

МОЧУРАД Олексій

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0009-0009-4891-8084>

ГОЦ Наталія

Національний університет «Львівська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-2666-2187>

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ, ЯКІ ВПЛИВАЮТЬ НА ЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ВИПРОМІНЕННЯ ПОВЕРХНІ

В статті проводиться аналіз коефіцієнту випромінювання, поверхонь у різних умовах. Розглянуто фізичний зміст коефіцієнту випромінювання, залежність його від кута випромінювання, температури поверхні матеріалу, обробки поверхні, довжини хвилі випромінювання. Проведені експериментальні дослідження впливу зміни випромінювальних властивостей поверхні матеріалу протягом часу її експлуатації, на значення коефіцієнту випромінювання, та розрахунковим методом визначили особливості впливу зміни довжини хвилі на вимірне значення температури.

Ключові слова: вимірювання, температура, безконтактний метод, коефіцієнт випромінювання, довжина хвилі.

MOCHURAD Oleksiy, HOTS Natalia

Lviv Polytechnic National University

ANALYSIS OF EMISSIVITY COEFFICIENTS

This article presents a comprehensive investigation of the emissivity coefficient of surfaces under various physical and operational conditions. The study emphasizes the fundamental meaning of emissivity, its dependence on radiation angle, surface temperature, material properties, degree of surface treatment, and radiation wavelength. Special attention is devoted to experimental observations of how emissivity evolves during the lifetime of a surface due to oxidation, contamination, or roughness changes, and how these modifications affect the accuracy of non-contact temperature measurements. A mathematical approach is also applied to examine the influence of wavelength variations on the measured temperature values.

The research demonstrates that emissivity is not a constant property but a parameter strongly determined by physical factors such as the geometry of observation, spectral range of measuring instruments, and thermal state of the material. For example, metallic surfaces typically exhibit low emissivity, which increases when oxide layers form at higher temperatures, whereas ceramics or dielectrics tend to maintain relatively stable but wavelength-dependent emissivity values. Furthermore, experimental results confirm that angular deviation from normal measurement can lead to significant errors exceeding 5 °C, while surface treatment—such as polishing or oxidation—also induces notable variations.

The experimental setup included measurements with pyrometers, contact thermometers, and specially designed calibration surfaces, enabling comparison of contact and non-contact results. The findings indicate that neglecting emissivity variations with wavelength or surface state can result in substantial measurement inaccuracies. In practical terms, this has a direct impact on industrial processes, product quality, and safety standards.

The outcomes highlight the necessity of considering emissivity as a dynamic factor in temperature diagnostics, especially when infrared thermography or pyrometric techniques are applied in engineering, metallurgy, and materials science. The conclusions propose further research into the interaction of emissivity with specific influencing factors, aiming to develop refined correction models and measurement methodologies. Such advancements are expected to enhance the reliability of thermal monitoring systems in diverse technical applications.

Keywords: measurement, temperature, non-contact method, emissivity coefficient, wavelength.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 14.08.2025

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ТА ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

При вимірюванні температури за випромінюванням, важливу роль відіграє значення коефіцієнту випромінювання поверхні. Вимірне значення температури залежить від випромінювальних властивостей об'єкту, його поглинальні властивості випромінювання, або відбивання теплової енергії, та від метрологічних характеристик засобу вимірювальної техніки, яким проводиться вимірювання. Випромінювальні властивості є індивідуальними для усіх поверхонь, та залежать від:

- кута випромінювання,
- температури поверхні матеріалу,
- ступінь/рівень обробки поверхні,
- довжини хвилі випромінювання тощо.

Тому для збільшення точності вимірювань температури поверхні за випромінюванням, актуальним є вивчення факторів які впливають на коефіцієнт випромінювання, а отже і на вимірне значення температури, з метою подальших детальних досліджень фізичних особливостей теплового випромінювання.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою наукової роботи є:

1. Розглянути фізичний зміст коефіцієнту випромінення.
2. Дослідити фактори які впливають на значення коефіцієнта випромінення.
3. Провести експериментальні дослідження коефіцієнту випромінення поверхні за час її експлуатації, та коефіцієнту випромінення при різних діапазонах довжин хвиль, за різних значень температури поверхні матеріалу.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Випромінення – це процес поширення енергії за допомогою електромагнітних хвиль. Випромінення може бути - інфрачервоне, видиме, ультрафіолетове, рентгенівське, гамма тощо.

