

УДК 69.058.7

DOI: 10.15587/2312-8372.2017.92869

## ВПЛИВ КУТА СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОВЕРХНІ НА ТОЧНІСТЬ БЕЗКОНТАКТНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

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

### 1. Вступ

Як відомо, у базових галузях промисловості України (металургії, хімічній провислості, 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.

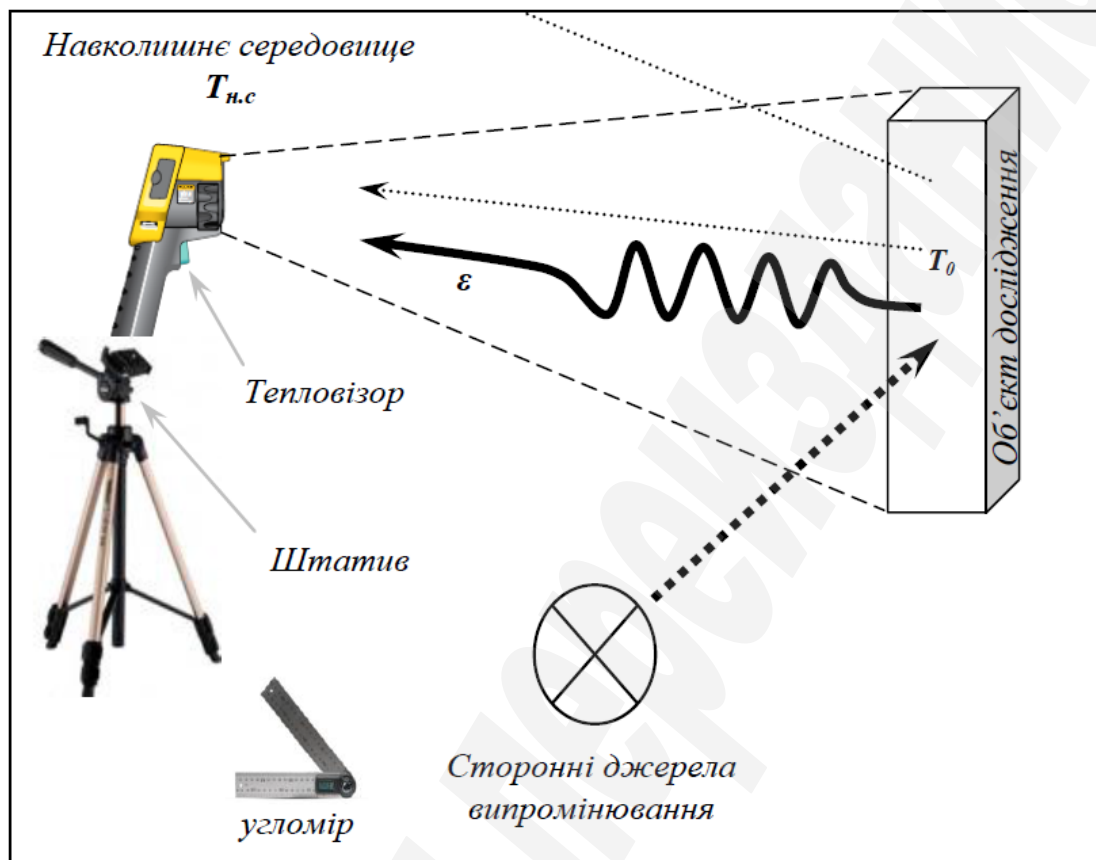
Безконтактність і швидкодія контролю температури приладами, що реєструють випромінювання в інфрачервоному і світловому діапазонах, висока роздільна здатність, що забезпечує виявлення локальних і тимчасових різниць температур на об'єктах контролю, можливості візуалізації теплових полів, є основними перевагами цих приладів в тепловому контролі [2]. Застосування таких приладів вимагає звернути увагу на інструментальну та методичні похибки, які впливають на точність визначення температури.

### 2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом даного дослідження являється тепловий контроль приладами інфрачервоної техніки. Суттєвим недоліком безконтактних оптичних методів вимірювання температури є відсутність даних стосовно випромінювальної здатності реальних матеріалів в умовах експерименту. 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.

