



Оборський Г. О.,  
Левинський О. С.,  
Голофєєва М. О.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИПРОМІНЮВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ МАТЕРІАЛІВ НА ТОЧНІСТЬ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ

*Точність технічної оцінки стану будівельних конструкцій та енергетичного обладнання визначається метрологічними характеристиками засобів контролю, зокрема приладами інфрачервоної техніки. З метою підвищення точності вимірювання проведений аналіз факторів, що впливають на невизначеність вимірювання. Досліджено вплив випромінювальної здатності різних матеріалів на точність вимірювання температури за допомогою безконтактного методу.*

**Ключові слова:** тепловізійний контроль, випромінювальна здатність матеріалів, невизначеність вимірювання.

### 1. Вступ

В наш час проблема енергозбереження в Україні є надзвичайно актуальною. Тому температура як кількісний показник внутрішньої енергії тіл являється універсальною характеристикою об'єктів та процесів фізичного світу, в якому безперервно відбувається генерація, перетворення, передача, накоплення та використання енергії в різних її формах.

Промислова діяльність супроводжується незворотними втратами теплової енергії, тому очевидно, що аналіз теплових процесів (температурних полів, втрат тепла і т. п.) дозволяє отримати різноманітну інформацію щодо стану об'єктів та протікання фізичних процесів в природі, енергетиці, будівництві, промисловості [1].

Найбільш простий і швидкий спосіб оцінки теплових втрат полягає в застосуванні тепловізора, що сприймає теплове випромінювання об'єктів, розподіл температур в різних точках, їх різницю. До того ж, контроль температурних характеристик обладнання (поряд з іншими параметрами) дозволяє управляти технічним станом обладнання на основі даних моніторингу, ранньої діагностики дефектів і прогнозу їх розвитку, що обґрунтовує актуальність проведеного дослідження.

### 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Проблемі тепловізійного контролю присвячена велика кількість робіт. Сучасна школа дослідників у галузі термодіагностики представлена такими вченими, як: О. Н. Будаїн, А. І. Потапов, В. І. Калганов, В. В. Клюєв, В. Н. Феліно, В. П. Вавилов, А. Г. Климов, Т. Є. Троїцький-Марков, М. І. Щербаков, С. А. Бажанов, А. В. Крюков та ін.

Серед зарубіжних авторів, які зробили істотний внесок в практичну термографію останніх десятиліть, слід зазначити В. Petersson, J. Hart, S. Kimothi, E. Grinzato та багато інших. Всі вони відзначають переваги безконтактного методу вимірювання за допомогою тепловізора,

серед яких можна відзначити високу продуктивність та інформативність, безконтактність та дистанційність випробувань (в межах прямої видимості), мобільність апаратури, швидкість проведення обстеження, незалежність від розмірів об'єкта контролю, створення архівів термограм, екологічна безпечність, відсутність необхідності виведення об'єкта контролю з експлуатації, що забезпечує значне зниження витрат [2–5].

При проведенні тепловізійного обстеження (контролю) слід звернути увагу на виникаючі похибки, які впливають на результат вимірювання [6]. Істотними є: — інструментальна похибка, яка пов'язана з конструкцією вимірювального приладу та визначається властивостями оптичної системи, інерційністю приймача випромінювання, а також роздільною здатністю тепловізійної системи при наявності різких температурних градієнтів на поверхні об'єкту; — методична похибка, що виникає безпосередньо при самих дослідженнях та пов'язана з обмеженою точністю застосовуваних у розрахунках фізичних констант (випромінювальна здатність, метеорологічні умови, атмосферні опади і т. д.).

Основним питанням, яке виникає при розрахунках температур за результатами тепловізійних вимірювань, є невизначеність в завданні випромінювальної здатності поверхні досліджуваних об'єктів.

### 3. Об'єкт, мета та задачі дослідження

*Об'єкт дослідження* — тепловізійний метод контролю. *Метою роботи* являється дослідження впливу випромінювальної здатності матеріалів на точність тепловізійного методу контролю.

