

ОГЛЯД ОДНОКАНАЛЬНОЇ ПІРОМЕТРІЇ

У роботі виконано аналіз методів безконтактного вимірювання температури з використанням одноканальної пірометрії. Досліджено похибки вимірювання температури даними методами. Вказані переваги та умови застосування методів одноканальної пірометрії.

Постановка задачі в загальному вигляді та її актуальність. В задачах контролю різноманітних технологічних процесів першорядне значення мають температурні вимірювання, які на сьогоднішній день складають близько 40 % всіх вимірювань у промисловості. В багатьох випадках необхідно здійснювати вимірювання температури важкодоступних технічних об'єктів, об'єктів, що знаходяться під електричним потенціалом, в радіоактивному, або агресивному середовищі. Для цього доцільно використовувати безконтактні методи вимірювання температури, зокрема вимірювання температури за випроміненням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій в галузі пірометрії. Розвиток пірометрії, як науки розпочався з візуальної пірометрії, яка використовувала видиму ділянку спектра випромінення, а приймачем випромінення служило око людини. На початку ХХ століття були розроблені візуальні пірометри, а саме монохроматичні пірометри та пірометри сумарної радіації, принцип дії та конструкція яких представлені в монографії [1]. Вивчались властивості скляних фільтрів, здатних пропускати випромінення на вузькій спектральній ділянці. Для правомірності використання фіксованої довжини хвилі при умові сприймання фотоелектричним приймачем випромінення в деякому діапазоні було введено поняття ефективної довжини хвилі для інтервалу температур, для даної температури, спектропірометра. Проводились дослідження монохроматичної, сумарної та візуальної випромінювальної здатності різних металів.

В середині минулого століття інтенсивний розвиток отримала пірометрія, побудована на сумарній реєстрації теплового випромінення в широкій області спектра – радіаційна пірометрія, засади якої докладно описані в монографії [2]. Основна увага приділялась термоелектричним пірометрам сумарної радіації, проектуванню та розрахункам параметрів елементів оптичних систем, розробці методів градування радіаційних пірометрів.

В 80-ті роки [3, 4] розвиток пірометрії ішов шляхом розвитку методів широкоспектральної одноканальної пірометрії. На практиці вимірювання спектральної яскравості завжди здійснюється в деякому спектральному інтервалі, який задається оптичним каналом та параметрами приймача випромінення пірометра. Але це викликає наступні труднощі: складність визначення апаратної функції $\psi(\lambda)$, необхідність розрахунку калібрувальної кривої та проведення чисельного інтегрування. Ці недоліки усуваються при використанні наближень, за якими реєстрація широкополосного випромінення замінюється монохроматичною або інтегральною реєстрацією випромінення.

При переході до сигналу, що реєструє широкополосне випромінення до монохроматичної реєстрації, використовують методи врахування немонохроматичності спектрального каналу шляхом введення поняття ефективної довжини хвилі (ЕДХ) та різних видів ЕДХ, таких як: гранична ЕДХ; референсна ЕДХ; середньозважена ЕДХ.

Викладення основного матеріалу досліджень. *Методи монохроматичної одноканальної пірометрії* базуються на вимірюванні монохроматичної яскравості випромінення одним спектральним каналом. Умовну яскравісну та термодинамічну температуру досліджуваного об'єкта можна визначити двома методами, представленими в табл. 1.

Таблиця 1

Методи монохроматичної одноканальної пірометрії

Назва методу монохроматичної одноканальної пірометрії	Формула визначення умовної яскравісної температури монохроматичної двоканальної пірометрії	Формула розрахунку термодинамічної температури за значенням умовної температури
Метод співставлення спектральної густини енергетичної яскравості досліджуваного об'єкта та АЧТ, [4]	$T_{я}^{-1} = -\frac{\lambda \ln I}{C_2}$	$T^{-1} = T_{я}^{-1} + \frac{\lambda}{C_2} \cdot \ln \varepsilon$
Метод відношення спектральних яскравостей досліджуваного та еталонного випромінювача, [4]	$T_z^{-1} = T_o^{-1} - \frac{\lambda}{C_2} \cdot \ln \frac{U(T)}{U(T_0)}$	$T^{-1} = T_z^{-1} + \frac{\lambda}{C_2} \cdot \ln \varepsilon$

