

# ЗАСОБИ ВИМІРЮВАНЬ ТЕПЛОВИХ ВЕЛИЧИН

## ЗАЛЕЖНІСТЬ ПОХИБКИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПІРОМЕТРАМИ ВІД КОЕФІЦІЄНТА ВИПРОМІНЮВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ОБ'ЄКТІВ

### DEPENDENCE OF THE PYROMETRIC MEASURING TEMPERATURE ON THE EMISSIVITY FACTOR OF OBJECTS

*Микитин І. П., д-р техн. наук, проф., Скоропад П. І., д-р техн. наук, проф.  
кафедра інформаційно-вимірювальних технологій,  
Національний університет "Львівська політехніка", Україна;  
e-mail: mykytynip@ukr.net*

*Ihor Mykytyn, Dr. Sc., prof, Pylyp Skoropad, Dr. Sc., prof,  
Lviv Polytechnic National University, Ukraine*

<https://doi.org/>

**Анотація.** Наведено результати дослідження залежності похибки визначення температури термометрами випромінювання від коефіцієнта випромінювальної здатності досліджуваних об'єктів. Проаналізовано математичні моделі, які описують залежності між дійсним значенням термодинамічної температури і вимірними пірометрами уявними температурами, із урахуванням впливу значення коефіцієнта випромінювальної здатності матеріалів. Ці моделі покладено в основу побудови найпоширеніших типів пірометрів, зокрема: яскравісного, повного випромінювання та спектрального відношення. Описано результати проведених теоретичних досліджень. Проаналізовано доцільність та наведено практичні рекомендації стосовно застосування певного типу пірометра залежно від коефіцієнта випромінювальної здатності досліджуваних об'єктів та вимог до метрологічної достовірності результату вимірювання.

**Ключові слова:** температура, коефіцієнт випромінювальної здатності, пірометр, похибка вимірювання.

**Abstract.** Study of the dependence of the temperature determination error on the emissivity factor of materials is conducted in the paper. The mathematical models, which describe the ratio of thermodynamic temperature and measured imaginary temperatures, taking into account the emissivity factor, are analyzed. The constructions of the full radiation, brightness radiation, and spectral ratio radiation pyrometers are underpinned by the considered models. Analyzing the mathematical models of radiation thermometers (or pyrometers), one can observe a fundamental circumstance that interferes with the wide application of pyrometry, namely, lack of knowledge or even the mere absence of information on the true numerical values of the emissivity factor of the objects. When measuring the temperature of objects that fall under the classification of "real body", there arise serious problems with the reliability of its determination. The vast majority of modern pyrometers, which are calibrated by a blackbody, compute the data received from sensitive element of the pyrometer into temperature values, not taking into account the real value of the object's emissivity factor. Thus, if the latter is 0.1, and the pyrometer is graded by the blackbody, then, only ~10 % of its radiation energy is perceived by sensitive element of the pyrometer. As result, the determined temperature value is substantially lower than the actual one. It can be argued that the lack of information about a real numeric value of the monitored object's emissivity factor is the determining source of distortion of the measurement result. The problem is further complicated by the fact that the mentioned factor is the parameter that depends on many factors, and in particular on the temperature, which is exactly to define.

The paper presents the results of the study of the dependence of the absolute measurement error of temperature on emissivity factor for different types of pyrometers. The accuracy of measuring the temperature with pyrometric means is minimal only for measuring the black body or gray body by the spectral ratio pyrometers. The error of measuring the temperature of real object differs significantly from the error of the black body. This is due to the ignorance of the true value of the emissivity factor of the real object. Therefore, presetting of this factor in pyrometers that is recommended by most pyrometers guidelines is completely incorrect.

**Key words:** Temperature, Emission factor, Pyrometer, Measurement error.

#### Вступ

Кожне тіло, температура якого вища за 0 К, є джерелом електромагнітного випромінювання. Енергія від одного тіла передається до іншого через випромінювання і поглинання електромагнітних хвиль. Цей процес описується відомими законами теплового випромінювання, які впливають із закону Планка для абсолютно чорного тіла (надалі – АЧТ) [1]. Це явище використовують в термометрії під час створення термометрів за випромінюванням, попит на які останнім часом розширився як у наукових, так і в

промислових сферах застосування, зважаючи на цілу низку їхніх унікальних особливостей, головню на можливість безконтактного визначення температури, що дає змогу уникати спотворення температурного поля вимірювального об'єкта.

