

**ВПЛИВ КУТА СПОСТЕРЕЖЕННЯ НА ТОЧНІСТЬ  
ТЕПЛОВІЗІЙНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ**

*Анотація* – В статті досліджується проблема аналізу теплових процесів за допомогою безконтактного методу вимірювання при використанні приладів інфрачервоної техніки. Основним питанням, яке виникає при розрахунках температур за результатами тепловізійних вимірювань є невизначеність в завданні випромінювальної здатності поверхні досліджуваних об'єктів, яка характеризується коефіцієнтом випромінювання поверхні, значення якого для поверхні кожного конкретного об'єкта є індивідуальним, і залежить від матеріалу і стану обробки поверхні та кута спостереження. Враховуючи, що об'єкти контролю звичайно мають складну форму, дослідження впливу кута спостереження на точність безконтактного методу вимірювання температури є доволі актуальним.

*Ключові слова:* тепловізійний метод вимірювання; коефіцієнт випромінювання поверхні; кут спостереження невизначеність вимірювання.

O.S. LEVYNSKY, M.O. HOLOFYEYeva, YU.I. BABYCH  
Odessa National Polytechnic University

**THE INFLUENCE OF THE ANGLE OF THE OBSERVATION  
ON ACCURACY OF THERMAL MEASUREMENT METHOD**

*Abstract* – In the article the problem of analyzing the thermal processes using non-contact method of measuring using infrared technology are investigated.

The main issue that arises in the calculation of the temperature on the results of thermal imaging measurement is uncertainty in the setting of the emissivity of the surface of the object, which is characterized surface emission coefficient, whose value for the surface of each individual object is individual and depends on the material and surface treatment condition and the angle of observation. By changing the angle of observation in a wide range, the factor of the emission metals and dielectrics changing several times which significantly affects the accuracy of thermal measurement method. The dependences for the calculation of the impact viewing angle on the emissivity materials are obtained

Given that the control objects usually have a complex shape, the studying of the impact of viewing angle for accuracy non-contact temperature measurement method is quite important.

*Keywords:* Thermal measurement method; factor of the emission of the surface; angle of the observation, uncertainty of the measurement.

**Вступ**

Температура, як кількісний показник внутрішньої енергії тіл, є універсальною характеристикою об'єктів та процесів фізичного світу, в якому безперервно відбувається генерація, перетворення, передача, накопичення та використання енергії в різних її формах. Тому для діагностики стану об'єктів та протікання фізичних процесів в природі, енергетиці, будівництві, промисловості перспективним є використання зв'язку цієї фізичної величини з контрольованими параметрами об'єктів дослідження [1]. Одним з найбільш зручних методів вимірювання температури є безконтактний метод з використанням приладів інфрачервоної техніки, наприклад тепловізорів, що дозволяють не тільки вимірювати значення температури, але і встановити її розподіл поверхнею об'єкта.

**Об'єкт дослідження** – процеси діагностики стану об'єктів та протікання фізичних процесів в природі, енергетиці, будівництві, промисловості

**Предмет дослідження** – безконтактний метод з використанням приладів інфрачервоної техніки.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Дослідженню проблеми аналізу теплових процесів присвячена велика кількість робіт. Серед авторів, які зробили істотний внесок у вирішення задач термографії, можна зазначити О. Н. Будадіна, Б. Петерсона, А. І. Потапова, В. І. Калганова, В. В. Ключова, В. Н. Феліно, Дж. Харта, В. П. Вавилова, А. Г. Климова, Т. С. Троїцького-Маркова, М. І. Щербакова, С. А. Бажанова, А. В. Крюкова, С. Кимоті, Е. Гринзато, Ж. Госсорга та багато інших. У роботах цих авторів відзначають такі переваги тепловізійного методу вимірювання, як висока продуктивність та інформативність, безконтактність та дистанційність вимірювань (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 [3–6].

**Результати досліджень**

При проведенні досліджень за допомогою приладів інфрачервоної техніки суттєве значення має виявлення та усунення систематичних та випадкових помилок, що здійснюють вплив на результат вимірювання та характеризують сумнів щодо достовірності результату вимірювання [7]. Істотними є:

- інструментальна похибка, яка визначається властивостями оптичної системи, інерційністю приймача випромінювання, а також роздільною здатністю тепловізійної системи при наявності різких температурних градієнтів на поверхні об'єкта.

