

УДК 006.91+536.5

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВІЗОРІВ У ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ

Н.Є. Гоц, доктор технічних наук, доцент Національного університету "Львівська політехніка"

Ю.М. Дзіковська, аспірант Національного університету "Львівська політехніка"

Р.В. Кочан, доктор технічних наук, доцент Національного університету "Львівська політехніка"



Н.Є. Гоц

Ю.М. Дзіковська

Р.В. Кочан

Проведено аналіз застосування тепловізорів для вимірювання температури та градієнта температури у нормальних та робочих умовах експлуатації. Сформульовано особливості використання тепловізорів у промисловості. Визначено фактори, які безпосередньо впливають на результати вимірювань температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням. Показано причини виникнення методичної похибки вимірювання температури за випроміненням у реальних умовах виробництва. Обґрунтовано необхідність проведення додаткового калібрування тепловізорів у робочих умовах та запропоновано використовувати для цього протяжний еталонний випромінювач, який є сірим випромінювачем.

The application of thermal imagers for temperature measurement and temperature gradient in normal and working conditions is analyzed. The features of thermal imagers application in industry are formulated. The impact factors that influence on the measurement results of temperature and temperature gradient by infrared radiation are defined. The reasons of the methodological error of temperature measurement by radiation in real conditions of production are shown. The necessity of additional calibration of thermal imagers in working conditions is justified and the application of the extended reference emitter, which is gray radiator, for this purpose is proposed.

Постановка проблеми. У сучасних умовах у різних галузях виробництва для контролю за функціонуванням та надійністю роботи промислових об'єктів

широко застосовується безконтактний метод вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням із використанням тепловізорів. Аналіз теплових станів об'єкта дозволяє отримати інформацію про порядок його функціонування та можливі зміни, а просторово-часовий розподіл температури поверхні є носієм інформації про його зовнішню та внутрішню структуру, приховані дефекти та місце їх знаходження [1].

Але основна *проблема* застосування тепловізійної техніки в промисловості — це низька точність вимірювання температур [2]. Тому *метою* цієї статті є аналіз особливостей застосування тепловізорів для вимірювання температури та градієнта температури в робочих умовах виробництва та формування шляхів вирішення цієї проблеми.

Зважаючи на це, необхідно вирішити такі *завдання*:

- проаналізувати сфери застосування тепловізорів у промисловості;
- провести теоретичний огляд особливостей вимірювання температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням в умовах виробництва;
- сформулювати вимоги до методики зменшення дії впливних факторів на результати вимірювання температури та градієнта температури в реальних умовах виробництва.

Аналіз досліджень та публікацій. Тепловізор є засобом вимірювання, який служить для визначення температури та градієнта температури за інфрачервоним випроміненням із подальшою візуалізацією теплового поля об'єкта на екрані. Тепловізори застосовуються для вимірювання температури та градієнта температури в різних сферах діяльності людини, а саме з метою:

- 1) візуалізації теплових полів медичних об'єктів;
- 2) дистанційного визначення розподілу температури в енергетиці та металургії;
- 3) виявлення та реєстрації дефектів (у тому числі і мікродефектоскопія) [3];
- 4) глобального екологічного моніторингу;
- 5) застосування в наземних та супутникових системах;
- 6) проведення наукових досліджень тощо.

Серед переваг використання тепловізорів можна відзначити таке:

- дистанційність проведення вимірювань;
- оперативність отримання результатів дослідження та можливість їх швидкого опрацювання;
- можливість контролю об'єктів із будь-яких матеріалів;
- можливість дослідження динамічних та статичних теплових процесів, процесів вироблення, перетворення, передавання, споживання та консервації енергії різних видів;
- відсутність спотворень теплового поля об'єкта під час вимірювання;
- можливість реалізації вимірювань в агресивному середовищі, в умовах радіоактивного випромінювання та високого електричного потенціалу;
- можливість прогнозування теплової деградації виробів;
- можливість суцільного та безперервного дослідження об'єкта;
- проведення експрес-контролю теплового стану промислових об'єктів із метою діагностування та прогнозування порядку їх функціонування;
- можливість застосування в автоматизованих системах контролю та управління технологічними процесами [4].