В таблиці використані такі позначення: T – значення термодинамічної температури досліджуваного об'єкта; $T_{я}$ – значення умовної яскравісної температури АЧТ; λ – значення довжини хвилі монохроматичного випромінення, $C_2 = 0,01438769$ м·К (друга стала випромінення); ε – спектральний коефіцієнт випромінення; $U(T)$ та $U(T_0)$ – вихідні сигнали пірометра, що відповідно послідовно візує досліджуваний об'єкт та еталонний випромінювач.

У монохроматичній одноканальній пірометрії для описання залежності спектральної енергетичної яскравості від температури та довжини хвилі використовується наближена формула Віна. Це накладає умови на діапазон вимірюваних температур та робочу спектральну область: температури до 500 °С доцільно вимірювати в дальній інфрачервоній області спектра, а високотемпературні вимірювання – у видимій та близькій інфрачервоній області спектра. У цьому випадку похибка вимірювання температури від використання формули Віна замість формули Планка не перевищує 1 %.

Іншою особливістю даного методу є необхідність використання інформації про значення коефіцієнта випромінення поверхні досліджуваного об'єкта. Відомі методи, які практично використовуються [5], дозволяють визначити значення коефіцієнта випромінення з досить великою похибкою (до 5–10 %), що відповідним чином визначає невисоку точність вимірювання термодинамічної температури монохроматичними одноканальними методами пірометрії.

Одноканальну широкоспектральну пірометрію можна назвати квазімонохроматичною одноканальною пірометрією, оскільки, проводячи широкополосні вимірювання наближено використовують залежності монохроматичної пірометрії.

Таблиця 2

Методи одноканальної широкоспектральної пірометрії

Метод визначення умовної температури одноканальної широкоспектральної пірометрії	Формула розрахунку термодинамічної температури за значенням умовної температури
Визначення температури з використанням квазімонохроматичних методів на основі ЕДХ для інтервалу температур	$\frac{1}{T} = \frac{\lambda_{T_0 T}}{C_2} \cdot \ln \left[1 + \frac{1}{t} \left(\exp \frac{C_2}{\lambda_{T_0 T} \cdot T_0} - 1 \right) \right]$
Визначення температури з використанням квазімонохроматичних методів на основі методу референтної довжини хвилі та коректуючого множника	$\frac{1}{T} = \frac{\lambda_R}{C_2} \cdot \ln \left[1 + \frac{1}{t} \left(\exp \frac{C_2}{\lambda_R \cdot T_0} - 1 \right) \cdot \frac{R(T)}{R(T_0)} \right]$
Визначення температури з використанням квазімонохроматичних методів на основі середньозваженої ЕДХ	$\frac{1}{T} = \frac{\lambda_c(T)}{C_2} \cdot \ln \left[1 + \frac{1}{t} \left(\exp \frac{C_2}{\lambda_c(T) \cdot T_0} - 1 \right) \cdot \left[\frac{\lambda_c(T_0)}{\lambda_c(T)} \right]^5 \right]$

Узагальнена формула визначення температури одноканальною широкоспектральною (квазімонохроматичною) пірометрією має вигляд:

$$\frac{1}{T_{уз}} = \frac{\lambda_0}{C_2} \cdot \ln \left[1 + \frac{1}{t} \left(\exp \frac{C_2}{\lambda_0 \cdot T_0} - 1 \right) \cdot K \right], \tag{1}$$

де залежно від методу квазімонохроматизації шляхом використання різних видів ЕДХ використовуються відповідні значення λ_0 (довжина хвилі максимуму апаратної функції) та К згідно таблиці