- 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 [2]. Методологія застосування невизначеності вимірювань для оцінки якості вимірювань викладена в [8], де формально встановлено загальні правила для оцінювання і вираження невизначеності для широкого кола вимірювань. Такий підхід включає оцінку невизначеності:

- за типом А - з використанням методів математичної статистики для обробки отриманих результатів вимірювань;  
- за типом В - іншими методами, в тому числі на основі використання інформації з нормативних документів. До цього типу і відноситься невизначеність в завданні випромінювальної здатності поверхні досліджуваних об'єктів.

Випромінювальна здатність характеризується коефіцієнтом випромінювання поверхні, значення якого для поверхні кожного конкретного об'єкта є індивідуальним, і залежить від матеріалу і стану обробки поверхні. У тому випадку, коли коефіцієнт випромінювання об'єкта контролю відомий, його фактична температура може бути розрахована за формулою [7]:

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

де  $T_{\text{факт}}$  – фактична температура об'єкта контролю;  
 $T_{\text{рад}}$  – радіаційна температура, що сприймається тепловим зором;  
 $\varepsilon$  – коефіцієнт випромінювальної спроможності матеріалу об'єкта контролю.  
Стандартну невизначеність вимірювання за типом В розраховуємо за формулою:

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

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

Тоді, враховуючи (1), складову невизначеності вимірювання температури тепловізором, що викликана помилкою в завданні коефіцієнта випромінювальної здатності можна розрахувати за формулою [2]:

$$u_{BT} = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \cdot u_{BT_{\text{рад}}}^2 + \frac{T_{\text{рад}}^2}{16\sqrt{\varepsilon}^5} \cdot u_{B\varepsilon}^2}, \quad (3)$$

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

Результати досліджень показали, що складова невизначеності вимірювань, яка викликана помилками в завданні коефіцієнту випромінювальної здатності, може сягати 30 %, що, звичайно, є неприпустимим. Тому врахування відхилення дійсного значення коефіцієнту випромінювальної здатності поверхні об'єкта дослідження від номінального дають змогу підвищити точність вимірювання температури за допомогою приладів інфрачервоної техніки.

Доволі частою причиною відхилення фактичного значення коефіцієнта випромінювальної здатності від заданого є помилково обраний кут спостереження поверхні об'єкта контролю, що суттєво впливає на досліджуваний коефіцієнт. Така властивість є наслідком відбиття хвиль на границі розділу двох різноманітних середовищ та призводить до необхідності проведення термографії поверхні об'єкта контролю з різних ракурсів та збільшенню часу необхідного на проведення досліджень. Враховуючи, що об'єкти контролю звичайно мають складну форму, дослідження впливу кута спостереження на точність безконтактного метода вимірювання температури є доволі актуальним.

Для металів коефіцієнт випромінювальної здатності є незмінним в інтервалі кутів спостереження 0...40°, для діелектриків – в інтервалі кутів 0...60°. За межами цих діапазонів коефіцієнт випромінювальної спроможності суттєво змінюється при нахилі спостереження по дотичній [10]. Внаслідок цього, ефективний коефіцієнт випромінювання неплоских поверхонь є різним в різноманітних точках поверхні.

