

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ОБ'ЄКТА
ПРИЛАДАМИ ІНФРАЧЕРВОНОЇ ТЕХНІКИ**

Розглянуто питання вимірювання температури за допомогою приладів інфрачервоної техніки. В край актуальним питанням являється дистанційне вимірювання дійсного значення температури при невідомій випромінювальній здатності тіла, що досліджується. Проведено аналіз факторів, що впливають на точність вимірювання температури. Представлено дослідження впливу кута спостереження на коефіцієнт випромінювальної здатності.

Ключові слова: температура, коефіцієнт випромінювальної здатності, похибка вимірювання, тепловізійний контроль, інфрачервона техніка.

O. LEVINSKIY, M. HOLOFIEIEVA
Odessa national polytechnic university, Odessa

EXPERIMENTAL STUDY OF THE OBJECT TEMPERATURE INFRARED IMAGING DEVICES

Abstract - Non-contacting and speed of temperature control by devices that are detected a radiation in the infrared and light range, high resolution, providing detection of local and temporary differences of temperatures on objects of control, visualization of thermal fields are the main advantages of these devices for thermal control. At the edge of the relevant issue is the remote measurement of the actual temperature values for the unknown emissivity of the test body. A significant drawback of contactless optical methods of temperature measurement is the lack of data on the emissivity of real materials in the experiment. This is due to the fact that the object's ability to provide infrared radiation may change thanks to depending on the material, properties of the surface area, angle of observation, and in the case of some materials - temperature. The analysis of factors influencing the accuracy of the temperature measurement is carried out. The influence of the observation angle on the coefficient of radiating power is presented. It is particularly important for objects with complex shapes or hard to reach areas. This makes it possible to reduce the methodological error of the contactless method of the temperature measuring.

It is established that errors in determining the coefficient of radiating ability significantly affect the accuracy of temperature measurement by using the devices of infrared technology. Using thermal imager and auxiliary equipment it was found that with the measurement error is increased with increase of observation angle and may reach 50 %.

The authors conducted a series of experiments confirming the effect of observation angle on accuracy of temperature measurement, and proposed dependencies allowing reducing the value of absolute error of measurement using IR devices to several degrees that in relative form less than 1 %.

Keywords: temperature, emissivity, measurement error, thermal control, infrared technology.

Вступ

Як відомо, у базових галузях промисловості України (металургії, хімічній промисловості, промисловості будівельних матеріалів та машинобудуванні) широко використовуються енергоємні високотемпературні процеси: плавка металів, обробка поверхні металевих деталей та інші. Такі технологічні процеси потребують ретельного дотримання рекомендованих температурних режимів, оскільки регулювання температурного режиму – найбільш важливий і універсальний засіб збільшення швидкості процесу і підвищення виходу готового продукту. Більшість високотемпературних процесів протікають при температурах більше 900 °С [1]. Проте є такі процеси, які протікають при значно нижчих температурах (250 ... 500 °С), але їх відносять до високотемпературних, оскільки температура являється головним фактором інтенсифікації цих процесів для одержання максимального виходу готового продукту з високими техніко-економічними показниками. Тому існує постійний попит на пристрої та методики для безконтактного вимірювання як високих так і відносно низьких температур.

Безконтактність і швидкодія контролю температури приладами, що реєструють випромінювання в інфрачервоному і світловому діапазонах, висока роздільна здатність, що забезпечує виявлення локальних і тимчасових різниць температур на об'єктах контролю, можливості візуалізації теплових полів, є основними перевагами цих приладів в тепловому контролі [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сфера застосування приладів інфрачервоної техніки безперервно розширюється, тому є необхідність підвищувати вимоги до більш точного вимірювання температури. Точне визначення фізичної температури об'єкта по його тепловому ІЧ випромінюванню залежить від багатьох факторів., головним чином недостатньою кількістю інформації коефіцієнту випромінювання поверхні досліджуваного об'єкта.

Вимірювання дійсного значення температури при невідомій випромінювальній здатності являється актуальним, оскільки проводяться вже не одне десятиліття, і не дивлячись на деякий прогрес і успіх в даному напрямлені, задачі, при яких використовується обмежений об'єм інформації про коефіцієнт випромінювальної здатності, залишаються не вирішеними. В даному напрямлені активні роботи та дослідження ведуться як на Україні, так і за кордоном

Зокрема, в роботах [1–3] відзначено проблеми та фактори, що виникають при дистанційному

визначенні температури. Показано, що коефіцієнти випромінювання нагрітих тіл залежать від геометричної форми та орієнтації випромінювальної поверхні, її хімічний склад, фізичний стан, наявність забруднень на поверхні і т. д. При цьому важливо знати фізичний та хімічний стан поверхні в умовах проведення вимірювання, оскільки стан і властивості поверхні змінюється зі зміною температури, що, як правило, супроводжується зміною випромінювальної здатності.