Однак основним недоліком цього методу визначення температури є низька точність вимірювань, спричинена, насамперед, впливом на результати вимірювання відсутності інформації про істинне числове значення коефіцієнта випромінювальної здатності є досліджуваного об'єкта [2].



Таблиця 2

## Передавальні характеристики пірометрів

Table 2

## Transmission characteristics of pyrometers

Тип ТВ	*Моделі передавальних характеристик [1]
Яскравісний	$\frac{1}{T_T} = \frac{1}{T_J} + \frac{1}{C_2} \ln e(I, T_T)$
Повного випромінення	$T_T = T_P / \sqrt[4]{e(T_T)}$
Спектрального відношення	$\frac{1}{T_T} - \frac{1}{T_{CB}} = \ln \frac{e(I_1, T_T)}{e(I_2, T_T)} \frac{1}{C_2} \frac{1}{I_1^{-1} - I_2^{-1}}$

\*  $e(T_T)$  – інтегральна випромінювальна здатність;  $e(I_1, T_T)$ ,  $e(I_2, T_T)$  – монохроматичні випромінювальні здатності;  
 $T_T$  – термодинамічна температура;  $T_J$  – температура за яскравістю;  
 $T_P$  – температура радіаційна;  $T_{CB}$  – температура спектрального відношення.

**Закон Планка** – основний закон теплового випромінення для абсолютно чорного тіла, з якого виведено передавальні характеристики усіх наявних сьогодні основних типів ТВ [1]:

$$E_{0\lambda} = C_1 \lambda^{-5} \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T_T} - 1\right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

де  $E_{0\lambda}$  – спектральна густина випромінення;  $T_T$  – термодинамічна температура,  $C_1$ ,  $C_2$  – відповідно, перша та друга сталі випромінення,  $\lambda$  – довжина хвилі. Вираз (1) описує спектральний розподіл енергії за довжиною хвилі та температурою для АЧТ.

Використовуючи на практиці закон Планка, нині виготовляють такі основні типи ТВ (табл. 2):

- пірометр яскравісний;
- пірометр повного випромінення;
- пірометр спектрального відношення.

**Аналіз випромінювальної здатності.** Відомо, що ідеальний об'єкт для вимірювання температури за допомогою ТВ повинен, зокрема, мати  $\epsilon$ , що дорівнює 1, для якого справджуються закони теплового випромінення, що випливають із закону Планка (1). В практичній термометрії об'єкти вимірювання з властивостями АЧТ практично відсутні. В метрологічній практиці для градування та метрологічної перевірки ТВ використовують так звані моделі АЧТ, характеристики яких лише частково відповідають ідеальному АЧТ. Характеристики ж теплового випромінення реальних об'єктів істотно відрізняються від відповідних характеристик навіть “моделей АЧТ”, що і є основним чинником виникнення методичної похибки під час визначення результату вимірювання температури реальних об'єктів за допомогою ТВ.

Термін АЧТ не зовсім коректний, оскільки колір як поняття, пов'язане зі значно меншими довжинами хвиль оптичного діапазону, в інфрачервоному діапазоні позбавлене певного сенсу. Однак у природі більшість об'єктів, на відміну від АЧТ, є або “сірим тілом”, коефіцієнт випромінювальної здатності якого  $\epsilon \neq 1$ , але  $\epsilon$  сталим у всьому діапазоні хвиль, або ж “реальним тілом”,  $\epsilon$  якого змінюється, зокрема, залежно від довжини хвилі та температури (рис. 1).

