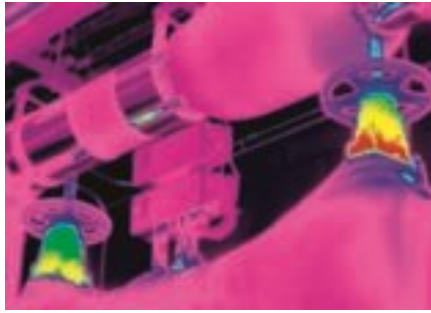


Рисунок Б.51 – Термограма паропроводу

На рис. Б.52 зміна кольору теплового зображення по лінії вбудованого конденсатора і байпасного клапана вказує на їх правильну роботу.

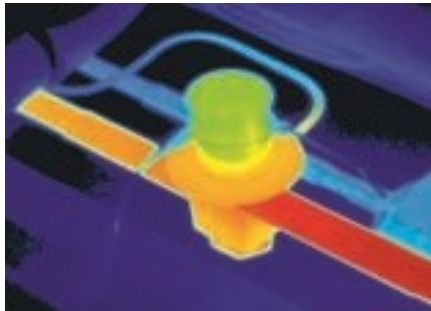


Рисунок Б.52 – Термограма байпасного клапана

Б.5. Теплові зображення елементів систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря

Області «холодного» кольору на рис. Б.53 показують, де холодоагент проходить через теплообмінник внутрішнього блоку кондиціонера.

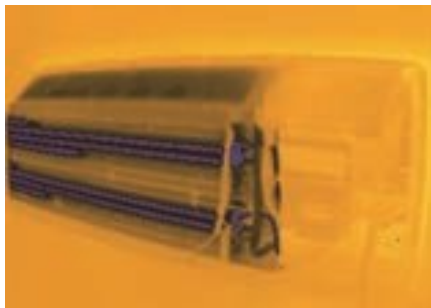


Рисунок Б.53 – Термограма внутрішнього блоку кондиціонера

«Холодна» пляма на рис. Б.54 показує місце, де охолоджене повітря проникає всередину стіни через з'єднання повітряного каналу системи ОВКП.

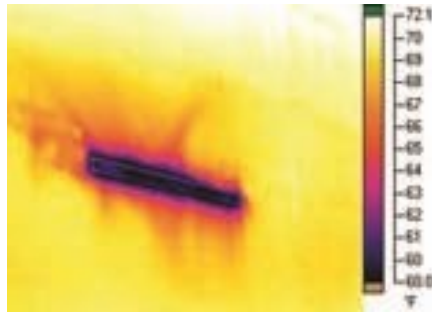


Рисунок Б.54 – Термограма вентиляційної решітки

Висока різниця температур на тепловому зображенні компресора системи ОВКП на рис. Б.55 є ознакою його нормальної роботи.



Рисунок Б.55 – Термограма компресора кондиціонера

Теплове зображення нагрівача запобігання конденсації на рис. Б.56 свідчить про його нормальну роботу.



Рисунок Б.56 – Термограма нагрівача запобігання конденсації

Б.6. Теплові зображення баків і ємностей

Різниця температур поверхні бака на рис. Б.57 дозволяє визначити рівень рідини всередині. Тут пуста частина бака нагріта сонцем, і її температура вище, ніж у заповненої.

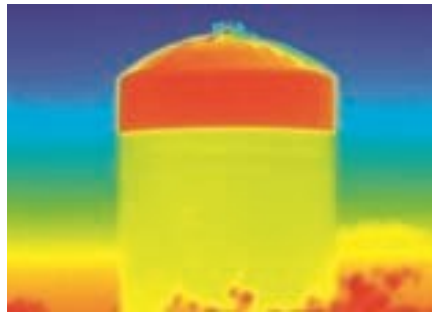


Рисунок Б.57 – Термограма бака з рідиною

На рис. Б.58 рівень води в водонапірній башті показують «гарячі» області. Тут температура води в баку більша за температуру повітря, тому пуста частина бакуа холодніша за заповнену.

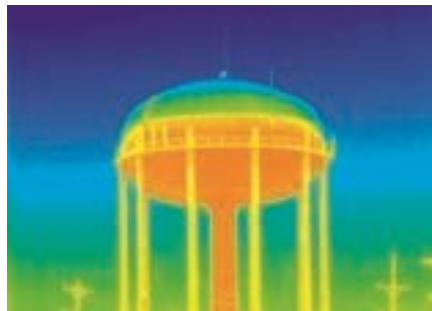


Рисунок Б.58 – Термограма водонапірної башти

Теплове зображення на рис. Б.59 дозволяє визначити рівень скрапленого пропану в ємності. Заповнена частина ємності має нижчу температуру.