Залежність коефіцієнта випромінювання об'єкта від його температури, що властива деяким речовинам, призводить до того, що повна потужність теплового випромінювання об'єкта залежить від його температури складним чином, що ускладнює безконтактні вимірювання. Певні труднощі викликає різноманіття в ІЧ діапазоні випромінювальних властивостей речовин, що різко відрізняються властивостями один від одного: гази і метали, кераміка і пластика, пил і композиційні матеріали.

В [4, 5] представлені в інфрачервоному діапазоні залежності випромінювальних здатностей ряду речовин від температури та довжини хвилі. Показано, що коефіцієнт випромінювальної здатності більшості металів (діелектриків) збільшується (зменшується) при нагріванні.

Схожі обставини відмічено в роботах [6-8], які відображають основні тенденції сучасної термометрії за випромінюванням і робиться висновок про велику кількість способів визначення коефіцієнту випромінювання або безпосередньо, вимірюючи випромінювання тіла в порівнянні з випромінюванням чорного тіла при однаковій температурі, або опосередковано, вимірюючи коефіцієнти відображення цих тіл. У всіх випадках необхідно враховувати паразитні фактори.

Альтернативний варіант вирішення проблеми представлено в [9], де пропонується вимірювання температури з використанням оптичних приладів та контактних термометрів. Змінюючи значення випромінювальної здатності, добиваються рівності показань між тепловізором та термопарою.

Слід зауважити, що в роботах відмічається велика кількість способів визначення коефіцієнту випромінювальної здатності та які фактори впливають на це, проте в жодній не представлено дослідження впливу кута спостереження на випромінювальну здатність, що сприймається приладами ІЧ-техніки.

Таким чином, результати проведеного аналізу дають змогу зробити висновок, що можливість підвищення точності вимірювання температури шляхом визначення впливу кута спостереження на коефіцієнт випромінювальної здатності, що сприймається приладами ІЧ-техніки являється найменш досліджуваним фактором. Тому виникає необхідність в більш детальному його розгляді.

Об'єкт, мета та задачі дослідження

Об'єктом даного дослідження являється тепловий контроль приладами інфрачервоної техніки.

Метою роботи являється зниження методичної похибки безконтактного методу вимірювання температури на основі дослідженні впливу кута спостереження на коефіцієнт випромінювальної здатності.

Для поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні задачі:

1. Дослідити особливості вимірювання температури за випромінюванням.
2. Проаналізувати проблеми, що зв'язані з випромінювальною здатністю матеріалів.
3. Провести експериментальні дослідження, що підтверджують вплив кута спостереження на коефіцієнт випромінювальної здатності.

Виклад основного матеріалу

Безконтактний метод вимірювання температури знаходить все більш широке застосування у всіх галузях промисловості, проте до теперішнього часу носить допоміжний характер. Безконтактний тепловий метод являється одним із напрямків методу неруйнівного контролю і оснований на вимірюванні температури поверхні об'єкта за допомогою приладів інфрачервоної техніки.

Даний метод широко розповсюджений в зв'язку з рядом переваг перед традиційними методами. По-перше, це висока швидкість, що визначається типом приймача випромінювання, по-друге, можливість контролю об'єкта без застосування контактних методів вимірювання, по-третє, можливість документування та формування інформаційного звіту, по-четверте, використання в автоматичних системах управління в якості ланки зворотного зв'язку.

Суттєвим недоліком безконтактних оптичних методів вимірювання температури є відсутність даних стосовно випромінювальної здатності реальних матеріалів в умовах експерименту [10]. Це пов'язано з тим, що здатність об'єкта виділяти інфрачервоне випромінювання може змінюватися, оскільки, залежить від матеріалу, властивостей поверхні, напрямку спостереження, а також у випадку з деякими матеріалами – від температури.

Для виявлення особливостей зміни коефіцієнту випромінювання з точки зору теплового контролю проводився технологічний аудит, метою якого було визначення впливу кута спостереження на коефіцієнт випромінювальної здатності, що в свою чергу призводить до неточного вимірювання температури.

Дослідження проводилось на базі тепловізора Fluke Ti9 з використанням допоміжного обладнання – штатив, угломір, персональний комп'ютер.

Схема процесу вимірювання представлена на рис. 1.