### 3. Мета та задачі дослідження

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. Зробити аналіз проблем, що зв'язані з випромінювальною здатністю матеріалів.
3. Провести експериментальні дослідження, що підтверджують вплив кута спостереження на коефіцієнт випромінювальної здатності.

#### 4. Аналіз літературних даних

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 напрямленні, задачі, при яких використовується обмежений об'єм інформації про коефіцієнт випромінювальної здатності, залишаються не вирішеними. В даному напрямленні 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, головним чином недостатньою кількістю інформації коефіцієнту випромінювання поверхні досліджуваного об'єкту. Показано, що коефіцієнти випромінювання нагрітих тіл залежать від багатьох факторів, таких як геометрична форма та орієнтація 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 [4], 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 [5, 6] 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 [7–10], 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 [11–13], 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 представлені 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.

## **5. Матеріали та методи досліджень**

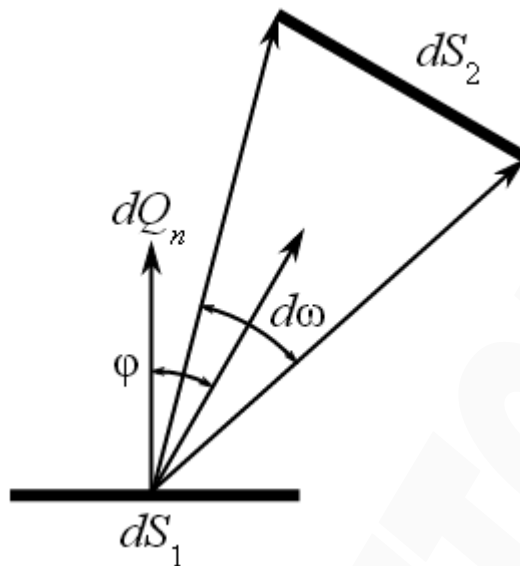
Безконтактний метод вимірювання температури знаходить все більш широке застосування у всіх галузях промисловості, проте до теперішнього часу носить допоміжний характер. Безконтактний тепловий метод являється одним із напрямлень методу неруйнівного контролю і оснований на вимірюванні температури поверхні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

Даний метод широко розповсюджений в зв'язку з рядом переваг перед традиційним методами. По-перше, це висока швидкодія, 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.

Наряду з очевидними перевагами, тепловізійні методи мають також ряд недоліків, до яких можна віднести методичну похибку, яка може сягати десятки відсотків при використанні сучасних приладів ЧІ-техніки [14]. Це призводить до помилок при розшифровці термограм, зникнення діагностичного признаку дефекту на термограмі або, навпаки, відображення неіснуючого дефекту.

Основне питання, яке виникає при розрахунку температур за результатами тепловізійних вимірювань, являється помилка в задані випромінювальної здатності поверхні досліджуємих об'єктів [15]. Дана величина характеризується коефіцієнтом випромінювання – числове значення, що дорівнює відношенню світності або яскравості об'єкта при даних температури і довжині хвилі до світності або яскравості АЧТ при однакових параметрах. Значення коефіцієнту теплового випромінення поверхні кожного конкретного об'єкта являється індивідуальним і залежить від багатьох факторів, зокрема: розміри об'єкта контролю і відстань до нього; стан і тип поверхні об'єкту контролю; шероховатість матеріалу; стан навколишнього середовища, а також кут спостереження.

Як уже відмічалось, коефіцієнт випромінювання залежить не тільки в основному від виду і стану матеріалу, але і від кута, під яким розташований прилад до поверхні досліджуваного об'єкта. Причому залежність від кута спостереження має різний вид для металів та діелектриків. Якщо для діелектриків в області нормалі до поверхні вона приблизно підкоряється закону Ламберта (рис. 2) 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 випромінення максимальний. За межами даних значень, коефіцієнт випромінення швидко зменшується до нуля при направленні спостереження по дотичній [7].



**Рис. 2.** Закон Ламберта

В наслідок залежності коефіцієнту випромінення 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.