Для реалізації поставленої мети в роботі визначено наступні задачі:

1. Провести аналіз істотних факторів, що впливають на точність вимірювання температури при інфрачервоному обстеженні.
2. Визначити вплив випромінювальної здатності різних матеріалів на кінцевий результат вимірювання температури.

3. Встановити порядок розрахунку невизначеності вимірювань температури, що викликана помилкою в задані коефіцієнта випромінювальної здатності.

#### 4. Дослідження впливу випромінювальної здатності матеріалів на точність тепловізійного методу контролю

Випромінювальна здатність — це міра кількості енергії випромінювання, що випускається певною поверхнею, в порівнянні з енергією, що випромінюється абсолютно чорним тілом при тій же температурі. Вона характеризується коефіцієнтом випромінювання поверхні (ступінь чорноти), значення якого для поверхні кожного конкретного об'єкта є індивідуальним і залежить від ряду факторів, таких як: довжина хвилі, кут випромінювання, матеріал і т. п.

Зазвичай коефіцієнт випромінювання залежить від матеріалу і стану обробки поверхні. Оскільки об'єкт може включати в себе декілька компонентів з різнорідних матеріалів, поверхні яких можуть бути пофарбовані, мати різну ступінь обробки, тобто різні коефіцієнти випромінювання, при інфрачервоному контролі можуть виникнути достатньо великі помилки вимірювання [7, 8].

Для ілюстрації впливу випромінювальної здатності на точність вимірювання температури був проведений експеримент. На рис. 1 наведена термограма циліндричної оцинкованої ємності заповненої водою, що отримана за допомогою тепловізора Fluke Ti9. Ємність та вода в ній мали однакову температуру, що було встановлено за допомогою вимірювання термопарою. В той же час термограма показує, що температура поверхні ємності відрізняється майже на 20 °С від температури на поверхні води. Тобто відносна похибка вимірювання складає майже 30 % і є неприпустимою. Різноманітне забарвлення ділянок ємності пов'язане з різним станом поверхні, що також впливає на коефіцієнт випромінювальної спроможності [9].

Наведена термограма демонструє, на скільки дійсно може вплинути неправильний вибір випромінювальної здатності матеріалу на результат вимірювання.

При відсутності інформації про стан поверхні, при проведенні вимірювань величину коефіцієнта випромінювання контрольованої поверхні встановлюють рівною  $\epsilon = 0,9$  [7].

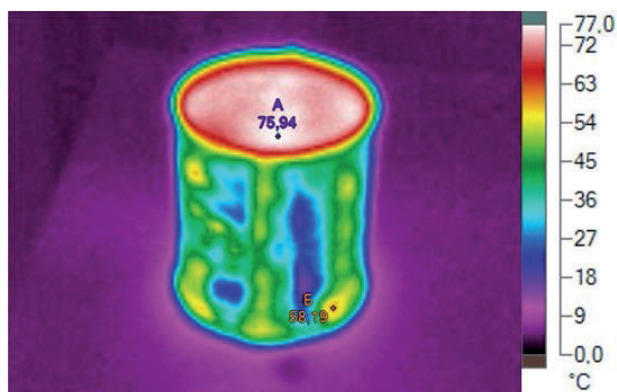


Рис. 1. Термограма оцинкованої ємності, що заповнена водою

Фактична температура об'єкта контролю пов'язана з коефіцієнтом випромінювальної спроможності матеріалу співвідношенням [10]:

$$T_{\text{факт}} = \frac{T_{\text{рад}}}{\sqrt[4]{\epsilon}}, \quad (1)$$

де  $T_{\text{факт}}$  — фактична температура об'єкта контролю;  $T_{\text{рад}}$  — радіаційна температура, що сприймається тепловізором;  $\epsilon$  — коефіцієнт випромінювальної спроможності матеріалу об'єкта контролю.