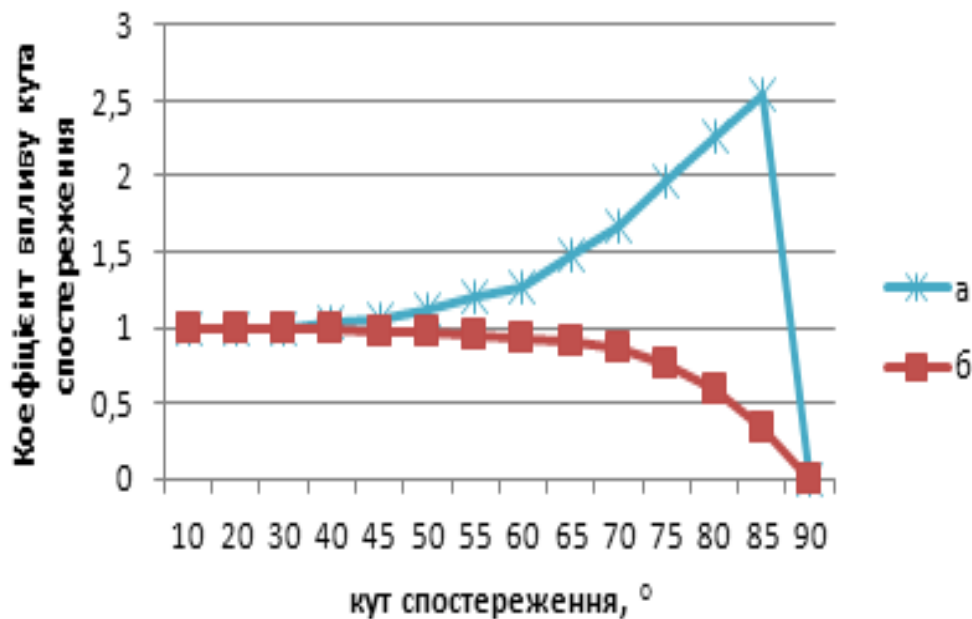
Фактичне значення коефіцієнту випромінювальної здатності може бути розраховане за формулою:

$$\varepsilon_{\text{факт}} = \frac{\varepsilon_{\text{вим}}}{K_{\text{кут}}}, \quad (4)$$

де  $\varepsilon_{\text{факт}}$  – фактичне значення коефіцієнту випромінювальної здатності;  
 $\varepsilon_{\text{вим}}$  – виміряне значення коефіцієнту випромінювальної здатності;

$K_{\text{кут}}$  – коефіцієнт впливу кута спостереження.

На рис.1 показано залежність значення коефіцієнту  $K_{\text{кут}}$  від кута спостереження.



а – метали; б – діелектрики

Рис. 1. Коефіцієнт  $K_{\text{кут}}$ , як функція кута спостереження

Аналізуючи результати залежності, представлені на рис. 1, видно, що при зміні кута спостереження в широкому діапазоні, коефіцієнт випромінювальної спроможності, як металів, так і діелектриків, змінюється в декілька разів, що суттєво впливає на точність тепловізійного методу вимірювання.

В результаті аналізу були отримані залежності коефіцієнта  $K_{\text{кут}}$  від кута спостереження. Для металів така залежність найбільш точно описується формулою:

$$K_{\text{кут}} = \begin{cases} 0,0164\phi^2 - 0,1067\phi + 1,1464, & 0 \leq \phi \leq 85 \\ -2,53\phi + 5,06, & 85 \leq \phi \leq 90 \end{cases} \quad (5)$$

де  $\phi$  – кут спостереження.

Для діелектриків залежність  $K_{\text{кут}}$  від кута спостереження найбільш точно описується формулою:

$$K_{\text{кут}} = -0,0014 \cdot \phi^3 + 0,022 \cdot \phi^2 - 0,1 \cdot \phi + 1,1. \quad (6)$$

#### Висновки

Показано, що складова невизначеності вимірювань, яка викликана помилками в завданні коефіцієнту випромінювальної здатності, може сягати 30 %, що, звичайно, є неприпустимим. Для дослідження характеристик точності методу вимірювання використано міжнародний підхід, що включає єдині в міжнародній практиці правила вираження невизначеностей та їх підсумовування. При зміні кута спостереження в широкому діапазоні, коефіцієнт випромінювальної спроможності, як металів, так і діелектриків, змінюється в декілька разів, що суттєво впливає на точність тепловізійного методу вимірювання. Отримані залежності коефіцієнта  $K_{\text{кут}}$  від кута спостереження для металів та діелектриків. Врахування залежності коефіцієнту випромінювальної здатності від кута спостереження при вимірюваннях температури за допомогою приладів інфрачервоної техніки надасть можливість не тільки підвищити точність, але й значно скоротити час проведення вимірювань за рахунок зменшення кількості необхідних ракурсів зйомки об'єкта контролю.