Під час вимірювання температури об'єктів, що класифікують як “реальне тіло”, постають серйозні проблеми з достовірністю її визначення. Переважна кількість сучасних ТВ, які градуйовані за “моделлями АЧТ”, перераховують отриману чутливим елементом ТВ випромінювану об'єктом вимірювання енергію у значення температури, не беручи до уваги реального значення  $\epsilon$  об'єкта. Отже, якщо об'єкт вимірювання має  $\epsilon=0,1$ , а ТВ градуйовано за “моделлю АЧТ”, то відповідно, лише приблизно 10 % енергії випромінювання сприйме чутливий елемент ТВ, відповідно, визначена за допомогою ТВ температура буде нижчою від дійсної. Тобто визначення температури буде некоректним.

Враховуючи сказане вище, з певністю можна стверджувати, що відсутність інформації про дійсне числове значення  $\epsilon$  об'єкта вимірювання є визначальним джерелом спотворення результату вимірювання температури. Проблема ускладнюється ще й тим, що коефіцієнт випромінювальної здатності є параметром, який залежить від багатьох чинників, зокрема і від температури, яку визначають за допомогою ТВ.

У технічній літературі можна знайти найрізноманітніші та, м'яко кажучи, “доволі оригінальні” рекомендації стосовно усунення проблеми випромінювальної здатності під час визначення температури ТВ, які, загалом, згруповані в [6] та полягають ось у чому:

- за допомогою ТВ можна отримати точні результати вимірювання температури, калібруючи засіб для вимірювання температури вибраного матеріалу. Для цього слід скористатися класичним термометром як зразковим. Необхідно виміряти температуру матеріалу класичним термометром, а потім, встановлюючи різні значення коефіцієнта випромінювальної здатності  $\epsilon$  у ТВ, добитися збіжності результату вимірювання для обох засобів;

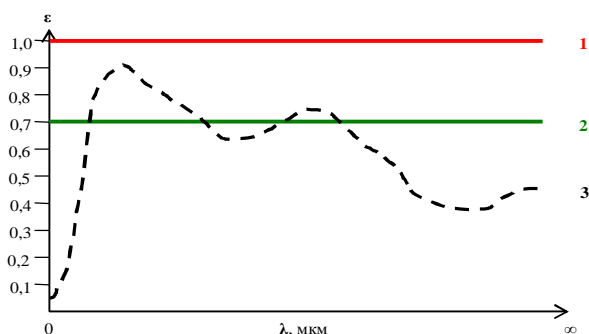


Рис. 1. Залежність  $\epsilon$  від довжини хвилі: 1 – абсолютно чорне тіло, 2 – сіре тіло, 3 – реальне тіло

Figure 1. Dependence  $\epsilon$  on wavelength: 1 – blackbody, 2 – gray body, 3 – real body

- у діапазоні порівняно низьких температур (до 260 °C) можна використовувати для вимірювання температури поверхні чорні стрічки з  $\epsilon=0,95$ , а потім встановити на засобі вимірювання значення  $\epsilon=0,95$  та виконати вимірювання температури;

- для вимірювання у діапазоні високих температур в об'єкті необхідно просвердлити отвір, глибина якого у шість разів більша за діаметр, який слугуватиме АЧТ із  $\epsilon=1$ ;

- за змоги матеріал або ж його частину можна пофарбувати чорною матовою фарбою і він матиме  $\epsilon=1$ ;

- значення  $\epsilon$  для більшості різних матеріалів опубліковано в нашому каталозі та на веб-сайті. Коефіцієнти випромінювальної здатності  $\epsilon$  для досліджуваних матеріалів треба враховувати під час проведення вимірювань. Ви можете використовувати їх, щоб принаймні мати передбачуване значення  $\epsilon$ .

На наш погляд, оригінальність наведених вище рекомендацій, призначених для застосування під час визначення температури ТВ, може конкурувати лише з їхньою абсурдністю, оскільки усі вони перекреслюють основну перевагу цих засобів вимірювання, а саме – відсутність безпосереднього контакту об'єкта вимірювання з ТВ. Якщо ж є доступ до об'єкта вимірювання, як запропоновано вище, на нього можна клеїти чорні стрічки, покривати чорною фарбою чи свердлити в ньому отвори, то немає перешкод для застосування засобів контактної термометрії.