На основі узагальнення даних про метрологічні характеристики тепловізорів світових виробників (Fluke, CEM, DALI, Electrophysics, Testo AG, Wuhan Guide Infrared Co., IPI, IRay Technology Co., Irisys, IRtek, JENOPTIK/InfraTec, Chauvin Arnoux, SAT Infrared Technology та ін.) можна в такий спосіб охарактеризувати їх сучасні моделі. Переважно це є односмугові засоби вимірювання, які працюють у середній та теплій інфрачервоної ділянках спектра у широкому температурному діапазоні та мають такі метрологічні характеристики [5]:

Температурний діапазон вимірювання, °C	-20...+1200
Робочі спектральні діапазони, мкм	3,0...5,0 8,0...14,0
Швидкодія, с	до 10 ⁻⁶
Температурна чутливість, мК, менше	20

Але необхідно відзначити таке. Незважаючи на те що точність вимірювання температури, яка вказана виробниками в супровідній документації, знаходиться в межах $\pm(2...5) \%$ або $\pm(2...5) \text{ }^\circ\text{C}$ (вибирається, що є більшим), точність результатів вимірювання є значно нижчою. Цю невідповідність спричинено тим, що в супровідній документації до тепловізорів вказано значення лише температурної чутливості або основної похибки вимірювання температури, що відповідає інструментальній складовій похибки вимірювання.

Значний вплив на точність результатів тепловізійного дослідження має методична складова похибки, яка зумовлена впливом випромінювальних власти-

востей поверхні об'єкта та впливом таких параметрів робочих умов експлуатації, як фонове випромінювання сторонніх об'єктів та пропускання проміжного середовища. Також значний вплив на результати має суб'єктивна складова похибка від правильності виконання вимірювань та введення необхідних поправок на випромінювальні властивості складних за формою та матеріалом об'єктів. У дійсності похибка результатів вимірювання від сумарного впливу цих факторів у робочих умовах може становити десятки відсотків [6].

Отже, ефективність застосування тепловізорів у промисловості залежить не тільки від їх метрологічних характеристик, програмного забезпечення при опрацюванні результатів дослідження, але й від можливості врахування вищерозглянутих впливних факторів та реалізації методики виконання вимірювань.

Виклад основного матеріалу. Проведемо дослідження впливних факторів, які безпосередньо впливають на результати вимірювань випромінювання згідно із законами Планка та Кірхгофа в нормальних умовах калібрування.

Зазвичай повірка та калібрування тепловізорів відбуваються в калібрувальній лабораторії згідно з ДСТУ 3194:2005 [7]. За нормальних умов похибка засобу вимірювання, що повіряється, від дії сукупності впливних факторів не має перевищувати 35 % границі допустимої основної похибки засобу вимірювання. Ці умови передбачено ГОСТ Р 8.619-2006 [8], де вказано, що окрім умов, зазначених у ГОСТ 8.395-80 [9], повинні враховуватися вимоги експлуатаційних документів на тепловізор конкретного типу. Окрім того, у ДСТУ 3194:2005 [7] границі допустимих абсолютних похибок робочих засобів вимірювальної техніки мають бути не більше 8 °C у діапазоні від -50 до 961,78 °C. Вимірювання температури за випромінюванням у промисловості реалізуються тепловізорами, які за результатами калібрування в калібрувальній лабораторії за нормальних умов визнаються придатними.

Значення параметрів у нормальних умовах калібрування знаходяться в таких межах:

Температура навколишнього повітря, °C	20±5
Відносна вологість повітря, %	65±15
Атмосферний тиск, кПа	101,325±3,000
Напруга живлячої мережі, В	220±4,4
Частота змінного струму, Гц	50±0,5

Особливими умовами при калібруванні тепловізорів є:

- відсутність потужного фонового випромінювання, адже їх калібрування відбувається із використанням еталонного випромінювача у вигляді моделі протяжного чорного тіла із коефіцієнтом випромінювання, близьким до 1, тому при калібруванні фактор впливу фонового випромінювання нівелюється. Безумовно, у промислових умовах для уникнення такого впливу намагаються проводити вимірювання

у похмурий день, усунути вплив додаткових джерел енергії, у цехах мінімізувати розміри віконних прорізів тощо;

- тепловізори, що калібруються, та інші засоби вимірювання, що використовуються під час калібрування, перед початком перевірки повинні знаходитися за температури $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ не менше 6 годин;

- на тепловізор не повинні впливати: удари, вібрації, зовнішні електромагнітні поля, сторонні джерела випромінювань, що впливають на покази засобів вимірювань, пари кислот, лугів, а також газу, що викликають корозію.

