

АНАЛІЗ МЕТРОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ЗАСОБІВ ПІРОМЕТРІЇ

Проведено аналіз засобів пірометрії з точки зору підвищення надійності метрологічних характеристик. Проаналізовано причини виникнення похибок в засобах пірометричної техніки. Проведено огляд технічних характеристик пірометрів та наведені рекомендації щодо вибору конкретних типів пірометрів в залежності від об'єкту вимірювання.

Ключові слова: пірометр, пірометрія, абсолютне чорне тіло, засоби вимірювальної техніки, показник візування.

Проведен анализ средств пирометрии с точки зрения повышения надежности метрологических характеристик. Проанализированы причины возникновения погрешностей в средствах пирометрической техники. Проведен обзор технических характеристик пирометров и приведены рекомендации по выбору конкретных типов пирометров в зависимости от объекта измерения.

Ключевые слова: пирометр, пирометрия, абсолютное черное тело, средства измерительной техники, показатель визуирования.

Analyzed pyrometers means in terms of improving the reliability of metrological characteristics. Analyzed the causes of errors in mass pyrometric technology. The review of the technical characteristics and pyrometers given advice on choosing specific types of pyrometers, depending on the measurement object.

Keywords: pyrometer, pyrometry, absolute black body, measuring equipment, the rate of sight.

Розвиток різноманітних галузей народного господарства в Україні та світі значним чином залежить від контролю стану параметрів технічного устаткування, що визначає якість, конкурентоспроможність та собівартість продукції, що виготовляється. Для контролю стану технічного устаткування необхідний постійний контроль режимів його роботи. Одним з найважливіших і найбільш впливаючих на технологічний процес параметрів є температура. У промисловому виробництві контроль температури та своєчасна інформація про температурний стан є запорукою зростання якості та зумовлення зниження собівартості виготовленої продукції. Тому точність, з якою буде виміряна температура, має важливе значення. Це говорить про необхідність постійного пошуку шляхів покращення відомих та створення нових методів та засобів вимірювання температури з високими метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

Як показує проведений аналіз, найбільшого розвитку та широкого впровадження заслуговують безконтактні методи вимірювання температури, з огляду на їх специфіку, оскільки вони мають, зокрема, одну дуже важливу особливість з поміж інших методів вимірювання температури - не спотворюють температурне поле об'єкта вимірювання. Що стосується безконтактної термометрії, то прогрес фундаментальних наукових досліджень у цій галузі за останні кілька десятиріч є незначним. По сьогоднішній день існує ряд суттєвих невіршених проблем, вирішення яких дало б можливість підвищити точність та метрологічну надійність безконтактних засобів вимірювання температури.

Відомо, що існують два основних класи засобів вимірювання температури - контактні і безконтактні.

Принцип роботи контактних засобів вимірювання температури оснований на безпосередньому контакті первинного вимірювального перетворювача температури з досліджуванним об'єктом. На точність таких засобів вимірювання температури впливають такі недоліки, притаманні контактному способу вимірювання температури:

- спотворення температурного поля об'єкта при введенні в нього термоперетворювача;
- відмінність температури термоперетворювача від істинної температури об'єкта;
- обмеження верхньої межі вимірювання температури, спричинене залежністю електрофізичних властивостей матеріалів, з яких виготовлені термоперетворювачі.

Крім того, контактним способом не може бути вирішений ряд завдань вимірювання температури в недоступних об'єктах та таких, що рухаються.

Отже, джерелами похибок контактних засобів вимірювання температури можуть бути, зокрема, зміна температури об'єкта внаслідок зміни його температурного поля внесеним термоперетворювачем, а також неминуче відведення чи притік тепла, обумовлені різницею температур термоперетворювача й об'єкта в результаті теплообміну термоприймача з навколишнім середовищем.

Безконтактним засобам вимірювання температури властиві, зокрема, похибки, пов'язані з тим,

що фундаментальні фізичні закони, які лежать в основі їх роботи, справедливі лише для абсолютно чорного тіла (АЧТ), від якого за властивостями випромінювання відрізняються всі реальні випромінювачі (тіла і середовища). Згідно закону Кірхгофа будь-яке фізичне тіло випромінює енергії менше ніж АЧТ, нагріте до тієї ж температури. Тому безконтактні засоби для вимірювання температури, що проградуєвані за АЧТ, при вимірюванні температури реального об'єкта покажуть іншу температуру, аніж його дійсна термодинамічна. Таким чином, точність вимірювання температури, при цьому, значним чином залежить від адекватності відтворення умов градування та експлуатації безконтактних засобів.