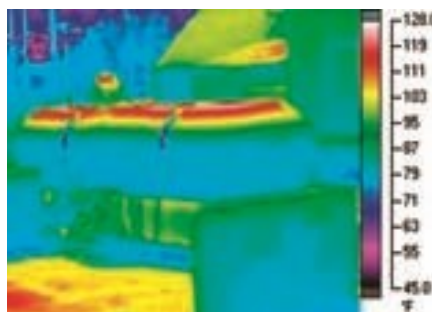


Рисунок Б.59 – Термограма ємності з пропаном

Завдяки погодним умовам, що були під час тепловізійної зйомки, пуста частина баків на рис. Б.60 має вищу температуру, ніж заповнена.



Рисунок Б.60 – Термограма єдностей із рідиною

На рис. Б.61, на тепловому зображенні бака під час теплового перехідного процесу чітко видні рівні рідини та шламу.

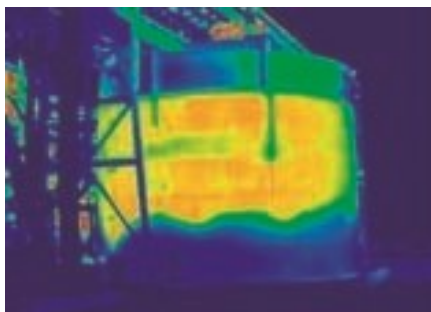


Рисунок Б.61 – Термограма бака зі шламом і рідиною

Теплове зображення на рис. Б.62 ілюструє вплив матеріалів з низьким коефіцієнтом випромінювання. Верхня частина ємності з полірованого листового металу виглядає холоднішою не через власну температуру, а через те, що відбиває «холодне» випромінювання ясного неба. Нижня частина ємності виглядає теплішою через відбиття випромінювання нагрітої сонцем землі.

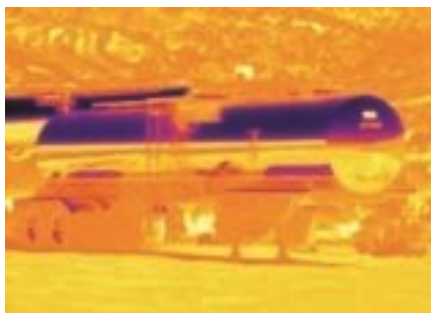


Рисунок Б.62 – Термограма ємності з полірованого металу

Б.7. Теплові зображення будівель

На рис. Б.63 теплове зображення будівлі з великої відстані показує неочікувані зміни температури на фасаді, які можуть вказувати на місця можливих проблем.



Рисунок Б.63 – Термограма фасаду багатоповерхового будинку

«Гарячі» плями на тепловому зображенні стіни будівлі на рис. Б.64 показують місця, де через погане повітряне ущільнення тепле холодне повітря проходить крізь ізоляцію зі скловолокна.

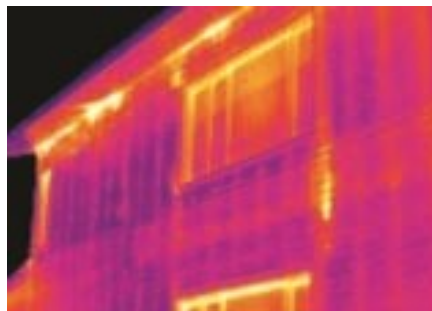


Рисунок Б.64 – Термограма зовнішньої стіни

«Гарячі» зони на тепловому зображенні зовнішнього виду будівлі на рис. Б.65 чітко вказують на проблемні ділянки, де відсутня теплоізоляція.



Рисунок Б.65 – Термограма фасаду будівлі із цегляним димоходом

На рис. Б.66 показано, як в холодну погоду проявляються області відсутньої теплоізоляції у вигляді теплих ділянок на зовнішніх стінах будівлі.



Рисунок Б.66 – Термограма фасаду будівлі

Теплі ділянки в центрі вікон на рис. Б.67 вказують на втрату теплоізолюючого аргону, який повинен заповнювати простір усередині склопакетів.

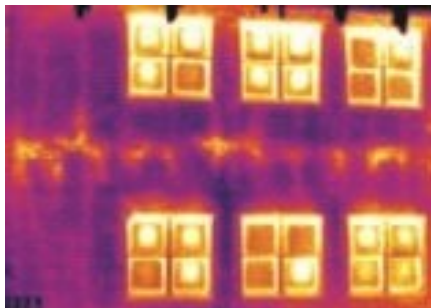


Рисунок Б.67 – Термограма вікон

На рис. Б.68 показано приклад, як через неправильне налаштування діапазону вимірювання температур на тепловому зображенні важко помітити ділянки із пошкодженою теплоізоляцією стін.