Потік випромінювання, що надходить на оптичну систему тепловізора в нормальних умовах при калібруванні, описуємо виразом

$$\Phi(\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\tau_{\text{ПСНУ}}(\lambda, T) \cdot \varepsilon_{\text{ЕВ}}(\lambda, T) \cdot C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1}) d\lambda + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\tau_{\text{ПСНУ}}(\lambda, T) \cdot (1 - \varepsilon_{\text{ЕВ}}(\lambda, T)) \Phi(\lambda, T_{\text{ФВНУ}})) d\lambda,$$

де $\tau_{\text{ПСНУ}}(\lambda, T)$ – коефіцієнт пропускання проміжного середовища в нормальних умовах, значення якого наближається до 1; $\varepsilon_{\text{ЕВ}}(\lambda, T)$ – коефіцієнт випромінювання еталонного протяжного випромінювача, що використовується при калібруванні тепловізора в калібрувальній лабораторії; $\Phi(\lambda, T_{\text{ФВНУ}})$ – потік фонового випромінювання оточуючих предметів у нормальних умовах, що потрапляє на оптичну систему термометра випромінювання, який калібрується і значення якого відповідає температурі оточуючого середовища $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$; $\lambda_1 \div \lambda_2$ – робоча спектральна смуга оптично-приймальної системи термометра випромінювання; C_1 та C_2 – сталі.

Але в умовах виробництва значення впливних параметрів робочих умов відрізняють від значень у нормальних умовах, яких дотримуються при калібруванні тепловізорів у калібрувальних лаборато-

ріях. Також випромінювальні властивості реального технічного об'єкта відрізняються від випромінювальних властивостей еталонного випромінювача.

Зрозуміло, що забезпечення нормальних умов у реальних умовах промислового процесу є неможливим, вони істотно можуть різнитися від робочих умов експлуатації конкретних промислових об'єктів.

Таким чином, при відхиленні умов від нормальних, а саме в робочих умовах виробництва, з'являється додаткова похибка, що виникає додатково до основної похибки внаслідок відхилення якої-небудь із впливаючих величин від її нормального значення або внаслідок її виходу за межі нормальної області значень [6]. Зрозуміло, що в робочих умовах присутнім може бути інтенсивне сонячне випромінювання, інші потужні джерела випромінювання промислового середовища з істотно відмінною температурою від об'єкта дослідження. Окрім того, що коефіцієнт випромінювання досліджуваного об'єкта є меншим 1, його достовірне значення часто визначити неможливо. Для прикладу зазначимо, що відхилення температури оточуючого середовища на кожні 10°C спричинює додаткову похибку, значення якої дорівнює половині основної похибки засобу вимірювання [10].

Це призводить до того, що визначення реального значення температури за функцією калібрування тепловізора, встановленого в калібрувальній лабораторії в нормальних умовах, буде неможливим внаслідок впливу на інформативний сигнал низки неінформативних впливних параметрів, які характерні для конкретного технологічного процесу. Випромінювальні властивості об'єкта, фонове випромінювання, пропускання проміжного середовища в робочих умовах виробництва відрізняються від значень цих впливних факторів у нормальних умовах. Дію впливних факторів на результати вимірювання проілюстровано на рис. 1, де визначення значення температури згідно з функцією калібрування $S = f(T)$ [6] відповідає послідовності точок 1, 2, 3.