На підставі аналізу закону Планка можна виділити три основні напрями створення засобів визначення температури безконтактним способом. А саме:

- радіаційна або ж інтегральна (повного випромінювання) пірометрія, що ґрунтується на використанні закону Стефана-Больцмана;
- оптична (за яскравістю) пірометрія, яка базується на аналізі енергетичних характеристик, зокрема, монохроматичного випромінювання;
- пірометрія спектрального відношення, в основі якої є співвідношення Віна. Таким чином, як показує проведений аналіз, згадані вище напрями пірометрії ґрунтуються на використанні часткових випадків закону Планка для АЧТ.

Вибір конкретного типу пірометра для застосування диктується конкретним діагностичним завданням та вартістю устаткування. Наприклад, квазімонохроматичний пірометр є найбільш придатним для високотемпературної діагностики, тому що при $\lambda T < 2,876 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$ (область Віна) спектральна інтенсивність випромінювання надзвичайно швидко зростає з температурою, що забезпечує високу точність вимірювань, а пірометри повного випромінювання, що вимірюють так звану радіаційну температуру, є корисними для вимірювання відносно низьких температур.

На відміну від багатьох інших галузей вимірювальної техніки пірометрія характеризується доволі великою кількістю систематичних похибок - як інструментальних, так і методичних. Інструментальні похибки є наслідком недоліків, властивих самим пірометрам. Вони можуть бути зменшені або й вилучені при удосконаленні засобів вимірювань: термостабілізації критичних до коливань температури вузлів, електромагнетним та терморадіаційним екрануванням, застосуванням більш чутливих первинних сенсорів, прецизійним калібруванням і т.д.

На відміну від інструментальних, методичні похибки - це ті похибки, котрі притаманні відповідному методу вимірювань. Вони виникають незалежно від того, наскільки добре калібровані засоби вимірювань. Методичні похибки можна вилучити шляхом вибору приладу з кращими метрологічними характеристиками, без зміни методики вимірювань. Адже в пірометрії вони є наслідком того, що вимірювальні сигнали, які генеруються приймачами випромінювання, визначаються не тільки температурою вимірюваної поверхні, але і її випромінювальною здатністю. Саме неврахування або неправильне врахування останньої призводить до появи великої кількості методичних похибок.

Проте, існують і інші, не менш вагомні чинники впливу на точність безконтактних засобів вимірювання температури. Що ж стосується радіаційної пірометрії, основними джерелами виникнення методичних похибок вимірювання температури радіаційним пірометром є те, що:

1) значення коефіцієнта випромінювальної здатності тіла $\varepsilon(T)$ залежить від температури та стану поверхні і може змінюватись в часі внаслідок утворення оксидної плівки та інших процесів. Зазвичай для розрахунків дійсної температури використовують табличне значення $\varepsilon(T)$, що може привести до значної похибки.

2) показник візування може не відповідати номінальному значенню (тобто зображення об'єкту дослідження не закриває повністю поле зору сенсора приладу), внаслідок чого виміряне значення температури може бути заниженим.

3) запиленість та загазованість проміжного між об'єктом та приймачем середовища (випромінювання об'єкту частково поглинається у повітрі парами води, вуглекислим газом і частинками пилу, тощо).

4) прилад може нагріватись в процесі вимірювання.

Похибки вимірювання температури яскравісним пірометром включають: інструментальні похибки і варіації показів пірометра в різних точках шкали; похибки внаслідок зміни номінальної статичної характеристики пірометричної лампи, а також внаслідок зміни характеристик елементів оптичного каналу, а також методичну - суб'єктивність оцінки пірометра та при візуальному порівнянні яскравостей об'єкту та нитки пірометричної лампи.

Пірометрія спектрального відношення полягає у вимірюванні, знову ж таки, певної уявної температури, так званої «колірної температури» об'єкта за відношенням інтенсивностей потоку випромінювання в двох певних ділянках спектру, кожна з яких характеризується певною ефективною

довжиною хвилі. Такий принцип вимірювання температури дозволяє дещо зменшити негативний вплив на метрологічні характеристики пірометрів спектрального відношення згаданих вище недоліків, які притаманні радіційним пірометрам.