Інфрачервоне випромінення займає діапазон довжин хвиль від 7 мкм до 14 мкм. Характеристика випромінювання об'єкта залежить від довжини хвиль, які він випромінює. Воно виникає за рахунок внутрішньої енергії речовини. Тому для непрозорих об'єктів теплове випромінення можна розглядати як поверхневе явище. Випромінення залежить від:

- температури об'єкта,
- особливостей навколишнього середовища,
- фізичних властивостей поверхні об'єкта.

Здатність випромінювати електромагнітне випромінення поверхнею об'єкта характеризується коефіцієнтом випромінення поверхні який характеризує ступінь здатності матеріалу випромінювати інфрачервоне випромінювання. Максимальна випромінювальна здатність приймається як одиниця. Тіл із максимальною випромінювальною здатністю в природі не існує, але решта об'єктів порівнюється за цією якістю.

Загалом, прозорі об'єкти можуть мати низький коефіцієнт випромінення поверхні, оскільки вони пропускають випромінення крізь себе. Формула для прозорих об'єктів враховує коефіцієнт поглинання, і коефіцієнт відбиття випромінення поверхні:

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (1)$$

де ρ - коефіцієнт відбиття поверхні,

τ - коефіцієнт пропускання об'єкта,

ε – коефіцієнт випромінення поверхні.

Дана формула показує, що коефіцієнт випромінення прозорого об'єкта залежить від її здатності відбивати, поглинати та пропускати випромінення.

Для непрозорих об'єктів коефіцієнт випромінення зазвичай вищий ніж у прозорих об'єктів, оскільки відсутнє пропускання випромінення в середині об'єкту:

$$\varepsilon + \rho = 1. \quad (2)$$

Значення коефіцієнта випромінення визначається шляхом, дослідження випромінювальних властивостей поверхні, вимірювань та розрахунків, але залежить від двох основних чинників, поданих в таблиці 1.

Таблиця 1

Класифікація факторів, які впливають на значення коефіцієнта випромінення

Основні чинники	Фактори, які впливають на значення коефіцієнта випромінення
Фізичні властивості поверхні досліджуваного об'єкта	Кут випромінення температури поверхні матеріалу
	Температури матеріалу
	Форма досліджуваної поверхні
	Матеріал поверхні
	Обробка та стан матеріалу поверхні
Методи визначення коефіцієнта випромінення	Довжина хвилі випромінення
	Спектральний діапазон засобів вимірювання, які використовуються для обчислення значення коефіцієнта випромінення
	Методика визначення коефіцієнта випромінення

Проведемо дослідження залежності коефіцієнта випромінення від фізичних властивостей поверхні досліджуваного об'єкта.

Вплив кута випромінення на виміряне значення коефіцієнта випромінення поверхні.

Кут під яким проводиться вимірювання температури за інфрачервоним випроміненням, (кут візування), є важливим, оскільки нерівність поверхні, нерівномірність її нагріву, та напрямок інфрачервоних

хвиль може суттєво впливати на результат вимірювання. Інфрачервоні хвилі можуть потрапляти на елементи поверхні, які будуть мати значно менше значення температури ніж інші, що може зіпсувати результати вимірювання.

Згідно рекомендацій від виробників засобів вимірювальної техніки за інфрачервоним випромінюванням, та інструкцій по експлуатації, дані вимірювання слід проводити під прямим кутом по відношенню до об'єкту вимірювання, за можливості монтувати вимірювальний прилад на штатив, це дозволить проводити серію вимірювань з однакової відстані, тим самим мінімізувати похибку оператора. Саме зміна кута вимірювань з особистих спостережень може створити похибку від 5 °C і більше, що є надто суттєвим для подальшої обробки результатів вимірювань.

Дослідження залежності енергії випромінювання поверхні об'єкту від кута випромінювання, описується законом Ламберта (закон косинуса). Цей закон дозволяє відповісти на питання про кількісну оцінку випромінювання, у фіксованому напрямку, коли випромінювання поверхні у на півсфері носить дифузійний характер і рівномірно розподілене куту випромінювання. Повна енергія випромінювання, яка дифузійно випромінюється елементами поверхні, та розподіляється по об'єму.