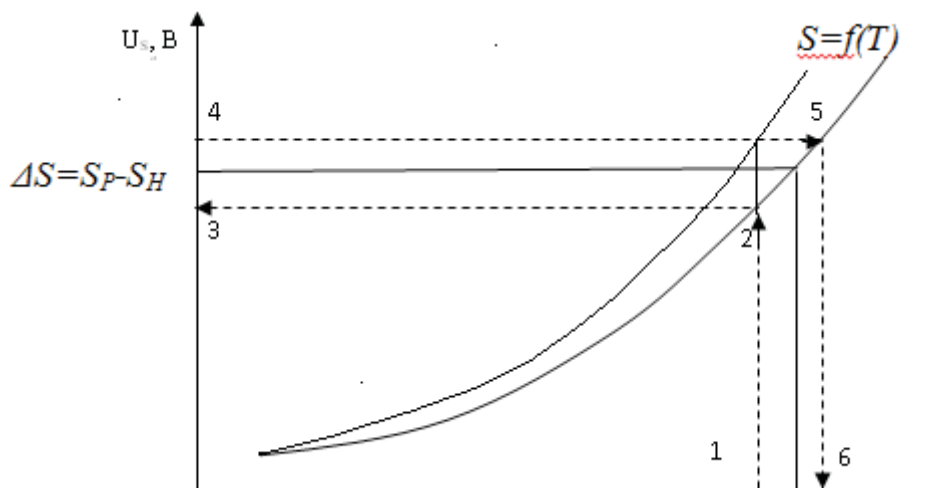


Рис. 1. Дія впливних факторів у робочих умовах виробництва на значення вимірюваної температури, яке визначається за калібрувальною функцією, встановленою в нормальних умовах

У процесі вимірювань в умовах виробництва значення температури T визначається за значенням вихідного сигналу – це послідовність точок 3, 2, 1. Але за умови дії впливних факторів у робочих умовах виробництва значення вихідного сигналу окремого приймача випромінювання тепловізора $S_{вих}$ змінюється на значення $\Delta S = S_p - S_H$. Тому визначення температури по $S_{вих}$ відбувається за точками 4, 5, 6, що призводить до додаткової методичної похибки вимірювання температури термометром випромінювання, спричиненої впливними факторами. Отже, покази відкаліброваного за еталонним випромінювачем у нормальних умовах тепловізора та покази при застосуванні його для вимірювання температури промислового об'єкта в робочих умовах експлуатації будуть різнитися. Це визначає похибку вимірювання температури за випромінюванням в умовах експлуатації.

Математично описати цей процес можна так. У нормальних умовах вихідний сигнал одного окремого спектрального каналу тепловізора з шириною спектральної смуги $\lambda_1 \div \lambda_2$ подамо виразом

$$S_H(\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda, T) \cdot \tau_{ПСРУ}(\lambda, T) \times \left[\varepsilon_{ЕВ}(\lambda, T) \cdot C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} + (1 - \varepsilon_{ЕВ}(\lambda, T)) \Phi(\lambda, T_{ФВРУ}) \right] d\lambda, \quad (1)$$

де $R(\lambda, T)$ – спектральна чутливість оптично-приймальної системи тепловізора у спектральній смузі $\lambda_1 \div \lambda_2$.

Зрозуміло, що в робочих умовах формула (1) лишається такою ж; відмінними є лише значення, які і спричиняють наявність додаткової похибки:

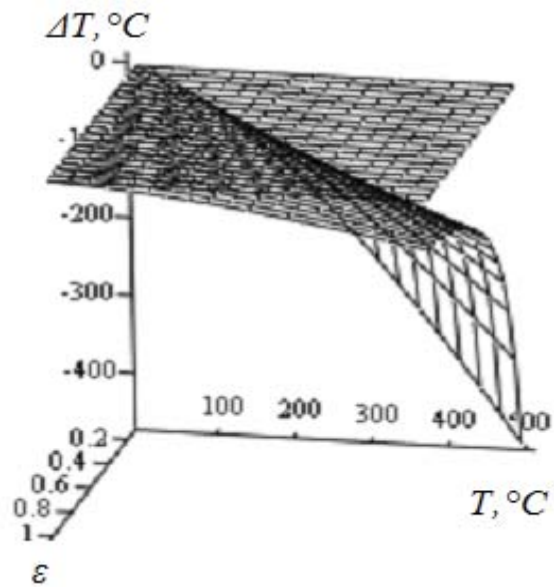


Рис. 2. Залежність методичної похибки вимірювання температури за випромінюванням від значення температури та коефіцієнта випромінювання, $T_{\Phi} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$S_p(\lambda, T) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda, T) \cdot \tau_{ПСРУ}(\lambda, T) \times \left[\varepsilon_{ОВ}(\lambda, T) \cdot C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} + (1 - \varepsilon_{ОВ}(\lambda, T)) \Phi(\lambda, T_{ФВРУ}) \right] d\lambda,$$

де $\varepsilon_{ОВ}(\lambda, T)$ – коефіцієнт випромінювання об'єкта вимірювання, який носить не сірий та селективний характер (залежить від кута випромінювання, від поверхні об'єкта).