**Залежність коефіцієнта випромінювальної здатності тіл від їхніх електрофізичних властивостей.** Як вже показано вище, інформація про істинне числове значення коефіцієнта випромінювальної здатності поверхні досліджуваного тіла вкрай необхідна для здійснення коректного визначення його температури засобами безконтактної термометрії. Як відомо, для реальних тіл, числове значення коефіцієнта випромінювальної здатності сягає від 0 до 1 і залежить від багатьох чинників. Випромінювальна здатність поверхні досліджуваного тіла істотно залежить, зокрема, від:

- **виду матеріалу**, з якого виготовлено об'єкт дослідження; наприклад, для паперу типове значення  $\epsilon=0,9$ , для неіржавіючої сталі  $\epsilon=0,3$ , а для срібла  $\epsilon=0,03$ ;

- **структури поверхні** досліджуваного об'єкта; необроблена поверхня з неіржавіючої сталі має  $\epsilon=0,3$ , поверхня цієї самої сталі після піскоструминної обробки – значення  $\epsilon=0,7$ , а після полірування –  $\epsilon=0,14$ ;

- **спектрального діапазону випромінювання**, що його реєструє термочутливий елемент ТВ; коефіцієнт випромінювальної здатності поверхні полірованої неіржавіючої сталі в довгохвильовому діапазоні (8...14 мкм) має значення  $\epsilon=0,14$ , а в короткохвильовому (2...5,6 мкм) значення цього коефіцієнта становить  $\epsilon=0,18$ .

Отже, уваги треба врахувати, що випромінювальна здатність реального тіла є складною функцією, яка залежить від багатьох чинників, зокрема: природи тіла, яке випромінює, його температури, стану поверхні. В пірометрії чи термографії застосовують, зокрема, поняття середнього значення монохроматичного коефіцієнта випромінювальної здатності  $\bar{\epsilon}$  у напрямку до нормалі вимірюваної поверхні в спектральному діапазоні. Цей параметр для спектрального діапазону  $I_1-I_2$  описується залежністю [1]:

$$\bar{\epsilon}(I_1, I_2, T_T) = \frac{\int_{I_1}^{I_2} \epsilon(I) \cdot E_b(I, T_T) \cdot dI}{\int_{I_1}^{I_2} E_b(I, T_T) \cdot dI} \quad (2)$$

Потрібно також відзначити залежність коефіцієнта випромінювальної здатності об'єкта від кута візування засобу вимірювання. Наприклад, під час термографічних вимірювань можна спостерігати очевидні відмінності візуального розподілу температури по поверхні об'єкта, виконаного з однорідного матеріалу, який до того ж в реальності має однакову температуру. Термограми показують кореляцію візуального розподілу температури з видимими неоднорідностями рельєфу об'єкта, що, своєю чергою, ілюструє неоднорідності розподілу самого коефіцієнта випромінювальної здатності об'єкта.



Для металів залежність коефіцієнта випромінювальної здатності  $\epsilon$  від кута візування  $\alpha$  є нелінійною (рис. 2).

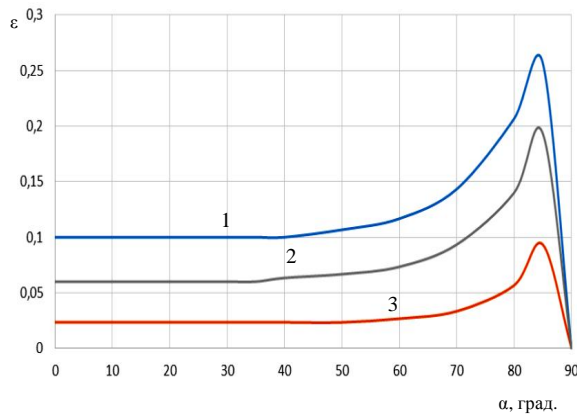


Рис. 2. Залежність  $\epsilon$  від кута візування  $\alpha$  для металів:  
1 – Fe, 2 – Pt, 3 – Cu

Figure 2. Dependence  $\epsilon$  on the viewing angle  $\alpha$  for metals:  
1 – Fe, 2 – Pt, 3 – Cu

Як видно з рис. 2, для кутів візування понад 60° випромінювальна здатність для наведених металів починає зростати, досягаючи максимуму за кута візування  $\alpha \approx 85^\circ$ , після чого спостерігається різке падіння її значення. Отже, вимірюючи безконтактними засобами температуру плоскої поверхні металів, слід уникати кута візування понад 60°, а під час вимірювання температури поверхні циліндричних чи сферичних об'єктів вимірювання необхідно виконувати з кількох сторін.