Закон Ламберта стверджує, що кількість променевої енергії, яка передається у напрямку φ від нормалі до елементу F , пропорційна величині просторового кута, в якому відбувається випромінювання Ω , і $\cos\varphi$, тобто:

$$Q_{\varphi} = E_n * \Omega * \cos\varphi * F \quad (3)$$

де E_n – енергія випромінювання у напрямку нормалі до F ,

Q_{φ} – повна енергія випромінювання яка випромінюється елементами поверхні від F ,

F – елемент поверхні [6].

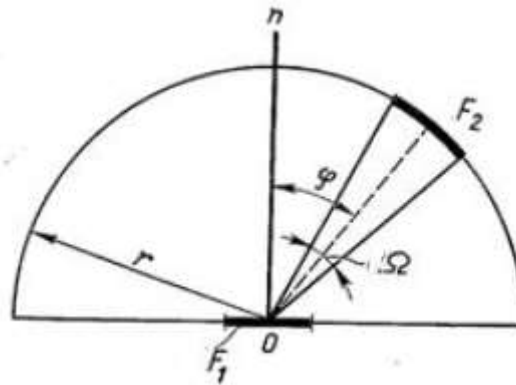


Рис. 1 Випромінювання поверхні в фіксованому напрямку згідно закону Ламберта

Закон Ламберта справедливий тільки для абсолютно чорного тіла, коефіцієнти якого дорівнюють $\varepsilon(\lambda) = 1$. Якщо для сірої поверхні, коефіцієнти якої дорівнюють $\varepsilon(\lambda) = \text{const}$ випромінювання підпорядковується закону Ламберта, то ступінь чорноти не залежить від кута φ і $\varepsilon_{\varphi} = \varepsilon_n = \varepsilon$. [6]

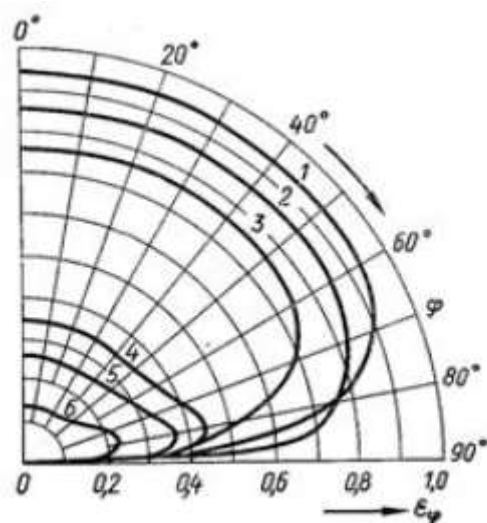


Рис.2 Відхилення від закону Ламберта: 1- дерево, 2- корунд, 3 – окислена мідь, 4 – вісмут, 5 – алюмінієва бронза, 6 – латунь [6]

У діелектриків окислених поверхонь металів значне відхилення від закону Ламберта спостерігається при $\varphi > 60^\circ$ (рис. 2). У металевих поверхонь, які оброблені методом полірування, відхилення від закону Ламберта більш суттєве. Закон Ламберта справедливий і для монохроматичного випромінювання [6].

Практичне дослідження проводилось шляхом вимірювання температури поверхні за допомогою пірометра, під кутами вимірювання 30° , 60° , 90° , по відношенню до досліджуваної поверхні яка розміщена горизонтально, при температурах 20°C , 50°C , 100°C . Для кожного вимірювання розраховувався коефіцієнт випромінювання шляхом порівняння отриманих результатів температур із реальними значеннями.

Таблиця 2

Залежність коефіцієнту випромінювання від кута вимірювання

Задана температура досліджуваного об'єкта	Кут вимірювання	Коефіцієнт випромінювання досліджуваної поверхні
20	90	0,92
20	60	0,85
20	30	0,78
50	90	0,91
50	60	0,83
50	30	0,75
100	90	0,90
100	60	0,81
100	30	0,72

Дослідивши вплив кута випромінювання на значення коефіцієнта випромінювання поверхні спостерігалася закономірність що при збільшенні кута вимірювання (від 90° до 30°) коефіцієнт випромінювання систематично зменшується. Це відповідає очікуванням, оскільки зменшення нахилу по відношенню до вимірюваного об'єкту, змінює ефективну площу випромінювання та збільшує частку відбитого випромінювання.

Для коректного виконання вимірювань температури за випромінюванням необхідно враховувати зміну коефіцієнта випромінювання залежно від кута, особливо при роботі з кутами, що значно відрізняються від нормального (90°) до поверхні.