Таблиця 3

Метод визначення умовної температури одноканальної широкополосної пірометрії	Вид ЕДХ λ_0	К
Визначення температури з використанням квазімонохроматичних методів на основі ЕДХ для інтервалу температур	ЕДХ для інтервалу температур λ_{TOT}	1
Визначення температури з використанням квазімонохроматичних методів на основі методу референтної довжини хвилі та коректуючого множника	Референтна ЕДХ λ_R	$\frac{R(T_0)}{R(T)}$
Визначення температури з використанням квазімонохроматичних методів на основі середньозваженої ЕДХ	Середньозважена ЕДХ λ_C	$\left[\frac{\lambda_C(T_0)}{\lambda_C(T)} \right]^5$

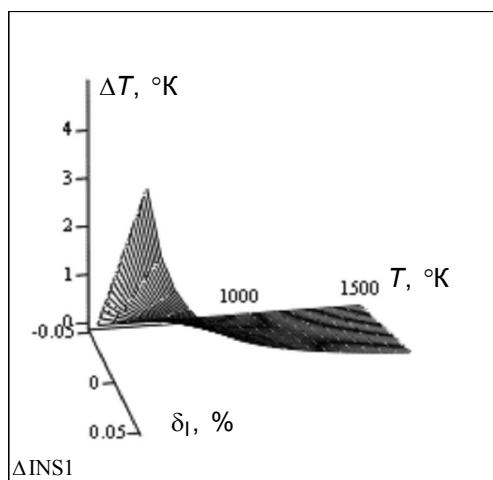
Таблиця 4

Вирази складових інструментальної та методичної похибок вимірювання температури за випроміненням методами пірометрії

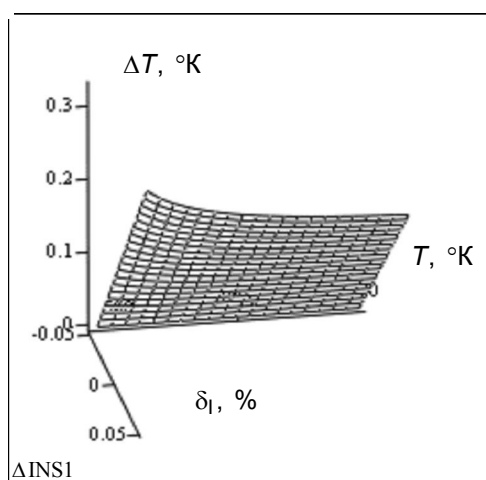
Методи пірометрії	Вираз складової інструментальної похибки	Вираз складових методичної похибки
Методи монохроматичної одноканальної пірометрії		
Метод співставлення	$\frac{C_2}{\lambda \cdot \ln(I)^2} \cdot \frac{\Delta I}{I}$	$-\frac{T_{\text{я}}^2 \cdot C_2 \cdot \lambda}{(T_z \cdot \lambda \cdot \ln(\varepsilon) + C_2)^2} \cdot \left[\ln(\varepsilon) \cdot \frac{\Delta \lambda}{\lambda} + \frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} \right]$

Розглянемо інструментальні та методичні похибки вимірювання умовної та термодинамічної температур одноканальної пірометрії (рис. 1–3). Проведене моделювання залежності похибки вимірювання температури згідно з табл. 4 одноканальною пірометрією залежно від зміни інтенсивності випромінення, довжини хвилі та коефіцієнта випромінення в таких діапазонах фізичних величин: температура – від 200 до 1500 °К; діапазон довжин хвиль – від 2 до 15 мкм; робочі довжини хвиль – 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 мкм; відносна зміна впливних факторів – від 0 до 10 %; коефіцієнт випромінення від 0,5 до 1.

Високу інструментальну точність одноканальної монохроматичної пірометрії визначає передавальний коефіцієнт інструментальної складової похибки, який для методу співставлення в межах використання формули Віна становить $C_2 / \lambda \ln(I)^2 < 50$. Значення похибки зменшується зі збільшенням робочої довжини хвилі та зростанням температури в діапазоні від 500 до 1500 °К та при 10-відсотковій зміні спектральної інтенсивності випромінення не перевищує 0,5 % (рис. 1).