Наявність випадкової і невиключеної систематичної складової похибки результату вимірювання призводить до того, що останній може бути дуже близьким до значення вимірюваної величини, проте не викликати при цьому відповідного рівня довіри. Саме тому для оцінки якості результату вимірювання зазвичай спираються не на похибку, а на її імовірнісні характеристики, що ґрунтуються не стільки на фактичному значенні вимірюваної величини, скільки на спостережуваному (оціненому) розсіюванні результату вимірювання [11].

Оцінка імовірнісних параметрів розсіювання результату вимірювання, що характеризує сумнів щодо достовірності результату вимірювання, називається невизначеністю вимірювання.

Розглянемо складові невизначеності вимірювання при тепловізійному контролі. Правила для оцінювання і вираження невизначеності для широкого кола вимірювань викладені в [12]. Такий підхід включає оцінку невизначеності:

- за типом *A* — з використанням методів математичної статистики для обробки отриманих результатів вимірювань;
- за типом *B* — іншими методами, в тому числі на основі використання інформації з нормативних документів.

Сумарну невизначеність  $u_C$  розраховано за формулою [13]:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \quad (2)$$

де  $u_A$  — невизначеність за типом *A*;  $u_B$  — невизначеність за типом *B*.

Перша група помилок (для оцінювання невизначеностей за типом *A*) — похибки, що пов'язані такими факторами, як вплив сонячної радіації, кут спостереження, швидкість вітру та ін. З теорії вимірювань відомо, що вплив випадкової помилки на результат вимірювань зменшується зі збільшенням числа вимірювань. На практиці для отримання задовільного значення похибки при найменших витратах достатньо виконати 5 (рідше 7) вимірювань в точці контролю [14].

Друга група помилок (для оцінювання невизначеності за типом *B*) пов'язана з такими факторами, як наявність магнітних полів, помилки у виборі коефіцієнту випромінювальної здатності, роздільна здатність, поля спостереження, теплової інерції, метеорологічні умови, вплив зовнішнього фону та ін.

Розглянемо складову невизначеності вимірювання температури тепловізором, що викликана помилкою в заданні коефіцієнта випромінювальної здатності.

Стандартну невизначеність вимірювання за типом  $B$  розрахуємо за формулою:

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u_B^2(x_i)}, \quad (3)$$

де  $\left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)$  – частинні похідні функції  $f$  за аргументами  $x_i$ .

Враховуючи (1), взявши часткові похідні, отримуємо:

$$u_{BT} = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \cdot u_{BT\text{рад}}^2 + \frac{T_{\text{рад}}^2}{16\sqrt{\epsilon^5}} \cdot u_{B\epsilon}^2}, \quad (4)$$

де  $u_{BT\text{рад}}$  – невизначеність вимірювання тепловізором;  $u_{B\epsilon}$  – невизначеність встановлення коефіцієнту випромінювальної здатності.

Розширену невизначеність  $u_p$  для рівня довіри  $P$ , де  $P = 0,95$ , представимо у вигляді:

$$u_{0,95} = k \cdot u_C, \quad (5)$$

де  $k$  – коефіцієнт охоплення, який залежить від рівня довіри  $P$  та числа ступенів свободи  $\nu_{\text{eff}}$ , яке визначено за формулою:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_C^4}{\sum_{i=1}^m \frac{u^A(x_i)}{\nu_i} \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^4}, \quad (6)$$

причому  $\nu_i = n_i - 1$  – для невизначеностей за типом  $A$ ;  $\nu_i = \infty$  – для невизначеностей за типом  $B$ .

## 5. Обговорення результатів дослідження впливу випромінювальної здатності матеріалів на точність вимірювання температури

Як показали результати досліджень, при визначенні фактичної температури об'єкта безконтактним методом необхідно враховувати коефіцієнт випромінювальної здатності матеріалу. Складова невизначеності вимірювань, яка викликана помилками в завданні цього коефіцієнту, може сягати 30 %, що, звичайно, є неприпустимим. Тому можна стверджувати, що результати дослідження дають змогу суттєво підвищити точність вимірювання температури за допомогою приладів інфрачервоної техніки.