Вплив температури поверхні на значення коефіцієнта випромінювання поверхні.

Чим більша температура об'єкту який вимірюється, тим зростає похибка безконтактного вимірювання його інфрачервоного випромінювання, тому що об'єкт більше передає температуру зовнішнім елементам дотичним до нього, тобто відбувається явище теплопровідності. Вимірювання у діапазоні від 0°C до 50°C , будуть більш точними, ніж вимірювання у діапазоні від 50°C та більше, все це пояснюється принципами теплопровідності. Але цьому можна запобігти застосовуючи необхідну теплоізоляцію на вимірювальному об'єкті, яка буде запобігати теплопередачі на інші елементи, для рівномірного нагріву досліджуваного об'єкта. Чим більша температура нагрівання, тим довший має бути час стабілізації до початку проведення вимірювань.

Зміна температури поверхні матеріалу може впливати на такі значення:

- зміна фізичних властивостей матеріалу: Зростання температури може призводити до зміни кристалічної структури, фазового стану, утворення оксидних плівок на поверхні, зміна структури, шорсткості, об'єкту, що впливають на коефіцієнт випромінювання.
- довжина хвилі випромінювання. При різних температурах максимуми випромінюваної енергії зсуваються по спектру, що змінює коефіцієнт випромінювання для різних довжин хвиль.
- температурна залежність матеріалів, у яких коефіцієнт випромінювання, залежить від температури. Метали часто демонструють зростання коефіцієнта випромінювання зі зростанням температури, тоді як для діелектриків або керамічних об'єктів, ця залежність може бути менш вираженою або зворотною.

До матеріалів які залежать від зміни температури можна віднести:

- метали, з підвищенням температури поверхня яких може окислюватися, що підвищує коефіцієнт випромінювання. Чиста мідь має низький коефіцієнт випромінювання (близько $\varepsilon = 0,03$), але при окисленні коефіцієнт може зрости до 0,7-0,8.
- кераміка та оксиди. Керамічні матеріали та оксиди мають високий коефіцієнт випромінювання, який може трохи знижуватися зі зростанням температури через зміни їх мікроструктури.
- органічні матеріали. Для органічних матеріалів (полімери, деревина) коефіцієнт випромінювання також може змінюватися з температурою, часто зменшуючись при нагріванні, що пов'язано з деградацією матеріалу.

Важливість правильного врахування коефіцієнта випромінювання. Для точних інфрачервоних вимірювань температури, необхідно враховувати зміни коефіцієнта випромінювання зі зміною температури. Для кожного конкретного матеріалу поверхні рекомендується проводити попереднє визначення коефіцієнту випромінювання, або використовувати попередньо розроблені таблиці та моделі, що враховують температурну залежність коефіцієнта випромінювання для даного матеріалу поверхні.

Важливо також враховувати, що для багатьох матеріалів є доступні стандарти та довідники, які містять необхідні дані про коефіцієнти випромінювання при різних температурах, що спрощує процес інфрачервоних вимірювань.

Отже вплив температури поверхні на значення коефіцієнта випромінювання поверхні є важливим фактором для точних інфрачервоних вимірювань. Зі збільшенням температури об'єкту зростає похибка вимірювання через явище теплопровідності, що можна мінімізувати за допомогою теплоізоляції. Зміна температури поверхні матеріалу впливає на його фізичні властивості, довжину хвилі випромінювання та температурну залежність. Метали, кераміка та органічні матеріали демонструють різні зміни коефіцієнта випромінювання зі зміною температури. Для точних вимірювань необхідно враховувати ці зміни та використовувати стандарти і довідники, що містять дані про коефіцієнти випромінювання при різних температурах.

Вплив матеріалу об'єкту на вимірне значення коефіцієнта випромінювання поверхні.

Значення коефіцієнту випромінювання металів, зазвичай малі. Зі зростанням температури вони збільшуються, особливо коли на поверхні нагрітого металу утворюється окислююча плівка. Деякі метали навпаки, у них з нагрівом коефіцієнт випромінювання може зменшуватись. Але у кожному випадку коефіцієнт випромінювання залежить від стану поверхні матеріалу.