(робоча довжина хвилі $\lambda_p = 2$ мкм)



(робоча довжина хвилі $\lambda_p = 14$ мкм)

Рис. 1. Температурна залежність складової інструментальної похибки одноканальної монохроматичної пірометрії від зміни спектральної інтенсивності випромінення

На протигагу цьому значною є методична похибка вимірювання температури даним методом, спричинена неточністю інформації про значення та зміни робочої довжини хвилі і коефіцієнта випромінення. Складова методичної похибки від зміни λ має мінімальні значення порядку декілька градусів у короткохвильовій області спектра та зростає з температурою та робочою довжиною хвилі (рис. 2).

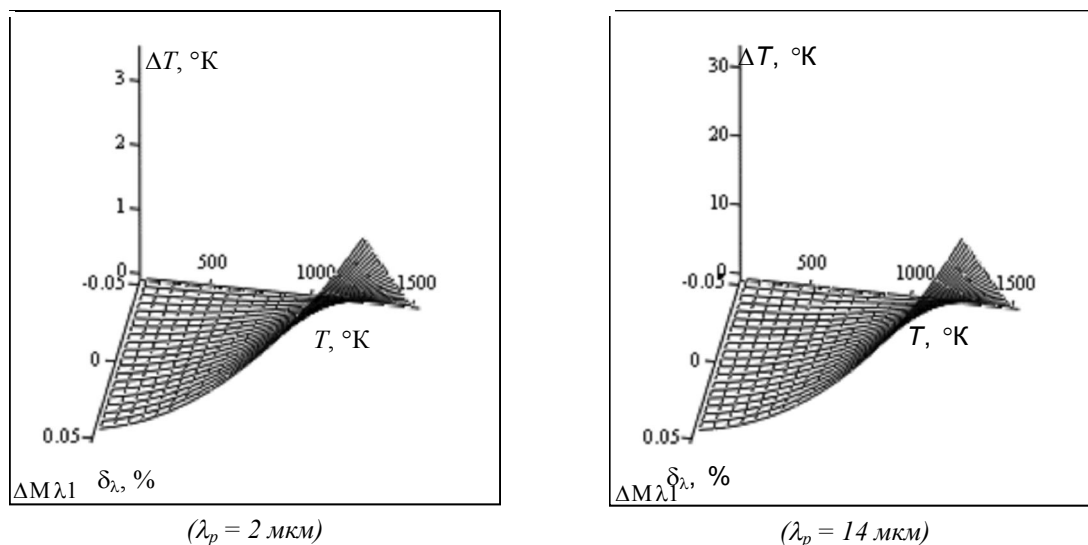


Рис. 2. Температурна залежність складової методичної похибки від зміни λ одноканальної монохроматичної пірометрії відносно зміни значення робочої довжини хвилі

Але основний негативний вплив на точність монохроматичної одноканальної пірометрії має методична складова похибки, спричинена неточністю інформації про значення коефіцієнта випромінення об'єкта, яка різко зростає зі зростанням температури та робочої довжини хвилі (рис. 3).