Невирішеним лишається питання впливу якості поверхні об'єкта дослідження (наприклад, різна шорсткість поверхонь) на коефіцієнт випромінювальної здатності, а відповідно, і на точність вимірювання температури. Ця проблема потребує окремого дослідження.

Слід відмітити важливий характер проведених досліджень, оскільки в наш час безконтактний метод вимірювання температури використовується майже у всіх галузях промисловості, що викликано:

- можливістю уникнення пошкодження засобів вимірювання при контролі високих температур;
- вимірювання температури без відключення об'єкта від техпроцесу;
- проведення вимірювання температури рухомих об'єктів;
- забезпечення безпеки персоналу.

Завдяки точному визначенню температури вдається контролювати та управляти різними процесами, наприклад, в ливарному виробництві.

## 6. Висновки

У результаті проведених досліджень:

1. Виявлено, що помилки у встановленні коефіцієнту випромінювальної здатності суттєво впливають на точність безконтактного методу вимірювання температури. Для дослідження характеристик точності метода вимірювання використано міжнародний підхід, що включає єдині в міжнародній практиці правила вираження невизначеностей та їх підсумовування.
2. Встановлено, що існують дві групи причин, які призводять до помилок при вимірюваннях температури за допомогою тепловізора. До першої групи причин відносяться вплив сонячної радіації, кут спостереження, швидкість вітру та ін. Друга група помилок пов'язана з такими факторами, як наявність магнітних полів, помилки у виборі коефіцієнту випромінювальної здатності, роздільна здатність, поля спостереження, теплова інерція, метеорологічні умови, вплив зовнішнього фону та ін.
3. Приведений порядок розрахунку невизначеності вимірювання температури тепловізійним методом, що викликана помилкою в завданні коефіцієнта випромінювальної здатності.

## Література

1. Вавилов, В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль [Текст] / В. П. Вавилов. – М.: ИД Спектр, 2009. – 544 с.
2. Rao, D. S. P. Infrared thermography and its applications in civil engineering [Text] / D. S. P. Rao // The Indian Concrete Journal. – May 2008. – P. 41–50.
3. Metrology in Industry: The Key for Quality [Text] / French College of Metrology. – Wiley-ISTE, 2006. – 270 p. doi:10.1002/9780470612125
4. Kimothi, S. K. The Uncertainty of Measurements: Physical and Chemical Metrology and Analysis [Text] / S. K. Kimothi. – ASQ Quality Press, 2002. – 416 p.
5. Valancius, K. Transient heat conduction process in the multilayer wall under the influence of solar radiation [Text]: Proceedings / K. Valancius, A. Skrinska // Improving human potential program. – Almeria, Spain: PSA, 2002. – P. 179–185.
6. Голофеева, М. А. Составление бюджета неопределенностей при ультразвуковом методе контроля качества изделий из синтетрана [Текст] / М. А. Голофеева, В. М. Тонконогий, В. А. Балан // Праці Одеського політехнічного університету. – 2013. – № 3(42). – С. 28–32.
7. Госсорг, Ж. Инфракрасная термография. Основы. Техника. Применение [Текст] / Ж. Госсорг. – М.: Мир, 1988. – 416 с.
8. Введение в термографию [Текст] / American Technical Publishers, Inc., Fluke Corporation, и The Snell Group. – Россия, 2009. – Режим доступа: \www/URL: http://www.thermview.ru/pdf/flukeguide.pdf. – 10.02.2016.
9. Брамсон, М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел [Текст] / М. А. Брамсон. – М.: Наука, 1965. – Т. 1. – 224 с.
10. Методы тепловизионного контроля подвижного состава [Электронный ресурс] // BALTECH. – Режим доступа: \www/URL: http://teplovizor-tr.ru/methodi-teplovizionnogo-kontrolya-lokomotivov.htm. – 15.02.2016.