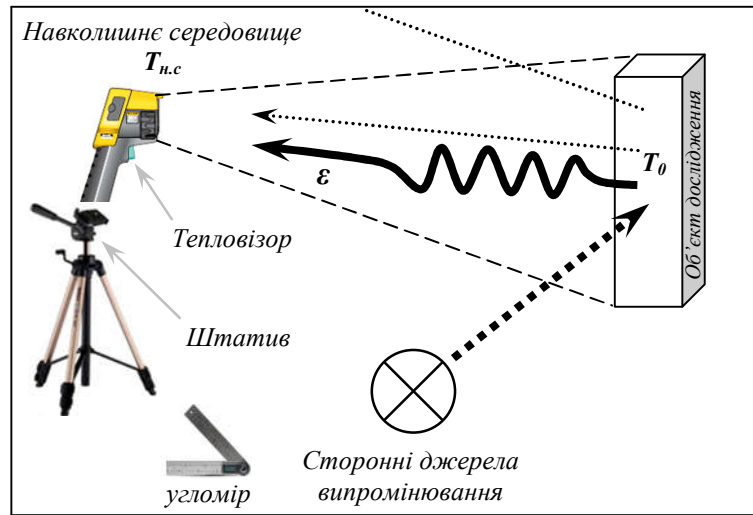


Рис. 1. Схема процесу вимірювання температури з відомим кутом спостереження

Основним направленням даної схеми являється розрахунок температури з урахуванням впливу кута спостереження на коефіцієнт випромінювальної здатності. Це дозволить в практичних умовах підвищити точність визначення температури досліджуваного об'єкту.

Залежність від кута спостереження має різний вид для металів та діелектриків. Якщо для діелектриків в області нормалі до поверхні вона приблизно підкоряється закону Ламберта і має найбільше значення при вимірюванні по нормалі, то вимірювання температури поверхні більшості металів найбільш ефективно проводити під кутом $20 \div 30^\circ$, де коефіцієнт випромінювання максимальний. За межами даних значень, коефіцієнт випромінювання швидко зменшується до нуля при направленні спостереження по дотичній [8].

В наслідок залежності коефіцієнту випромінювання від кута спостереження, ефективний коефіцієнт неплоских поверхонь різний в різних точках, хоча матеріал один і той же, коефіцієнт якого по нормалі – величина постійна.

Фактичне значення коефіцієнту випромінювальної здатності може бути розраховано за формулою:

$$\varepsilon_{\text{факт}} = \frac{\varepsilon_{\text{вим}}}{K_{\text{кут}}}, \quad (1)$$

де $\varepsilon_{\text{факт}}$ – фактичне значення коефіцієнту випромінювальної здатності;
 $\varepsilon_{\text{вим}}$ – вимірюване значення коефіцієнту випромінювальної здатності;
 $K_{\text{кут}}$ – коефіцієнт впливу кута спостереження.

Результати досліджень

При проведенні експерименту були отримані залежності коефіцієнту $K_{\text{кут}}$ від кута спостереження. Для металів така залежність має вигляд:

$$K_{\text{кут}} = \begin{cases} 0.0164\varphi^2 - 0.1067\varphi + 1.1464, & 0 \leq \varphi \leq 85, \\ -2,53\varphi + 5.06, & 85 \leq \varphi \leq 90, \end{cases} \quad (2)$$

де φ – кут спостереження.

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

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

За допомогою приладів інфрачервоної техніки досліджено вплив кута спостереження на точність вимірювання температури деталі зі сталі (рис. 2) та композиційного матеріалу (рис. 3).