Це інтегральний (повний коефіцієнт випромінювання), який характеризується відношенням енергії випромінювання виділеного об'єктом при температурі T , до енергії випромінювання, яке видає чорне тіло при тій же температурі. Різні метали мають досить високий коефіцієнт випромінювання їх поверхні, який часто перевищує 0,8 і з нагріванням їх коефіцієнт випромінювання зменшується.[2]

Таблиця 2

Спектральний коефіцієнт випромінювання матеріалів [1]

Матеріал поверхні	Коефіцієнт випромінювання (ϵ), визначений для довжини хвилі $\lambda=0,65$ мкм
Алюмель	0,37
Алюмель окисдований	0,87
Алюміній окисдований	0,22...0,40
Залізо	0,39
Залізо окисдоване	0,70
Золото	0,14
Золото розтоплене	0,22
Мідь	0,11
Мідь окисдована	0,70
Мідь розтоплена	0,15
Нікель	0,36
Нікель розтоплений	0,37
Нікель окисдований	0,90
Платина (при 1480 °C)	0,30
Платина (при 980 °C)	0,30
Платина розтоплена	0,38
Срібло	0,07
Срібло розтоплене	0,07
Сталь	0,35
Сталь нержавійна, окисдована	0,85
Чавун (при 1540 °C)	0,40
Чавун окисдований	0,70

Де λ — довжина хвилі при якій коефіцієнт випромінювання відповідає перерахованим вище металам.

У таблиці 2, зображені коефіцієнти випромінювання при сталій довжині, хвилі для металів, при різних агрегатних станах. З цих значень розуміємо що виміряти температуру безконтактно одного і того ж металу, при різному значенні температури нагріву не можна, оскільки відбувається окислення поверхні, різка зміна коефіцієнту випромінювання, який необхідно враховувати. Деякі з металів при зміні свого агрегатного стану не

змінюють коефіцієнт випромінювання. Правильному визначенню коефіцієнту випромінювання поверхні передусе попереднє дослідження матеріалу, над яким проводиться вимірювання, з урахуванням змін його поверхні при різних значеннях температури.

Зазвичай для простоти використання та швидкої роботи використовуємо вже підготовлені науковцями таблиці з розрахованими попередньо коефіцієнтами випромінювання тих чи інших матеріалів.

Отже дослідивши дані з таблиць, які можуть слугувати як допоміжні під час проведення вимірювань, але варто враховувати ще інші впливи фактори, тому важливо не брати їх за основу вимірювань, а детальніше вивчати та обраховувати спектральний коефіцієнт випромінювання температури матеріалів над яким проводиться вимірювання.

Вплив обробки та стану матеріалу поверхні на виміряне значення коефіцієнта випромінювання.

Загалом коефіцієнти випромінювання твердих тіл відносно повільно змінюються на відміну від коефіцієнтів випромінювання газоподібних і рідких речовин, які характеризуються різкою зміною по спектру. Окрім цього, коефіцієнт випромінювання матеріалу поверхні у видимій області спектру майже не зв'язаний з коефіцієнтом випромінювання на певній ділянці спектру. Так сніг який має дуже малий коефіцієнт випромінювання у видимій ділянці спектру являється ідеальним чорним тілом в інфрачервоній області спектру. Саме тому при потраплянні сонячних променів сніг розтає доволі повільно. Велика частина променів у видимій області спектру розсіюється та відбивається, а велике значення коефіцієнту випромінювання в інфрачервоній області забезпечує відвід поглинутої енергії завдяки тепловому випромінюванню [2].

Металеві вироби, часто обробляють хімічним або електрохімічним методом, цей процес обробки називається - окисдуванням. Хімічний і електрохімічний процеси окисдування виробляються в спеціальних розчинах і електролітах, основним компонентом яких є дихромат калій. Існують процеси безбарвного і кольорового окисдування. Кольорове окисдування надає оброблюваним предметам забарвлення різних відтінків: чорного, коричневого, сірого, синього та інших. Готові окисдовані вироби полірують м'якими латунними щітками для додання природного блиску. І кожен з цих елементів обробки поверхонь видозмінює коефіцієнт випромінювання.

Вимірювання за інфрачервоним спектром має свої особливості, особливо з урахуванням шорсткості та ступеня обробки поверхні. Шорстка поверхня має більше значення випромінювання у порівнянні з гладкою поверхнею. Це означає, що шорстка поверхня краще поглинає і випромінює теплову енергію, що може підвищити точність вимірювань температури за випромінюванням. Гладкі або поліровані поверхні, навпаки, відбивають випромінювання, що може призвести до зниження точності вимірювань через відбивання випромінювання.