Отримані в [7] залежності випромінювальної здатності жаростійких сталей від температури (рис. 3) можна умовно поділити на дві групи:

- перша група – сталі 12X18H10T, ВЖ159-ИД та ЭП912, стан поверхні яких змінюється, а отже,  $\epsilon$  для них незворотно зростає, що викликано утворенням на їх поверхні окисної плівки за температури понад 700 °C;

- друга група – сталі ПХ26Ю6 та Pt<sub>80</sub>-Rh<sub>20</sub>, поверхня яких не зазнає змін зі зростанням температури, а  $\epsilon$  у циклі “нагрівання – охолодження” не змінює характеру залежності від температури.

Фундаментальним підґрунтям для створення фізичних моделей випромінювальної здатності об'єкта є залежності, які описують спектральну випромінювальну здатність, що впливають з теорії Максвелла. У прикладній пірометрії застосовують моделі випромінювальної здатності тіл, що ґрунтуються на законі Хагена–Рубенса для випромінювальної здатності металів [8, 9].

Для металів, згідно з основними засадами електродинаміки, випромінювальна здатність у діапазоні довгохвильового випромінювання є функцією

поверхневого електроопору та частоти електромагнітного випромінювання:

$$e(I) = \sqrt{\frac{8pr}{I m_0 C_0}} \approx 0.365 \sqrt{\frac{r}{I}}, \quad (3)$$

де  $r$  – поверхневий електроопір;  $C_0$  – швидкість світла у вакуумі;  $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму.

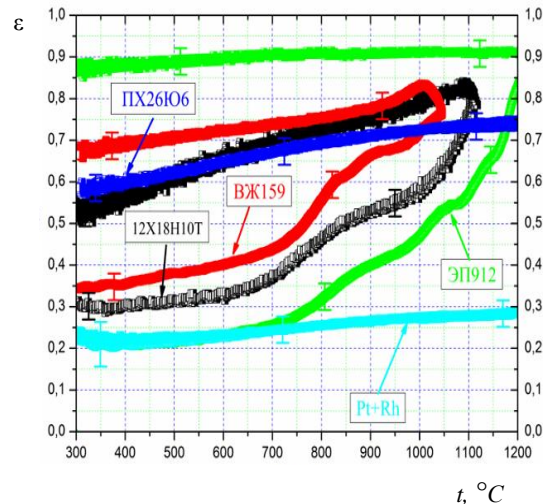


Рис. 3. Залежність  $\epsilon$  жаростійких сталей від температури

Figure 3. Dependence  $\epsilon$  of heat-resistant alloys on temperature

Випромінювальна здатність більшості металів доволі добре описується залежністю (3) у діапазоні хвиль  $\lambda > 10$  мкм. Проте в діапазоні довжин хвиль 5 мкм  $< \lambda < 10$  мкм застосовують емпіричну залежність:

$$e(I) = 0.365 \cdot \sqrt{\frac{r}{I}} - 0.0667 \cdot \frac{r}{I} + 0.0091 \cdot \sqrt[3]{\frac{r}{I}}. \quad (4)$$

Рис. 4 наочно ілюструє спектральний характер залежності коефіцієнта випромінювальної здатності деяких металів у діапазоні хвиль 1,3 мкм  $< \lambda < 2,5$  мкм.