Таким чином, виникає відхилення у результатах вимірювання, що призводить до різниці температур:

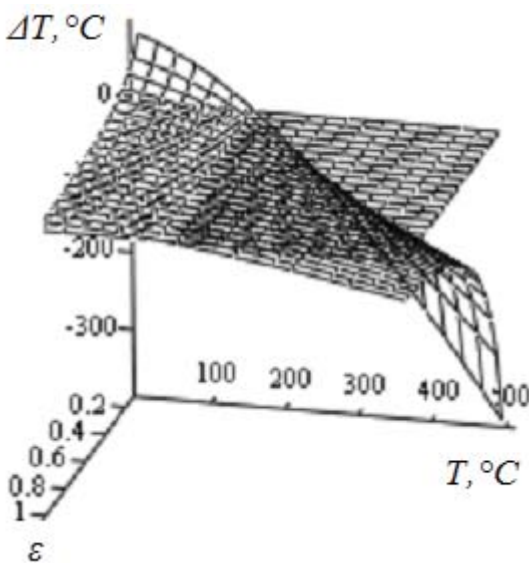


Рис. 3. Залежність методичної похибки вимірювання температури за випромінюванням від значення температури та коефіцієнта випромінювання, $T_{\Phi} = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$

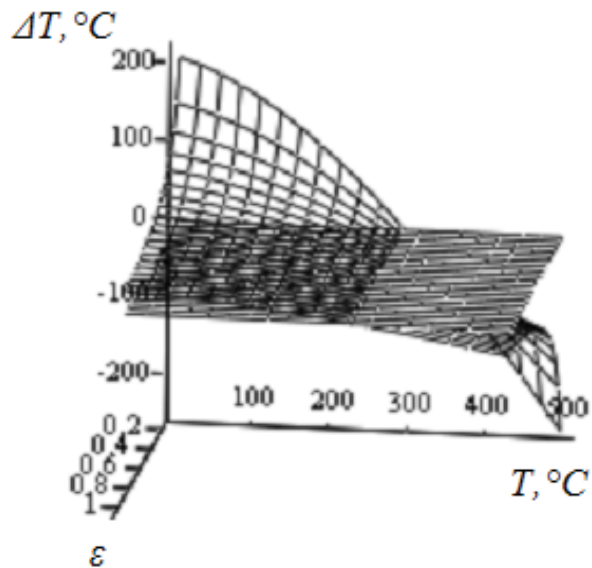


Рис. 4. Залежність методичної похибки вимірювання температури за випромінюванням від значення температури та коефіцієнта випромінювання, $T_{\Phi} = 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Назва метрологічної характеристики	Діапазон значень метрологічної характеристики			
	ОТИ №33464-06	IR-2100/301	ПЧТ 540/40/100	4000 Series НТВ
Діапазон робочих температур, °С	-53...+76	-5...+145	30...95	50...600
Спектральний діапазон, мкм	2,5...15	1...99	дані відсутні	2...14
Випромінювальна здатність ϵ	0,96±0,02		0,96±0,005	>0,93
Границя допустимого значення похибки відтворення радіаційної температури, °С	±0,5	±0,2	1 °С±0,6 % від установленної температури	±3,5 °С або 0,5 % (вибирається більше значення)

$$\Delta S = S_p - S_H \rightarrow \Delta T = T_p - T_H.$$

Отже, для підвищення точності та достовірності вимірювань виникає потреба у калібруванні тепловізорів безпосередньо перед використанням на конкретному промисловому об'єкті, адже похибка вимірювання під впливом цих факторів може становити десятки градусів. Це є також обґрунтованим із тієї точки зору, що необхідність проведення калібрування при експлуатації засобів вимірювальної техніки, на які не поширюється державний метрологічний нагляд, визначається їх користувачем. Відповідно виникає потреба у введенні поправки для забезпечення точності результатів вимірювання. Таким чином, формульне подання фізичного процесу ще раз підтверджує, що для цього необхідно проводити додаткове калібрування в робочих умовах.