Так, залежність сигналу від відстані до вимірюваного об'єкта однакова для обох приймачів пірометра спектрального відношення, тому на відношення сигналів вона не впливає; форма вимірюваного об'єкта, запиленість і загазованість проміжного середовища однаково впливають на сигнали з обох приймачів, залишаючи, при цьому, незмінним їх відношення. Пірометри спектрального відношення нечутливі до бічного засвічення від великорозмірних об'єктів, наявності невеликих непрозорих об'єктів у полі зору пірометра, до наявності захисних стекол, наприклад стекол оглядових вікон у вакуумних камерах.

Основною перевагою пірометрів даного типу слід вважати те, що для прецизійного вимірювання термодинамічної температури немає потреби у точному визначенні значення показника випромінювальної здатності ϵ . Іншими словами, оскільки відмінність значення ϵ вимірюваного об'єкта від одиниці найчастіше призводить до однакового зменшення сигналів від двох приймачів, і як уже було сказано вище, при цьому залишається незмінним їх відношення, що й не має негативного впливу на результат вимірювання.

Проте, слід мати на увазі, що при застосуванні засобів пірометрії спектрального відношення є ризик появи високого значення похибки в тих випадках, коли об'єкт вимірювання характеризується селективним випромінюванням, тобто значення показника випромінювальної здатності ϵ при одній і тій же температурі різко змінюється з довжиною хвилі.

Технічні характеристики пірометрів.

Оптична роздільна здатність (показник візування). Оптична роздільна здатність – один з найважливіших параметрів пірометра – визначається як відношення діаметра плями (кола) на досліджуваній поверхні до відстані від спостерігача до об'єкта. Сучасні пірометри можуть мати показник візування порядку 300:1 (рис. 1), проте на практиці буває достатньо і значно менших значень. Показник візування необхідно підбирати в залежності від відстані, на якій збирається проводити вимірювання та від розмірів об'єкта.

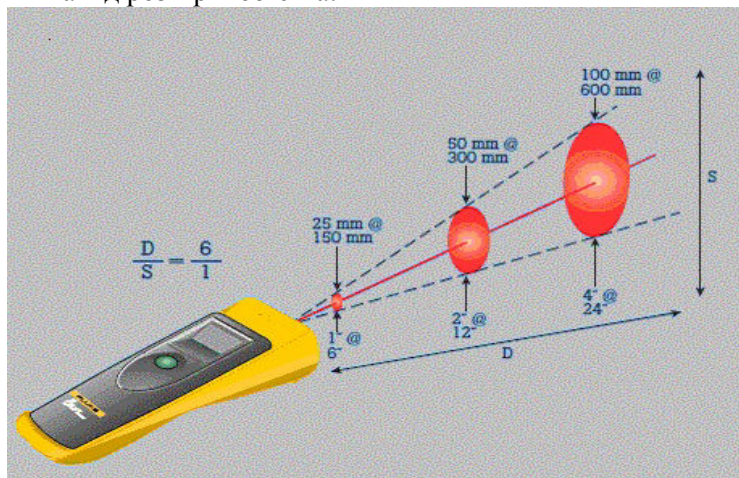


Рис. 1. Зміна показника візування в залежності від відстані до об'єкта

При неправильному націлюванні точність отриманих результатів буде під питанням. Необхідно, щоб діаметр плями був менший або в крайньому випадку співрозмірний з областю, з якої знімаються покази. Ідеально – в два рази менший, але аж ніяк не більший. В такому випадку захоплюються сусідні об'єкти і результати вимірювань будуть суттєво спотворені.

Випромінювальна здатність (коефіцієнт емісії). Даний параметр називають ще коефіцієнтом чорноти. Він визначає здатність того чи іншого тіла випромінювати в інфрачервоній області спектру. Розраховується як відношення енергії, яку випромінює поверхня за даної температури, до енергії випромінювання абсолютно чорного тіла за тієї ж температури.