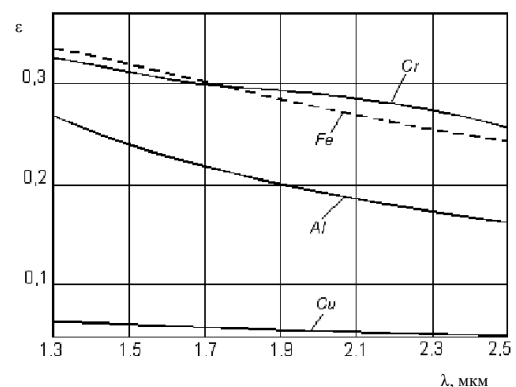


Рис. 4. Залежність  $\epsilon$  деяких металів від довжини хвилі

Figure 4. Dependence  $\epsilon$  of some metals on wavelength

Випромінювальна здатність, як і більшість фізичних величин, може описуватися апроксимаційною функцією для певного спектрального діапазону. Вид апроксимаційної функції залежить від значення випромінювальної здатності, температури та характеру її зміни. Докладнішу інформацію про складні залежності випромінювальної здатності реальних об'єктів від розмаїтих впливних чинників, можна знайти, зокрема, в наведеній літературі [10–15].

#### Результати математичного моделювання.

Використовуючи математичні моделі передавальних характеристик (табл. 2), виконано теоретичні дослідження залежності уявних температур, вимірюваних пірометрами, від коефіцієнта випромінюваль-

ної здатності об'єктів вимірювання  $\epsilon$ . Під час досліджень варіативним параметром моделей був  $\epsilon$ , числове значення якого змінювалося у межах від 0,01 до 1, а вимірювана термодинамічна температура становила 1000 К. Для кожного поточного значення  $\epsilon$  розраховували значення уявної температури, характерне для кожного виду пірометра (табл. 2), та визначали поправку  $\Delta T$ , яку б треба було додати до результату вимірювання, щоб отримати дійсне значення термодинамічної температури об'єкта. На рис. 5 подано результати дослідження залежності поправки  $\Delta T$  від  $\epsilon$  для яскравісного пірометра (рис. 5, а), для пірометра повного випромінювання (рис. 5, б) та залежність поправки  $\Delta T$  від відношення  $\epsilon_1/\epsilon_2$  для пірометра спектрального відношення (рис. 5, в).