11. РМГ 43-2001 ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений» [Текст]. — Введ. 2003-01-07. — Минск: ИПК Изд-во стандартов, 2002. — 20 с.
12. Golofeyeva, M. O. The uncertainties calculation of acoustic method for measurement of dissipative properties of heterogeneous non-metallic materials [Text] / M. O. Golofeyeva, V. M. Tonkonogy, Yu. M. Golofeyev // Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi. — 2015. — № 3(47). — P. 104–110. doi:10.15276/opu.3.47.2015.15
13. Захаров, И. П. Теория неопределенности в измерениях [Текст]: учеб. пособие / И. П. Захаров, В. Д. Кукуш. — Х.: Консум, 2002. — 256 с.
14. Оборський, Г. О. Вимірювання неелектричних величин [Текст]: підручник / Г. О. Оборський, П. Т. Слободяник. — К.: Наука і техніка, 2005. — 200 с.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИЗЛУЧАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МАТЕРИАЛОВ НА ТОЧНОСТЬ ТЕПЛОВИЗИОННОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ

Точность технической оценки состояния строительных конструкций и энергетического оборудования определяется метрологическими характеристиками средств контроля, в частности приборами инфракрасной техники. С целью повышения точности измерения проведен анализ факторов, влияющих на неопределенность измерения. Исследовано влияние излучательной способности различных материалов на точность измерения температуры с помощью бесконтактного метода.

**Ключевые слова:** тепловизионный контроль, излучательная способность материалов, неопределенность измерений.

*Оборський Геннадій Олександрович, доктор технічних наук, професор, кафедра металорізальних верстатів, метрології та сертифікації, Одеський національний політехнічний університет, Україна.*

*Левинський Олександр Сергійович, аспірант, кафедра металорізальних верстатів, метрології та сертифікації, Одеський національний політехнічний університет, Україна, e-mail: Levinskiy.a.s@gmail.com.*

*Голофеева Марина Олександрівна, кандидат технічних наук, кафедра металорізальних верстатів, метрології та сертифікації, Одеський національний політехнічний університет, Україна.*

*Оборский Геннадий Александрович, доктор технических наук, профессор, кафедра металлорежущих станков, метрологии и сертификации, Одесский национальный политехнический университет, Украина.*

*Левинский Александр Сергеевич, аспирант, кафедра металлорежущих станков, метрологии и сертификации, Одесский национальный политехнический университет, Украина.*

*Голофеева Марина Александровна, кандидат технических наук, кафедра металлорежущих станков, метрологии и сертификации, Одесский национальный политехнический университет, Украина.*

*Oborsky Gennady, Odessa National Polytechnic University, Ukraine.*

*Levinskiy Aleksandr, Odessa National Polytechnic University, Ukraine, e-mail: Levinskiy.a.s@gmail.com.*

*Golofeyeva Maryna, Odessa National Polytechnic University, Ukraine*

УДК 519.2

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.66674

Онищенко С. П.,  
Арабаджи Е. С.

## РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТОВ УПРАВЛЕНИЯ ВРЕМЕНЕМ В РАМКАХ ПЛАНИРОВАНИЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММЫ РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

В статье предложены инструменты управления временем в рамках планирования реализации для двух категорий программ развития. Для программ с технологической зависимостью проектов предлагается использовать сетевой график, структурной единицей которого является проект или работа в зависимости от специфики программы. Для программ без технологической зависимости проектов разработана экономико-математическая модель расстановки проектов по периодам программы.

**Ключевые слова:** программа, планирование реализации, модель, сетевой график, эффект синергизма.

### 1. Введение

Программа — один из основных объектов методологии управления проектами. Как известно, программа объединяет группы проектов, цель которых — достижение миссии программы [1]. Такое определение характеризует программу как одноцелевой мультипроект, в отличие от многоцелевого портфеля проектов со свойством приоритетности. Программы развития предприятия, как правило, включают в себя проекты различной направленности:

коммерческие, организационные, социальные, научно-исследовательские, что позволяет охватить процессами развития различные аспекты деятельности предприятия. Достижение цели развития предприятия посредством программы обеспечивается при реализации всех ее проектов. Согласно [2], выполнение отдельного проекта в составе программы может не давать ощутимого результата, в то время как осуществление всей программы обеспечивает максимальную эффективность.