Нами проведено моделювання методичної похибки результатів вимірювань з урахуванням дії впливних факторів. На рис. 2–4 наведено залежності методичної похибки вимірювання температури в діапазоні від 0 до 500 °С для об'єкта дослідження з коефіцієнтом випромінення 0,8 при дії фонового випромінення з температурою 20, 200 та 350 °С. Горизонтальна площина визначає місце розташування нульового значення методичної похибки. Лінія перетину площин являє собою місце розташування нульового значення методичної похибки при різних значеннях температури фонового випромінення.

За результатами моделювання встановлено, що значення методичної складової похибки в залежності від значень впливних факторів можуть становити десятки градусів. Отже, виникає потреба у введенні поправки для забезпечення необхідної точності результатів вимірювання.

Для калібрування тепловізорів у робочих умовах доцільне застосування випромінювачів у вигляді моделі протяжного чорного тіла. Метрологічні характеристики еталонних протяжних випромінювачів різних моделей та виробників наведено в таблиці.

Коефіцієнт випромінення еталонних протяжних випромінювачів знаходиться в межах 0,93...0,98. Водночас для проведення калібрування у робочих

умовах можуть бути використані протяжні випромінювачі, випромінювальна здатність яких носить сірий характер, що дозволило би врахувати вплив відбитого випромінення фону. Це, у свою чергу, може істотно підвищити точність проведених вимірювань температури за випроміненням.

Висновок. Отже, в умовах виробництва виникає обґрунтована необхідність додаткового калібрування тепловізора з метою визначення поправок до результатів вимірювання температури в робочих умовах експлуатації. Це може дозволити врахувати не лише значення коефіцієнта випромінення, але й пропускання проміжного середовища та вплив випромінення фону, які присутні в реальних умовах конкретного виробничого процесу, що сприятиме істотному зменшенню методичної похибки.

Подані пропозиції можуть бути внесені до методики виконання вимірювань тепловізором у реальних умовах експлуатації для підвищення точності практичних вимірювань. Водночас це дозволить розширити сферу ефективного застосування тепловізорів.

Список літератури

1. *Грабо В.В.* Математическая модель для диагностирования состояния изоляции работающей мощной электрической машины по ее тепловому портрету / В.В. Грабо, В.В. Грабо [Электронный ресурс] // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 1. – Режим доступу: <http://praci.vntu.edu.ua/article/download/1316/763>
2. *Госсорг Ж.* Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер. с фр. / Ж. Госсорг. – М.: Мир, 1988. – 399 с.
3. *Тепловизионная акустотермографическая дефектоскопия конструкционных материалов / Н.И. Базалеєв, В.В. Брюховецкий, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко // Вопросы атомной науки и техники. – 2011. – № 2. – С. 178–185. – (Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (97)).*
4. *Будадин О.Н.* Тепловой метод неразрушающего контроля и диагностики технического состояния материалов, изделий и конструкций / О.Н. Будадин [Электронный ресурс]. – Режим доступу: <http://www.dissercat.com/content/teplovoi->

- metod-nerazrushayushchego-kontrolya-i-diagnostiki-tekhnicheskogo-sostoyaniya-materiz
5. Основы термографии и тепловидения: учебник [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://baltech.kz/catalog.php?catalog=164>
 6. Інформаційно-вимірювальна техніка: у 2 т. Т. 1 / М.М. Дорожовець [та ін.]. – Львів: НУ “Львівська політехніка”, 2005. – 455 с.
 7. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань температури. Безконтактні засоби вимірювання температури: ДСТУ 3194:2005. – [Чинний від 2005-02-28]. – К.: Держспоживстандарт України, 2005. – 15 с.
 8. Государственная система обеспечения единства измерений. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки: ГОСТ Р 8.619-2006. – [Введ. 2006-07-24]. – М.: Стандартинформ, 2006. – 19 с.
 9. Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования : ГОСТ 8.395-80. – [Введ. 1981-07-01]. – М.: Изд-во стандартов, 2008. – 8 с.
 10. Засименко В.М. Основи теорії планування експерименту / В.М. Засименко. – Львів: ДУ “Львівська політехніка”, 2000. – 204 с.