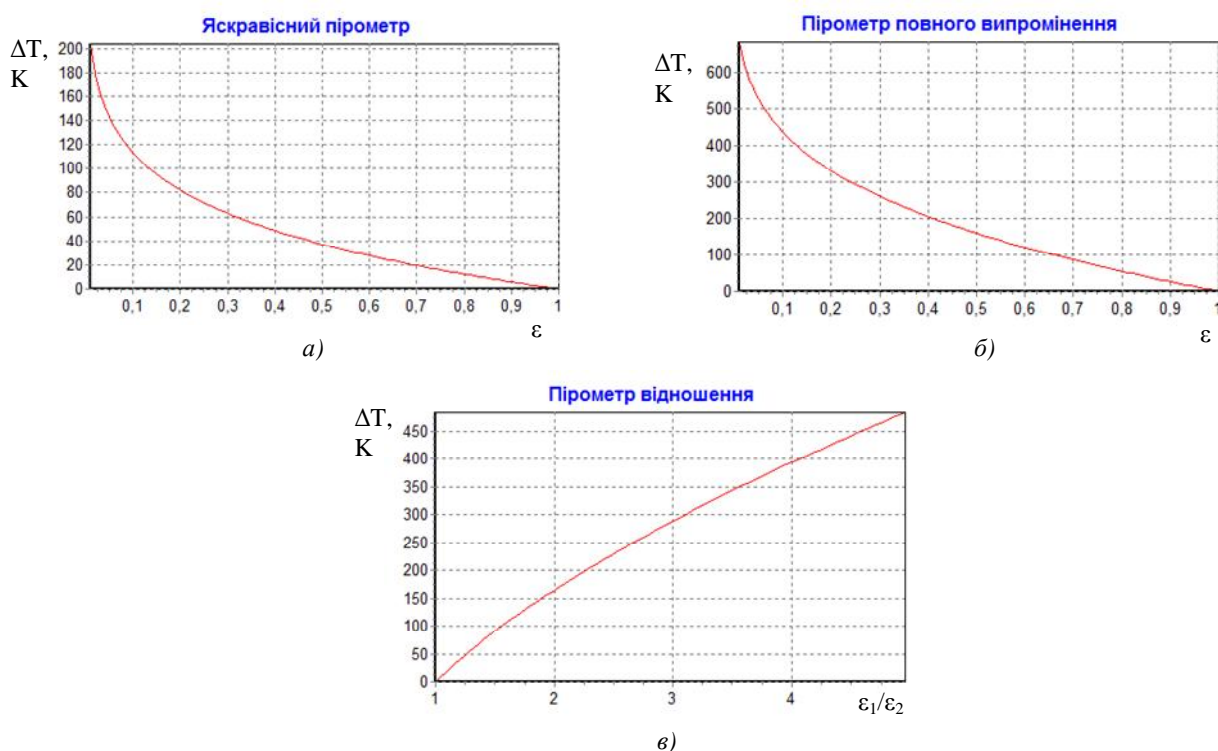


Рис. 5. Результати моделювання залежності поправки  $\Delta T$  від  $\epsilon$  для різних типів пірометрів

Figure 5. Simulation results for amendment  $\Delta T$  on  $\epsilon$  for different types of pyrometers

#### Висновки

Похибка вимірювання температури наявними засобами пірометрії є мінімально можливою лише під час вимірювання температури абсолютно чорного тіла (або ще й сірого тіла для випадку використання пірометрів спектрального відношення). Похибка ж вимірювання температури реального об'єкта може істотно відрізнитися від похибки, отриманої для абсолютно чорного тіла. Це спричинено впливом відсутності знання істинного числового значення коефіцієнта випромінювальної здатності реального об'єкта. Тому суто апіорне виставлення числового

значення цього коефіцієнта в засобах безконтактної термометрії, як рекомендують у більшості настанов з їх використання, слід вважати некоректним.

Використання засобів безконтактної термометрії можна з успіхом рекомендувати для випадку, коли не потрібно визначати конкретного значення температури, а треба лише відстежувати її відхилення від певного рівня. Коректні вимірювання температури можна виконувати тільки для абсолютно чорного та сірого тіл, за якими засоби пірометрії градуювали або ж перевіряли їх метрологічні характеристики.

## Список літератури

- [1] F. Lieneweg, *Handbuch der technischen Temperaturmessung*. Braunschweig: Vieweg Verlag, 1976.
- [2] Н. Гоц, Л. Назаренко, М. Микийчук, Розвиток багатоканальної термометрії за випроміненням для реалізації багатосмугових та тестових методів вимірювання температури. *Український метрологічний журнал*, № 4, с. 64–67, 2016.
- [3] Raytek ST60 XB IR Thermometer. *Technical Reference* [Online]. Available: <https://uk.rs-online.com/web/p/infrared-thermometers/3738499/>
- [4] Пірометри НИМБУС. *Інструкція пользователя*. [Online]. Available: <http://docplayer.ru/28333628-Pirometry-nimbus-instrukciya-polzovatelya.html>.
- [5] Б. І. Стадник, П. І. Скоропад, Аналіз основних проблем створення низькотемпературних теплових випромінювачів. *Вимірювальна техніка та метрологія*, вип. 66, с. 57–64, 2006.
- [6] Wstęp do termometrów na podczerwień. *Jak działa termometr na podczerwień i na co zwrócić uwagę?* [Online]. Available: <https://www.jakar.cz/clanky/wstep-do-termometrow-na-podczerwien/?lang=pl>.
- [7] О. Е. Авдошина, Е. Н. Макейкин, К. Р. Мансуров, С. В. Маркин, Излучательная способность жаропрочных сплавов и покрытий для них в широком диапазоне температур. Саров: ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ” ИЛФИ, с. 154–162.
- [8] М. Борн, Э. Вольф, *Основы оптики*. М.: Наука, 1973.
- [9] Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Электродинамика сплошных сред*. М.: Наука, 1982.
- [10] M. Battuello, S. Clausen, J. Hameury, P. Blombergen, “The spectral emissivity of surface layers currently applied in blackbody radiators, covering the spectral range from 0.9 to 20  $\mu\text{m}$ . An international comparison”, in *Proc. of the 7<sup>th</sup> Intern. Symp. on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science*. Delft, pp. 601–606, 1999.
- [11] *IR-Book. Level II (Infrared Training Center-International)*. Training materials of FLIR, 2000.
- [12] R. P. Madding, “Emissivity measurement and temperature correction accuracy considerations”, in *Proc. of the SPIE, Thermosense XXI, Orlando, Florida*, ed. by: D. H. LeMieux, J. R. Snell, vol. 3700, s. 393–401, 1999.
- [13] L. Michalski, K. Eckersdorf, J. Kucharski, *Thermometers – instruments and methods*. Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 1998.
- [14] W. Minkina, “Thermometry – basic problems of thermovision measurements”. *Materials XXXV Interuniversity Conference of Metrologists (XXXV MKM’2003)*. Krakow, pp. 77–86, 2003.
- [15] A. Sala, *Radiant heat exchange*. Warsaw: PWN, 1993.
- [16] Переносні пірометри часткового випромінення “Смотрич-4ПМ1-08”, “Смотрич-4ПМ1-09” (ТУ У 33.2-04850451-068:2001) [Online]. Available at: <http://thermo.lviv.ua/index.php/uk/produktsiia%3Fid=114.html>.