Абсолютно чорне тіло – це деяка фізична абстракція, яка проте знайшла широке застосування в термодинаміці, астрофізиці, та ін. галузях науки. Це тіло, що здатне поглинати електромагнітне випромінювання абсолютно всіх довжин хвиль, а також випромінювати теплове випромінювання. При чому спектр випромінювання абсолютно чорного тіла визначається тільки його температурою, а інтенсивність в залежності від частоти описується законом Планка.

Коефіцієнт емісії може мати значення від дуже малих, порядку 0,1 до 1. Пірометри більш дорогих моделей мають можливість ручного налаштування коефіцієнта емісії. Неправильне встановлення даного параметра вносить найбільші похибки в процес вимірювання температури. Щоб

не помилитись, варто скористатись спеціальними таблицями, в яких наведено значення коефіцієнта емісії різноманітних матеріалів та ступеня обробки поверхні. Суттєво впливає на коефіцієнт емісії наявність оксидної плівки на поверхні. Так, випромінювальна здатність окисленої сталі 0,85, а полірованої поверхні – 0,075. Також, цей параметр залежить від довжини хвилі випромінювання. Для коротких довжин хвиль коефіцієнт емісії високий. Крім того, короткохвильові яскравісні пірометри зазвичай менше піддаються впливу атмосферного поглинання. Для високоточних вимірювань рекомендується використовувати радіаційні безконтактні термометри (пірометри), що працюють в максимально короткохвильовій області. Таким чином ми підійшли до ще однієї важливої технічної характеристики пірометра:

Спектральний діапазон, або ефективна довжина хвилі. Визначається як проміжок довжин хвиль, в якому чутливість інфрачервоного термометра складає 50% від максимуму чутливості. Може також наводитись і основна (ефективна) довжина хвилі та ширина смуги, в якій досягається половина від максимального значення чутливості. Як правило, наводиться в мкм чи нм, для широкополосних пірометрів наводиться проміжок довжин хвиль, а для монохроматичних – ефективна довжина хвилі.

Отже, для того щоб підібрати оптимальну модель пірометра, яка відповідає саме Вашим задачам і потребам, радимо дати відповіді на наступні питання.

- Визначтесь, в якому температурному діапазоні Ви будете працювати і з якими об'єктами. Від цього залежить складність приладу, а відповідно і його вартість. Якщо температурний діапазон не широкий, то немає потреби купувати дорогі пірометри. І навпаки, для прецизійних високотемпературних вимірювань в складних виробничих умовах варто звернути увагу на більш дорогі моделі. Максимально можливий температурний діапазон для пірометрів від -50 до 3000 °С.

- Аналогічно, відстань, з якої буде проводитись вимірювання, та розміри досліджуваного об'єкта. Для цього підберіть відповідний коефіцієнт візування. Для вимірювання температури малих об'єктів на великих відстанях варто обирати інфрачервоні термометри з високим коефіцієнтом візування.

- В яких умовах буде експлуатуватись пірометр. Для кожного приладу зазначається діапазон температур та вологості, в яких він буде нормально функціонувати та матиме незмінні метрологічні характеристики. Тут варто врахувати можливість калібрування приладу за умови теплового удару, а також збереження точності вимірювань при різкій зміні температур. Правильно підібрана модель забезпечить довгу і ефективну експлуатацію пірометра.

- Визначтесь з технічними вимогами до точності отриманих результатів та можливої похибки. Є багато моментів, що можуть впливати на точність отриманих результатів.

- Зверніть увагу також на спосіб відображення інформації. Сучасні пірометри як правило оснащені рідкокристалічним дисплеєм, на якому відображаються поточні результати вимірювань. Більш складні моделі можуть мати функції усереднення, мінімального та максимального значення, реєстрації даних, підключення до комп'ютера з метою подальшої обробки отриманих результатів.

1. Брао І. Пошук шляхів підвищення метрологічної надійності засобів багатоканальної пірометрії. Технічні вісті 2015/1(41).2(42). С. 107-110.

2. Температурные измерения. Справочник/ Под ред. Герасченко О.А. Киев: Наукова думка, 1989.

3. Dr. Alexander Dmitriyev. Laser pyrometry offers practical temperature measurement. Heat treating progress, may/june 2005.

4. Куинн Т. Температура/ Пер. с англ. - М.: Мир, 1985.

5. Michalski, L., Eckersdorf, K., Kucharski, J., & McGhee, J. (2001). Temperature Measurement Second Edition.