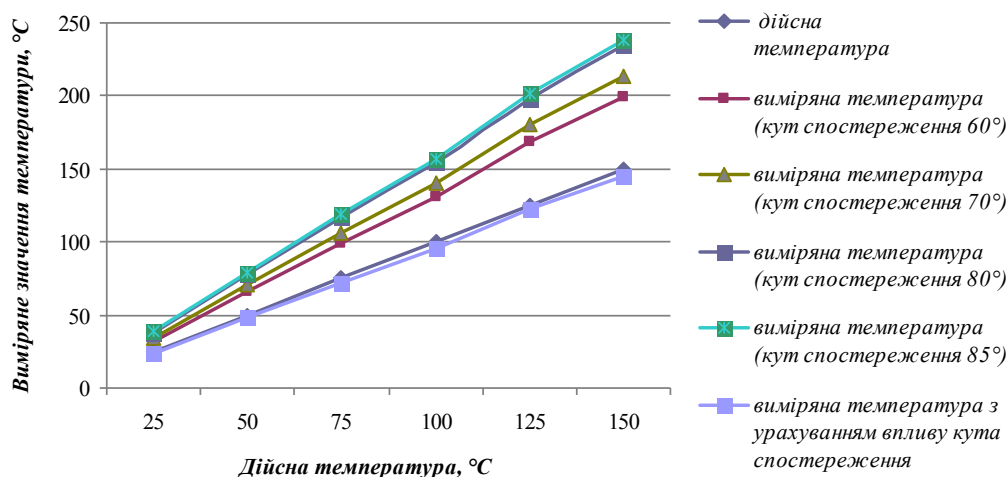


Рис. 2. Вплив кута спостереження на точність вимірювання температури сталі

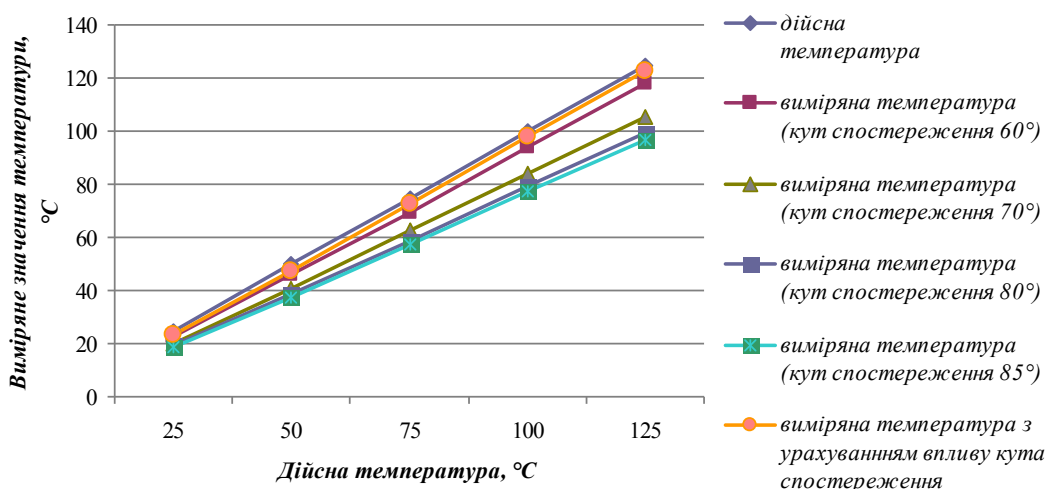


Рис. 3. Вплив кута спостереження на точність вимірювання температури композиційного полімеру

Визначення температури проводилося безпосередньо на реальному об'єкті, формуючи вибірку даних:

- дійсної температури, вимірної контактним термометром;
- температури, що вимірювалася за допомогою тепловізора під різними кутами спостереження;
- визначення температури з урахуванням кута спостереження.

Аналіз отриманих результатів впливу кута спостереження на точність вимірювання температури, що представлені в виді графіків, дають змогу зробити висновок, що зі збільшенням кута спостереження похибка вимірювання збільшується. Відносна похибка вимірювання температури деталі зі сталі при куті спостереження 85° складає 57 %, а для деталі з композиційного матеріалу – 22 %. Таким чином, можна вважати, що таке істотне значення похибки робить вимірювання безглуздими. У той же час, вплив кута спостереження на точність вимірювання дає можливість звести значення абсолютної похибки вимірювання температури за допомогою приладів інфрачервоної техніки до декількох градусів, що у відносній формі не перевищує 1 %.

Висновки

1. Досліджено, що вимірювання температури за випромінюванням являється одним із основних напрямлень розвитку вискоєфективної системи діагностики, яка забезпечує можливість контролю теплового стану об'єкта, виявлення дефектів на ранній стадії їх розвитку, а також мінімізація затрат на технічне обслуговування.

2. Виявлено, що одним із істотних факторів, що впливають на точність вимірювання температури, являється зміна коефіцієнту випромінювання об'єкта, що має істотну кривизну поверхні та неможливість його визначення в важкодоступних місцях. В загальному випадку коефіцієнт випромінювання залежить від виду матеріалу, довжини хвилі, температури, стану поверхні та кута спостереження поверхні об'єкта. Значення коефіцієнта випромінювання в основному приведені в таблицях або представлені в виді графіків, і мають досить значну різницю, що не дає змогу проводити точні вимірювання температури об'єкта.