## References

- [1] F. Lineweg, *Handbook of technical temperature measurement*. Brunswick: Vieweg Verlag, 1976.
- [2] N. Gots, L. Nazarenko, M. Mikuichuk, Development of multichannel thermometry for radiation for implementation of multiband and test methods for measuring temperature. *Ukr. Metrolog. journ.* 2016. No. 4, p. 64–67.
- [3] Raytek ST60 XB IR Thermometer. *Technical Reference*. [Online]. Available: <https://uk.rs-online.com/web/p/infrared-thermometers/3738499/>
- [4] NIMBUS Pyrometers. *User manual*. [Online]. Available at: <http://docplayer.ru/28333628-Pirometry-nimbus-instrukciya-polzovatelya.html>.
- [5] B. Stadnyk, P. Skoropad, Analysis of the main problems of the creation of low temperature thermal radiators. *Meas. Equip. and metrology*, No. 66, p. 57–64, 2006.
- [6] Introduction to infrared thermometers. *How does an infrared thermometer work and what to look for?* [Online]. Available: <https://www.jakar.cz/clanky/wstep-do-termometrow-na-podczerwien/?lang=pl>.
- [7] O. E. Avdoshina, E. N. Makeikin, K. P. Mansurov, S. V. Markin, The emissivity of superalloys and coatings for them in a wide temperature range. Sarov, RF: *Federal State Unitary Enterprise RFNC-VNIIEF ILFI*, p. 154–162.
- [8] M. Born, E. Wolf. *Basics of Optics*. M.: Science, 1973.
- [9] L. D. Landau, E. M. Lifshits. *Electrodynamics of continuous media*. M: Science, 1982.
- [10] M. Battuello, S. Clausen, J. Hameury, P. Blombergen, “The spectral emissivity of surface layers currently applied in blackbody radiators, covering the spectral range from 0.9 to 20  $\mu\text{m}$ . An international comparison”, in *Proc. of the 7<sup>th</sup> Intern. Symp. on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science*. Delft, pp. 601–606, 1999.
- [11] *IR-Book. Level II (Infrared Training Center-International)*. Training materials of FLIR, 2000.
- [12] R. P. Madding, “Emissivity measurement and temperature correction accuracy considerations”, in *Proc. of the SPIE, Thermosense XXI, Orlando, Florida*, edited by: D. H. LeMieux, J. R. Snell, vol. 3700, s. 393–401, 1999.
- [13] L. Michalski, K. Eckersdorf, J. Kucharski, *Thermometers - instruments and methods*. Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 1998.
- [14] W. Minkina, “Thermometry – basic problems of thermovision measurements”. *Materials XXXV Interuniversity Conference of Metrologists (XXXV MKM’2003)*. Krakow, pp. 77–86, 2003.
- [15] A. Sala *Radiant heat exchange*. Warsaw: PWN, 1993.
- [16] Переносні пірометри часткового випромінення “Смотрич-4ПМ1-08”, “Смотрич-4ПМ1-09” (ТУ У 33.2-04850451-068:2001) [Online]. Available at: <http://thermo.lviv.ua/index.php/uk/produktsiia%3Fid=114.html>.