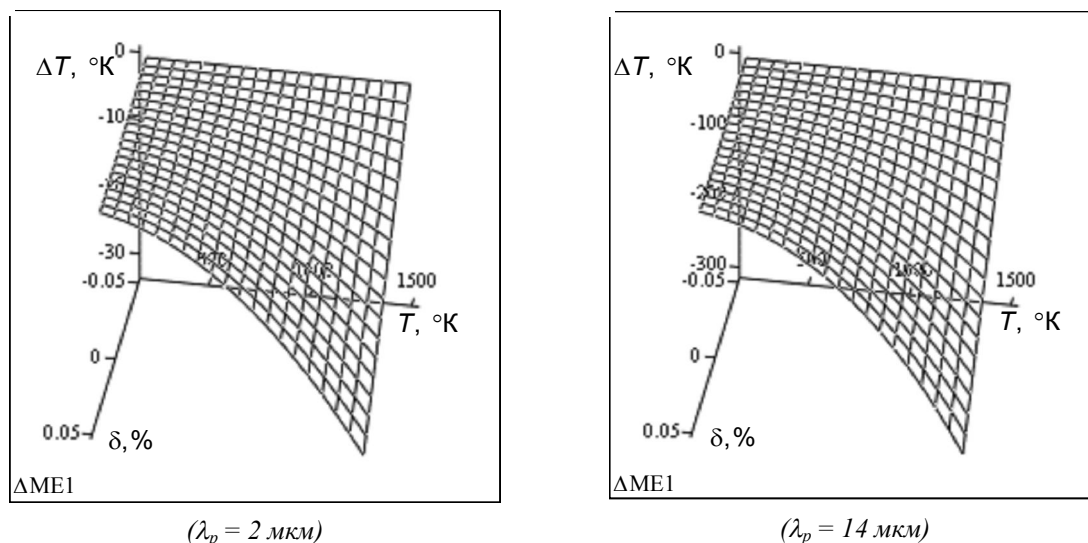


Рис. 3. Температурна залежність складової методичної похибки від зміни ϵ одноканальної монохроматичної пірометрії відносно зміни значення коефіцієнта випромінення

Висновки.

Результати досліджень свідчать про те, що метод одноканальної пірометрії доцільно застосовувати для вимірювання температури в діапазоні температур від 500 до 1500 °К тільки у короткохвильовій області спектра при високих значеннях коефіцієнта випромінення досліджуваної поверхні, де похибка вимірювання температури не перевищуватиме 5 %. Недоліками даного методу вважаються значна залежить похибки вимірювання від точності визначення коефіцієнта випромінення досліджуваної поверхні та ослаблення спектральної інтенсивності випромінення, яка сприймається приймачем,

внаслідок використання короткохвильової робочої області спектра, що призводить до зменшення співвідношення сигнал/шум.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Рибо Г.* Оптическая пирометрия. – М.: Л: Гостехтеориздат, 1934. – 455 с.
2. *Гаррисон Т.Г.* Радиационная пирометрия. – М: Мир, 964. – 248 с.
3. *Свет Д.Я.* Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения. – М: Наука, 1968. – 236 с.
4. *Гордов А.Н.* Основы пирометрии. – М.: Metallurgia, 1971. – 446 с.
5. *Назаренко Л.А. Гоц Н.Є.* Способы высокоточного безконтактного измерения температуры по инфракрасному излучению. – Systemy informacyjne w kształceniu technicznym. Red Antoni Swic Wydawnictwa Uczniiane Politechniki Lubelskiej, Lublin-2005. – Pp. 122–130.

ГОЦ Наталія Євгенівна — кандидат технічних наук, доцент кафедри метрології, стандартизації та сертифікації Національного університету “Львівська політехніка”.

Наукові інтереси:

– методи вимірювання температури.

Подано 21.01.2007

Гоц Н.С. Огляд одноканальної пірометрії
Гоц Н.Е. Обзор одноканальной пирометрии
Gotz N.E. The review of single-channel pyrometry

УДК 621.317

Огляд одноканальної пірометрії / Н.С. Гоц

В роботі виконано аналіз методів безконтактного вимірювання температури з використанням одноканальної пірометрії. Досліджені похибки вимірювання температури даними методами. Вказані переваги та умови застосування методів одноканальної пірометрії.

УДК 621.317

Обзор одноканальной пирометрии / Н.Е. Гоц

В работе проведен анализ методов бесконтактного измерения температуры с использованием одноканальной пирометрии. Исследованы ошибки измерения данными методами. Указаны преимущества и недостатки использования методов одноканальной пирометрии.

УДК 621.317

The review of single-channel pyrometry / N.E. Gotz

In work the analysis of methods of contactless measurement of temperature with use of single-channel pyrometry is lead. Mistakes of measurement are investigated by the given methods. Advantages and lacks of use of methods of single-channel pyrometry are specified.