## 6. 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  $\varphi$  – кут спостереження.

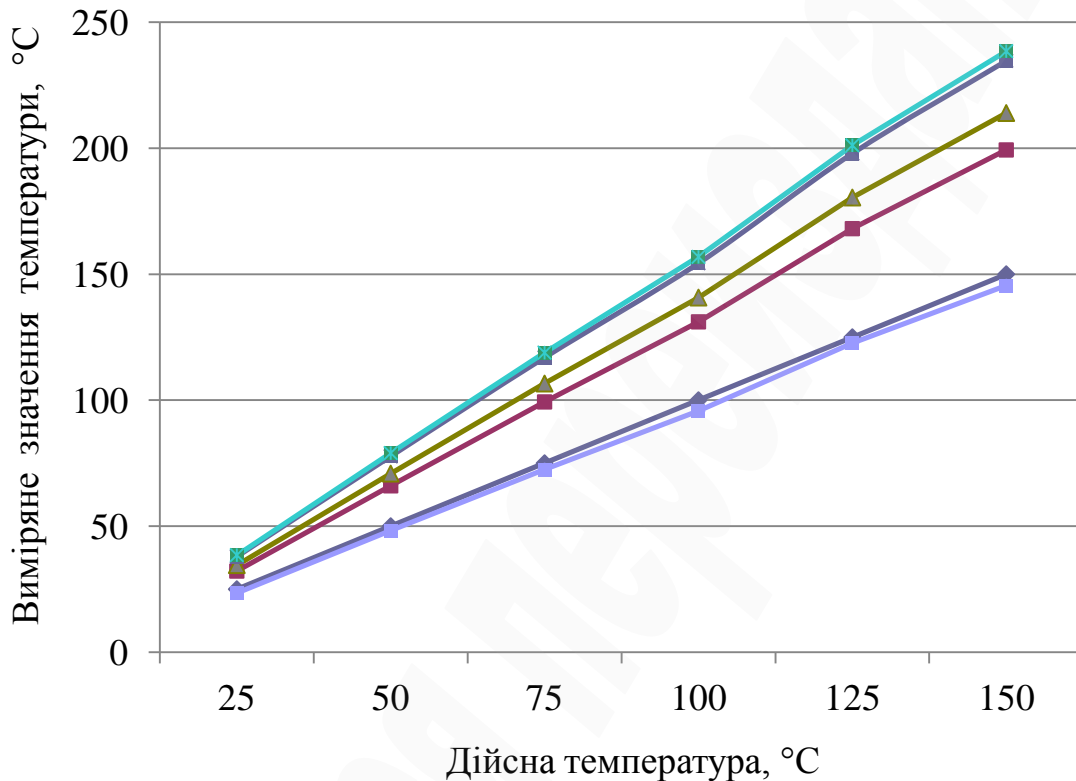
Для діелектриків залежність  $K_{\text{кут}}$  від кута спостереження найбільш точно описується формулою:

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

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

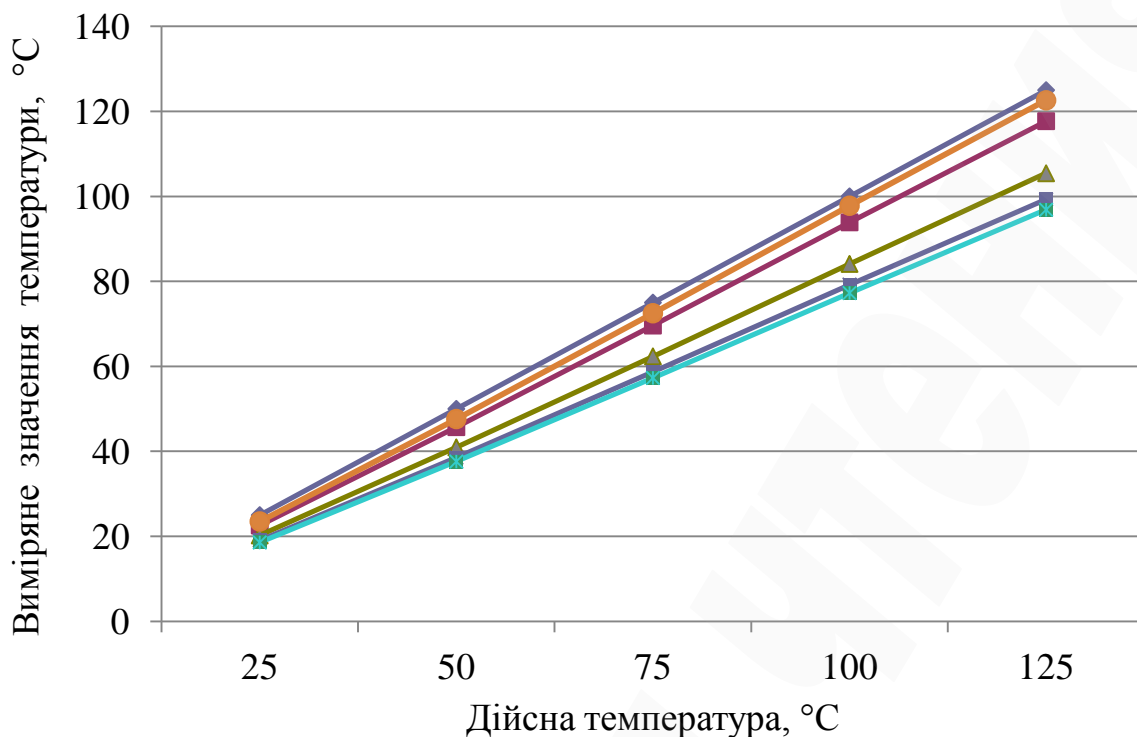
композиційного матеріалу (рис. 4). Визначення температури проводилося безпосередньо на реальному об'єкті, формуючи вибірку даних:

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



**Рис. 3.** Вплив кута спостереження на точність вимірювання температури сталі:  
— ромб — дійсна температура; — квадрат (червоний) — виміряна температура (кут спостереження 60°);  
— трикутник (жовтий) — виміряна температура (кут спостереження 70°); — квадрат (темно-синій) — виміряна температура (кут спостереження 80°); — квадрат (літній) — виміряна температура (кут спостереження 85°); — квадрат (блакитний) — виміряна температура з урахуванням впливу 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 %.



**Рис. 4.** Вплив кута спостереження на точність вимірювання температури композиційного полімера: ◆ – дійсна температура; ■ – виміряна температура (кут спостереження 60°); ▲ – виміряна температура (кут спостереження 70°); ■ – виміряна температура (кут спостереження 80°); ■ – виміряна температура (кут спостереження 85°); ● – виміряна температура з урахуванням впливу кута спостереження

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 %.

## 7. SWOT-аналіз результатів дослідження

*Strengths.* Серед сильних сторін даного дослідження необхідно відмітити отримані результати впливу кута спостереження на точність вимірювання температури за допомогою інфрачервоної техніки. На користь цього твердження свідчать приведені графіки, які дають змогу оцінити похибку вимірювання температури. Використання отриманих результатів відносно різних кутів спостереження дозволяють рішення задачі визначення оптимального коефіцієнту випромінювальної здатності, що прямим чином впливає на точність вимірювання температури.

*Weaknesses.* До слабих сторін даного дослідження можна віднести те, що рішення щодо точного вимірювання температури за допомогою інфрачервоної техніки пов'язано з довгостроковим періодом проведення. Причиною цього

являється попереднє визначення кута угломіром, в результаті чого може бути допущена похибка.

*Opportunities.* Основними можливостями, що забезпечують досягнення мети дослідження, являється те, що можливий контроль дає змогу перевірити не лише цілу деталь чи систему, а й провести випробування окремих ділянок, які з точки зору експлуатаційної надійності можуть визивати найбільші побоювання. В зв'язку з великими можливостями контролю об'єктів за величиною температури даний метод може отримати широке поле застосування в багатьох галузях промисловості. Оскільки наочність тепловізійного методу, можливість вимірювання дійсних значень температури, оперативність в роботі дають змогу компенсувати відносно велику ціну апаратури.

*Threats.* Зовнішніми факторами, які можуть ускладнити процес вимірювання температури за допомогою приладів інфрачервоної техніки, являється зміна коефіцієнту випромінювання об'єкта, що має істотну кривизну поверхні та неможливість його визначення в важкодоступних місцях. Також слід відмітити, що визначення температури з малим коефіцієнтом випромінювання призводить до певних складностей, а саме, розмежування власного випромінювання від відбитого випромінювання фону. Це призводить до того, що даний метод може використовуватися при температурах, що суттєво відрізняються від фонових, що дозволить знизити відносний енергетичний вклад фонового випромінювання і отримати більш коректні температурні дані.