Також важливим є ступінь обробки поверхні. Поліровані та блискучі поверхні мають нижчий рівень випромінювання, тому вони відбивають більшу частину інфрачервоного випромінювання, що може призводити до неточних показників. Окислені, забруднені або фарбовані поверхні можуть мати змінені емісійні властивості, що також впливає на результати вимірювань. Наприклад, окислена поверхня може мати вищу емісійність у порівнянні з чистою металевою поверхнею.

Отже коефіцієнти випромінювання твердих тіл змінюються повільно, на відміну від газоподібних і рідких речовин. У видимій області спектру коефіцієнт випромінювання матеріалу поверхні майже не зв'язаний з коефіцієнтом випромінювання на певній ділянці спектру. Наприклад, сніг має малий коефіцієнт випромінювання у видимій ділянці спектру, але є ідеальним чорним тілом в інфрачервоній області спектру. Металеві вироби обробляють хімічним або електрохімічним методом, що змінює їх коефіцієнт випромінювання. Шорстка поверхня має більше значення випромінювання у порівнянні з гладкою поверхнею, що впливає на точність вимірювань температури за випромінюванням. Поліровані та блискучі поверхні мають нижчий рівень випромінювання, що може призводити до неточних показників.

Вплив довжини хвилі на виміряне значення коефіцієнта випромінювання поверхні.

Важливим елементом при вимірюваннях температури об'єкта є довжина хвилі на якій проводяться вимірювання, ця величина встановлюється засобом вимірювальної техніки, та визначається за допомогою інтегрального рівняння в проміжку від λ_a та до λ_b .

Спектральний коефіцієнт випромінювання діелектриків ε_λ загалом збільшується зі збільшенням довжини хвилі. Наприклад людська шкіра, якої коефіцієнт випромінювання у видимому спектрі малий, володіє у інфрачервоній області спектру дуже великим коефіцієнтом випромінювання (0,98-0,99).

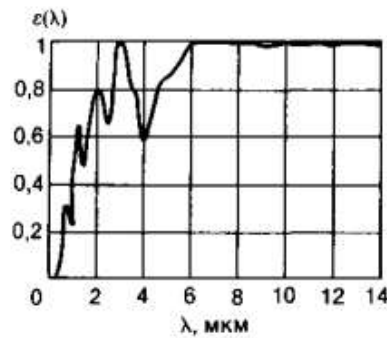


Рис.3 Залежність коефіцієнту випромінювання від довжини хвилі на прикладі людської шкіри у діапазоні довжин хвиль від 0 мкм. до 14 мкм. [4]

Інтегральний коефіцієнт випромінювання матеріалів залежить від температури. Для діелектриків зі збільшенням температури зазвичай коефіцієнт випромінювання зменшується. Це пов'язано з тим що коефіцієнт заломлення поверхні матеріалу, росте зі збільшенням температури нагрівання об'єкту.

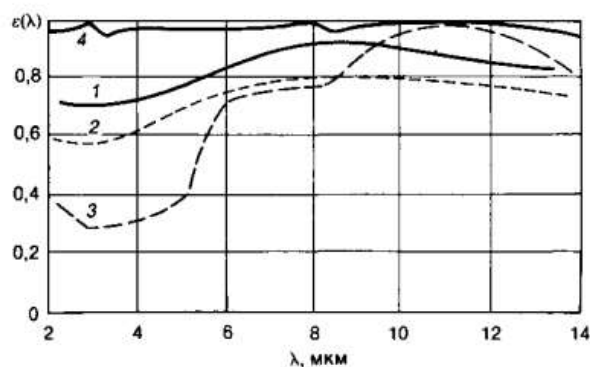


Рис.4 Спектральний коефіцієнт випромінювання діелектриків: 1- земля (пісок + глина + сланець); 2- пластик; 3 – оксид магнію; 4 – вода (у напрямку нормалі до поверхні) у діапазоні довжин хвиль від 2 мкм. до 14 мкм. [4]

Зі збільшенням температури нагріву змінюється також спектральний розподіл випромінювання (зсув максимуму в сторону коротких довжин хвиль), що також впливає на коефіцієнт випромінювання. Це явище більше виділяється, чим сильніше змінюється спектральний коефіцієнт випромінювання матеріалу у певному спектрі.