#### Література

1. Вавилов, В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В.П. Вавилов. – М. : ИД Спектр, 2009 – 544 с.
2. Оборський Г.О. Дослідження впливу випромінювальної здатності матеріалів на точність тепловізійного методу контролю / Г.О. Оборський, О.С. Левинський, М.О. Голофеева // Технологический аудит и резервы производства - №2/3(28), 2016. – С. 4-7.
3. D.S. Prakash Rao Infrared thermography and its applications in civil engineering/ D.S. Prakash Rao // The Indian ConCreTe Journal. –May 2008–P.41–50
4. College francais de metrologie // Metrology in Industry. – Packo, Dominique, French college of

Metrology, 2006. – 70 p.

5. S. Kimothi The Uncertainty of Measurements: Physical and Chemical Metrology: Impact and Analysis. – 2002 – 416 p.

6. K. Valancius Transient heat conduction process in multilayer wall under the influence of solar radiation // Improving human potential program / Proceedings, 2002, Almeria, Spain: PSA. – p. 179 – 185

7. Енюшин В.Н. О влиянии излучательной способности поверхности исследуемого объекта на точность измерения температур при тепловизионном обследовании / В.Н. Енюшин, Д.В. Крайнов // Известия КТАСУ – №1(23), 2013. – С. 99-103.

8. РМГ 43-2001 ГСИ. Применение “Руководства по выражению неопределенности измерений”. – Минск: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 20 с.

9. Golofeyeva M.O. The uncertainties calculation of acoustic method for measurement of dissipative properties of heterogeneous non-metallic materials / M.O. Golofeyeva, V.M. Tonkonog, Yu.M. Golofeyev // Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi. – №3(47). – 2015 – P. 104-110.

10. Госсорг, Ж. Инфракрасная термография. Основы. Техника. Применение / Ж. Госсорг. – М.: Мир, 1988 – 416 с.

#### References

1. Инфракрасная термография I teplovoy control' / V.P. Vavilov. – М.: ID Spektr, 2009 – 544 s.
2. Doslidzhennya vplyvu vyprominyval'noi zdatsnosti materialiv na tochnist' teplovizyynogo metodu kontroliu / G.O. Obors'ky, O.S. Levynsky, M.O. Holofeyeva // Tehnologicheskyy audit I rezervy proizvodstva - №2/3(28), 2016. – S. 4-7.
3. D.S. Prakash Rao Infrared thermography and its applications in civil engineering/ D.S. Prakash Rao // The Indian ConCreTe Journal. – May 2008 – P.41–50
4. College francais de metrologie // Metrology in Industry. – Packo, Dominique, French college of Metrology, 2006. – 70 p.
5. S. Kimothi The Uncertainty of Measurements: Physical and Chemical Metrology: Impact and Analysis. – 2002 – 416 p.
6. K. Valancius Transient heat conduction process in multilayer wall under the influence of solar radiation // Improving human potential program / Proceedings, 2002, Almeria, Spain: PSA. – p. 179 – 185
7. Eniushyn V.N. O vliyaniy izluchatel'noy sposobnosti poverhnosti issleduemogo ob'ekta na tochnost' izmereniya temperature pri teplovizyonnom issledovanii / V.N. Eniushyn, D.V. Krainov // Izvestiya KTASU – №1(23), 2013. – С. 99-103.
8. РМГ 43-2001 ГСИ. Применение “Руководства по выражению неопределенности измерений”. – Минск: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 20 с.
9. Golofeyeva M.O. The uncertainties calculation of acoustic method for measurement of dissipative properties of heterogeneous non-metallic materials / M.O. Golofeyeva, V.M. Tonkonog, Yu.M. Golofeyev // Odes'kyi Politechnichnyi Universytet. Pratsi. – №3(47). – 2015 – P. 104-110.
10. Gossorg Zh. Инфракрасная термография. Основы. Техника. Применение / Zh. Gossorg. – М.: Мир, 1988 – 416 с.

Рецензія/Peer review : 21.5.2016 р.

Надрукована/Printed : 27.6.2016 р.

Стаття рецензована редакційною колегією