Таким чином, SWOT-аналіз результатів дослідження дозволяє виявити основні напрямлення для успішного досягнення поставленої задачі. Серед них:

- підвищення точності вимірювання температури на основі впливу кута спостереження на коефіцієнт випромінювальної здатності об'єкту;
- нормалізація зображення з метою можливості порівняння результатів аналізу термограм для різних ділянок об'єкту;
- виділення можливих дефектних зон на термограмі на основі тепловізійного методу, що дозволить визначити рівномірність теплового поля для різних об'єктів.

## **8. Висновки**

1. Досліджено, що вимірювання температури за випромінюванням являється одним із основних напрямлень розвитку високоефективної 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. Встановлено, що одним із істотних факторів, що впливають на точність вимірювання температури, являється випромінювальна здатність поверхні об'єкта, що досліджується. Значення коефіцієнта випромінювання в основному приведені в таблицях або представлені в виді графіків. В загальному випадку коефіцієнт випромінювання залежить від виду матеріалу, довжини хвилі, температури, стану поверхні та кута спостереження поверхні об'єкта. Дані що приводяться в таблицях мають досить значну різницю. Тому температурні



залежності коефіцієнту випромінювання дозволяють провести більш 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 %.

### Література

1. Svet, D. Ya. Obiektivnye metody vysokotemperaturnoi pirometrii pri nepreryvnom spektre izmereniia [Text] / D. Ya. Svet. – Moscow: Nauka, 1968. – 236 p.

2. Oborsky, G. O. Vymiriuvannia neelektrychnykh velychyn [Text]: Textbook / G. O. Oborsky, P. T. Slobodianyk. – Kyiv: Nauka i tekhnika, 2005. – 200 p.

3. Bramson, M. A. Infrakrasnoe izluchenie nagretyh tel [Text] / M. A. Bramson. – Moscow: Nauka, 1965. – Vol. 1. – 224 p.

4. Jacyszun, S. Efekty szumowe w termometrii [Text] / S. Jacyszun, B. Stadnyk, J. Lucyk, F. Skoropad // Pomiar, automatyka, kontrola. – 2003. – Vol. 49, № 7/8. – P. 15–17.

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. Minkina, W. Pomiar termovizyjne-przyrzdy i metody [Text] / W. Minkina. – Czestochova: Wydawnictwo Politechniki Czestochowskie, 2004. – 243 p.

7. Vavilov, V. P. Infrakrasnaia termografiia i teplovoi kontrol' [Text] / V. P. Vavilov. – Moscow: ID Spektr, 2009. – 544 p.

8. Svet, D. Ya. Opticheskie metody izmereniia istinyh temperatur [Text] / D. Ya. Svet. – Moscow: Nauka, 1982. – 296 p.

9. Gordov, A. N. Osnovy pirometrii [Text] / A. N. Gordov. – Ed. 2. – Moscow: Metallurgii, 1971. – 448 p.

10. Gossorg, J. Infrakrasnaia termografiia. Osnovy, tehnika, primenie [Text]: Translation from French / J. Gossorg. – Moscow: Mir, 1988. – 416 p.

11. Bernhard, F. Technische Temperaturmessung [Text] / F. Bernhard. – Springer, 2004. – 1460 p. doi:[10.1007/978-3-642-18895-4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-18895-4)

12. Lynnworth, L. C. Ultrasonic Thermometry [Text] / L. C. Lynnworth, E. P. Papadakis // Ultrasonics Symposium. – 1970. – P. 83–93. doi:[10.1109/ultsym.1970.196006](https://doi.org/10.1109/ultsym.1970.196006)

13. Vvedenie v termografiu [Text] / American Technical Publishers, Inc., Fluke Corporation, и The Snell Group. – Russia, 2009. – Available at: \www/URL: <http://www.thermview.ru/pdf/flukeguide.pdf>. – 10.02.2016.

14. Gerashchenko, O. A. Teplovye i temperaturnye izmereniia [Text]: Reference Manual / O. A. Gerashchenko, V. G. Fedorov. – Kyiv: Naukova dumka, 1965. – 304 p.

15. Oborsky, G. Researching the materials emissivity influence onto the thermal control method's accuracy [Text] / G. Oborsky, A. Levinsky, M. Holofieieva // Technology Audit And Production Reserves. – 2016. – № 2/3 (28). – P. 4–7. doi:[10.15587/2312-8372.2016.61802](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.61802)