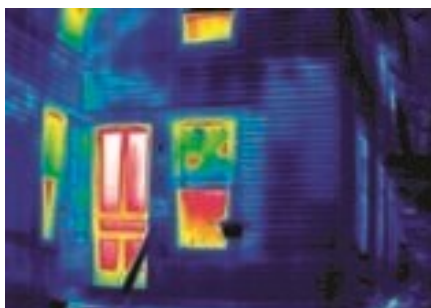


Рисунок Б.68 – Термограма фасаду будівлі

Численні «гарячі» плями під вікнами на рис. Б.69 вказують на неправильний монтаж теплоізоляції будівлі.



Рисунок Б.69 – Термограма фасаду будівлі

«Гарячі» плями на рис. Б.70 вказують на витік теплого повітря через нещільності у конструкції даху.

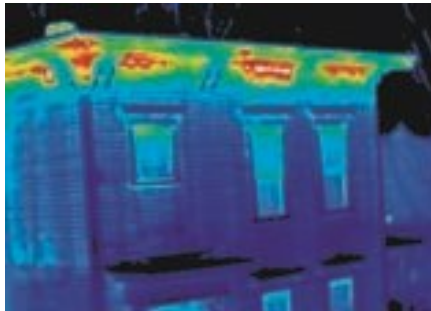


Рисунок Б.70 – Термограма витоків повітря в будівлі

«Холодні» зони на тепловому зображенні кам'яного облицювання будівлі на рис. Б.71 вказують місця, де до нього проникла волога. Вона може призвести до пошкоджень облицювання.

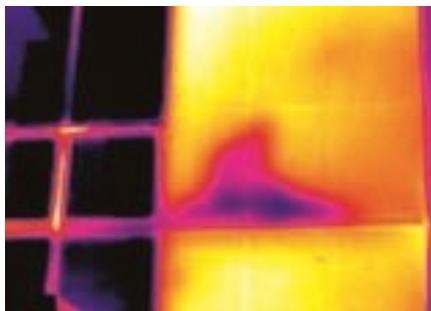


Рисунок Б.71 – Термограма кам'яного облицювання фасаду будівлі

«Холодні» зони на тепловому зображенні фасаду будівлі на рис. Б.72 вказують місця, де вода з даху потрапляє в бетонні блоки через її неналежне відведення.

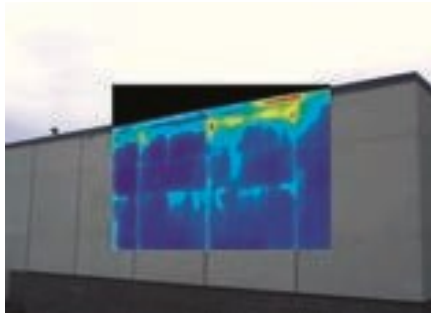


Рисунок Б.72 – Термограма фасаду будівлі

«Гаряча» пляма на тепловому зображенні даху на рис. Б.73 показує область з вологою теплоізоляцією. Але для отримання такого зображення необхідно дотриматись особливих погодних умов.



Рисунок Б.73 – Термограма даху в області пошкодження покрівлі

На рис. Б.74 наведено приклад «гарячої» плями на тепловому зображенні даху, яка не свідчить про жодне пошкодження, а є лише тепловим слідом від козирка вентиляційних каналів будівлі.



Рисунок Б.74 – Термограма теплової плями від повітряного потоку

На рис. Б.75 показано, що теплові сліди на одношарових покрівлях даху з ізоляцією з піноматеріалу проявляються чіткіше, ніж на багатошарових.



Рисунок Б.75 – Термограма одношарової покрівлі

«Гарячий» колір насичення монохромної палітри на рис. Б.76 чітко вказує на погане укладання теплоізоляції в похилій покрівлі.

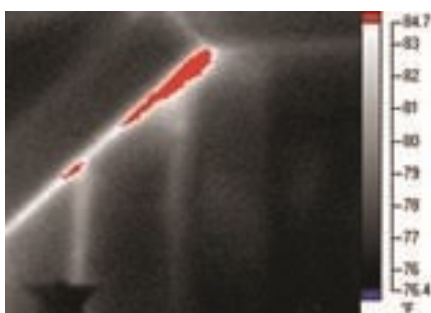


Рисунок Б.76 – Термограма стелі горища

«Холодна» пляма на тепловому зображенні даху зсередини будівлі на рис. Б.77 показує теплоізоляцію, яка стала вологою через течу в покрівлі з невеликим ухилом. Щоб мати змогу побачити це на тепловому зображенні, металевий настил даху має бути пофарбований.