3. Встановлено, що помилки у встановленні коефіцієнта випромінювальної здатності істотно впливають на точність вимірювання температури за допомогою приладів інфрачервоної техніки. Проведені

дослідження впливу кута спостереження на точність вимірювання температури виробу зі сталі і композиційного полімеру показують, що при зміні кута спостереження, похибки вимірювання температури тепловізором можуть перевищувати 50 %, що робить вимірювання безглуздими. Запропоновано залежності, що дозволяють звести значення абсолютної похибки вимірювання температури за допомогою приладів інфрачервоної техніки до декількох градусів, що у відносній формі не перевищує 1 %.

4. Результати дослідження дозволяють підвищити точність вимірювання температури шляхом урахування впливу кута спостереження на коефіцієнт випромінювальної здатності об'єкта, нормалізувати зображення термограм для різних ділянок об'єкта, а також, виділення можливих дефектних зон на термограмі для визначення рівномірності розподілу теплового поля.

Література

1. Свет, Д. Я. Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре измерения [Текст] / Д. Я. Свет. – М. : Наука, 1968. – 236 с.
2. Оборський, Г. О. Вимірювання неелектричних величин [Текст]: підручник / Г. О. Оборський, П. Т. Слободяник. – К. : Наука і техніка, 2005. – 200 с.
3. Брамсон, М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел [Текст]. Т. 1. / М. А. Брамсон. – М. : Наука, 1965. – 224 с.
4. 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.
5. Minkina, W. Pomiarzy termowizyjne-przyrzdy i metody [Text] / W. Minkina. – Czestochova: Wyd-wa Politechniki Czestochowskiej, 2004. – 243 p.
6. Вавилов, В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль [Текст] / В. П. Вавилов. – М. : ИД Спектр, 2009. – 544 с.
7. Гордов, А. Н. Основы пирометрии [Текст] / А. Н. Гордов. – 2-е изд., доп. и перераб. – М. : Metallurgiya, 1971. – 448 с.
8. Госсорг, Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение [Текст] : пер. с франц. / Ж. Госсорг. – М. : Мир, 1988. – 416 с.
9. Fam, S. S. Ultrasonics thermometry [Text] / S. S. Fam, L. C. Lynnworth, E. H. Carnevale // Instrument and Control System. – 1969. – Vol. 42, № 10. – P. 107–110.
10. Оборський, Г. О. Дослідження впливу випромінювальної здатності матеріалів на точність тепловізійного методу контролю [Текст] / Г. О. Оборський, О. С. Левинський, М. О. Голофеева // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – №2/3(28). – С. 4–7.

Reference

1. Svet, D. YA. Ob'yektivnyye metody vysokotemperaturnoy pirometrii pri nepreryvnom spektre izmereniya [Tekst] / D. YA. Svet. – М. : Nauka, 1968. – 236 s.
2. Obors'kiy, G. O. Vimiryuvannya neyelektrichnikh velichin [Tekst]: pidruchnik / G. O. Obors'kiy, P. T. Slobodyanik. – К. : Nauka i tekhnika, 2005. – 200 s.
3. Bramson, M. A. Infrakrasnoye izlucheniye nagretykh tel [Tekst]. T. 1. / M. A. Bramson. – М. : Nauka, 1965. – 224 s.
4. 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.
5. Minkina, W. Pomiarzy termowizyjne-przyrzdy i metody [Text] / W. Minkina. – Czestochova: Wyd-wa Politechniki Czestochowskiej, 2004. – 243 p.
6. Vavilov, V. P. Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol' [Tekst] / V. P. Vavilov. – М. : ID Spektr, 2009. – 544 s.
7. Gordov, A. N. Osnovy pirometrii [Tekst] / A. N. Gordov. – 2-ye izd., dop. i pererab. – М. : Metallurgiya, 1971. – 448 s.
8. Gossorg, ZH. Infrakrasnaya termografiya. Osnovy, tekhnika, primeneniye [Tekst] : per. s frants. / ZH. Gossorg. – М. : Mir, 1988. – 416 s.
9. Fam, S. S. Ultrasonics thermometry [Text] / S. S. Fam, L. C. Lynnworth, E. H. Carnevale // Instrument and Control System. – 1969. – Vol. 42, № 10. – P. 107–110.
10. Obors'kyu, H. O. Doslidzhennya vplyvu vyprominyval'noyi zdatsnosti materialiv na tochnist' teplovizyynoho metodu kontrolyu [Tekst] / H. O. Obors'kyu, O. S. Levyns'kyu, M. O. Holofeyeva // Tekhnolohycheskyu audyt y rezervy proyzvodstva. – 2016. – №2/3(28). – S. 4–7.

Рецензія/Peer review : 8.1.2018 р. Надрукована/Printed : 9.4.2018 р.

Рецензент :