Метали зазвичай мають малий коефіцієнт випромінювання у інфрачервоному спектрі, який зазвичай збільшується зі зростанням температури нагрівання металу. На графіку нижче наведено залежність довжини хвилі поверхні від її коефіцієнту випромінювання.

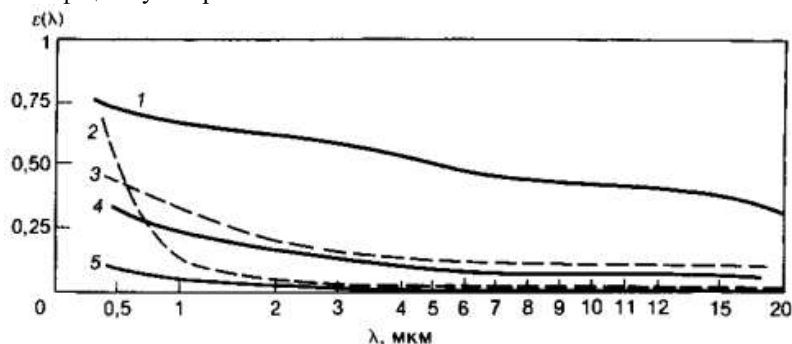


Рис.5 Коефіцієнт випромінювання металів та графіту: 1 – графіт; 2 – мідь; 3 – залізо; 4 – алюміній; 5 – срібло. [4]

Значення коефіцієнта випромінювання визначається різними методами [2]. Тому розраховане значення коефіцієнта випромінювання залежить від таких основних чинників:

- спектрального діапазону засобів вимірювання, які використовуються для обчислення значення коефіцієнта випромінювання;
- методики визначення коефіцієнта випромінювання;

При безконтактних вимірюваннях температури використовують такі засоби вимірювальної техніки,

як вимірюють температуру об'єкта за випроміненням. Довжина хвилі випромінення, яку використовують у безконтактних термометрах, може варіюватися в залежності від типу сенсора та діапазону вимірювання. Основні діапазони довжин хвиль, які використовуються в вимірюваннях температури за інфрачервоним випроміненням;

- короткохвильовий інфрачервоний діапазон: 0.78–3 мікрметри (780–3000 нанометрів). Цей діапазон використовується для вимірювання дуже високих температур (промислові печі);

- середньохвильовий інфрачервоний діапазон: 3–8 мікрметрів (3000–8000 нанометрів). Використовується в промислових застосуваннях для вимірювання температури металів і пластмас;

- довгохвильовий інфрачервоний діапазон: 8–14 мікрметрів (8000–14000 нанометрів). Поширений діапазон для безконтактних вимірювань температури в багатьох побутових та промислових застосуваннях.

Термометри за випроміненням в більшості працюють в одному з цих діапазонів, тому що ці довжини хвиль добре проникають через атмосферу та не повністю поглинаються водяною парою або іншими газами, відповідно це дозволяє проводити вимірювання з більшою точністю.

Вплив спектрального коефіцієнту випромінення на виміряне значення коефіцієнта випромінення поверхні.

Спектральний коефіцієнт випромінення $\varepsilon(\lambda)$, поверхні визначається як відношення спектральної довжини потоку випромінення L_p цієї поверхні до спектральної густини потоку випромінення абсолютно чорного тіла $L_{\text{АЧТ}}$, при тій же температурі:[2]

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{L_p}{L_{\text{АЧТ}}} \quad (4)$$

Величина $\varepsilon(\lambda)$ залежить від довжини хвилі, а також від кута візування вимірювань матеріалу поверхні та від самої температури поверхні[2].

Густина потоку випромінення абсолютно чорного тіла в інтервалі довжин хвиль $\lambda_a - \lambda_b$, можна отримати інтегруючи рівняння Планка по λ в даних межах:

$$L_{\lambda_a}^{\lambda_b} = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} [L(\lambda T) / \lambda] \lambda \quad (5)$$