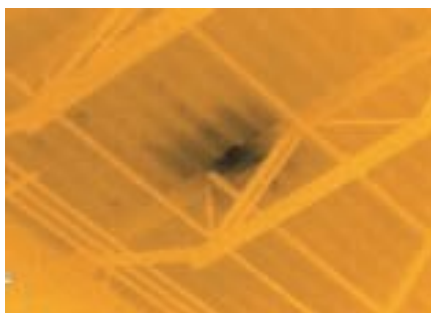


Рисунок Б.77 – Термограма даху

Теплове зображення стін на рис. Б.78 дозволяє побачити приховані будівельні та інші елементи, наприклад, земляний уступ зовні даного гімнастичного залу.

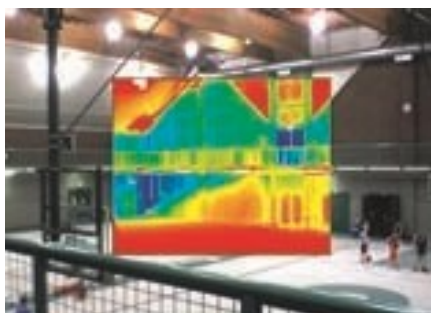


Рисунок Б.78 – Термограма внутрішніх поверхонь стін гімнастичного залу

Тепловий візерунок блокової стіни на рис. Б.79 показує проникнення вологи в місці з'єднання двох стін, а також неоднорідності будівельних конструкцій.

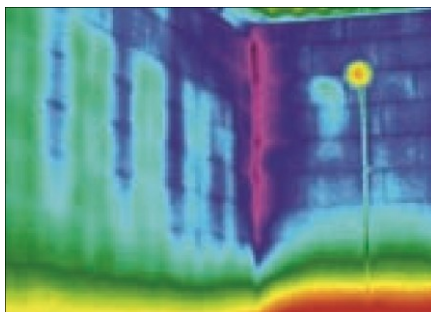


Рисунок Б.79 – Термограма внутрішньої поверхні стіни

Як показано на рис. Б.80, одна невелика ділянка стіни з відсутньою внутрішньою теплоізоляцією може викликати ненормальні витоки повітря на краях інших ділянок.

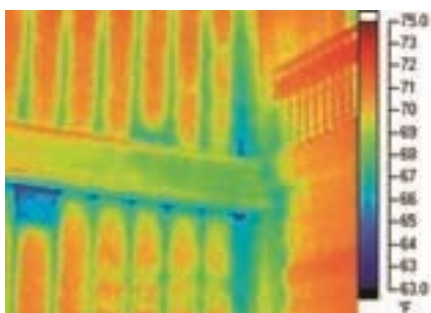


Рисунок Б.80 – Термограма повітряних теч у внутрішній стіні

На тепловому зображенні стіни на рис. Б.81 видно, що незафіксована теплоізоляція в порожнині стіни злежалася і втратила ефективність через неякісний монтаж.



Рисунок Б.81 – Термограма внутрішньої поверхні стіни

«Холодна» пляма на тепловому зображенні стелі на рис. Б.82 вказує на область з підвищеною вологістю.



Рисунок Б.82 – Термограма вологої ділянки стелі

На рис. Б.83 показано, як холодне повітря просочується під вхідними дверима і залишає розмитий неоднорідний слід на тепловому зображенні підлоги.

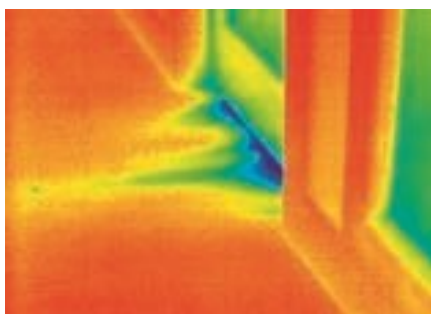


Рисунок Б.83 – Термограма витоків холодного повітря

НОТАТКИ

Навчальне видання

МАХОТІЛО Костянтин Володимирович

ЛИСЕНКО Людмила Іванівна

БУЛГАКОВ Олексій Віталійович

ОСНОВИ ТЕРМОГРАФІЇ

Навчальний посібник

для студентів спеціальностей

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

та 144 «Теплоенергетика»

Відповідальний за випуск *проф. Лазуренко О. П.*

Роботу до видання рекомендував *проф. Любарський Б. Г.*

Редактор *О. І. Шпільова*

План 2021 р., поз. 3

Підп. до друку 29.06.2021. Формат 60 x 84 / 16.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 5,25.
Друк цифровий. Наклад 30 прим. Зам. №13/06/21.

Видавець та виготовлювач: ФОП Панов А.М.
Свідоцтво серії ДК № 4847 від 06.02.2015 р.
м. Харків, вул. Жон Мироносиць, 10, оф. 6,
тел.: +38(057)714-06-74, +38(050)976-32-87
copy@vlavke.com