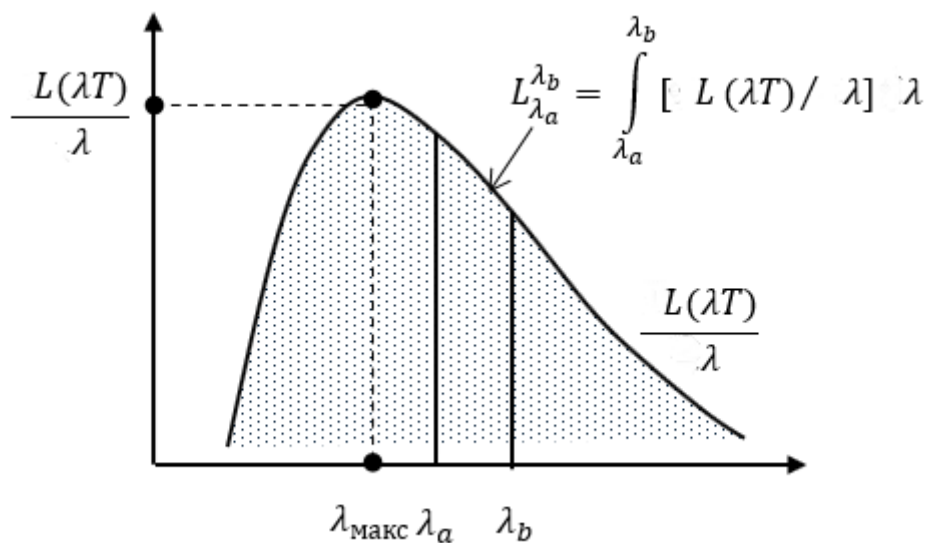


Рис.6 Інтенсивність потоку випромінення поверхні абсолютно чорного тіла.[3]

Взявши до уваги окрему ділянку довжини хвилі за інтеграл, для визначення коефіцієнту випромінення:

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} c_1 \lambda^{-5} \left(\frac{c_2}{\lambda T} - 1 \right)^{-1} d\lambda}{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} c_1 \lambda^{-5} \left(\frac{c_2}{\lambda T} - 1 \right)^{-1} d\lambda} \quad (6)$$

де $c_1 = c_2 = 3 \cdot 10^8$ м/с. – швидкість світла;

T – значення температури поверхні.

За допомогою формули 6. перед вимірюванням температури за випроміненням можна обрахувати коефіцієнт випромінення матеріалу поверхні, враховуючи діапазони довжин хвиль

вимірювального обладнання, та значення температури робочої поверхні і абсолютно чорного тіла.

Крива спектрального розподілу величини $L\left(\frac{\lambda T}{\lambda}\right)$ при заданому значенні температури T проходить через максимум. Зміщення максимуму описується законом зміщення Віна. Закон Віна говорить про те, що довжина хвилі максимально випромінювання зворотно пропорційна до температури тіла. Тобто чим коротші хвилі (вища частота) світла, тим вища енергія фотонів, які може випромінювати об'єкт з високою температурою. Закон зміщення Віна, який диференційний закону Планка:

$$\lambda_{\text{макс}} = \frac{298}{T} \text{ мкм.} \quad (7)$$

$$L(\lambda_{\text{макс}} T)/\lambda = 1,286 \cdot 10^{-15} T^5 \text{ Вт/см}^2 \cdot \text{мкм} = 1,286 \cdot 10^{-5} T^5 \text{ Вт/м}^3 \quad (8)$$

де T – температура у Кельвінах [2].

Відповідно, об'єкт при температурі навколишнього середовища $T \approx 290 \text{ К}$ має значення спектральної густини потоку випромінювання при $\lambda_{\text{макс}} \approx 10 \text{ мкм}$, а Сонце температура якого $T \approx 6000 \text{ К}$, має максимум при $\lambda_{\text{макс}} \approx 0,5 \text{ мкм}$, (саме ця довжина хвилі являється центральною у видимому спектрі). Помітимо що рідкий азот ($T = 77 \text{ К}$), має максимальне значення густини потоку при $\lambda_{\text{макс}} \approx 38 \text{ мкм}$ [2].



Рис.7 Спектральний розподіл густини потоку поверхні випромінювання різних джерел: 1- Сонце, $T \approx 6000 \text{ К}$; 2 – випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі навколишнього середовища, $T \approx 290 \text{ К}$; 3 – випромінювання абсолютно чорного тіла при температурі $T = 77 \text{ К}$. [2]

Закон зміщення Віна пояснює зсув до коротких хвиль максимуму, випромінювання тіл відповідно до ступеня їх нагрівання [2].

З метою експериментальних досліджень особливостей коефіцієнту випромінювання і самої вимірювальної поверхні було проведено вимірювання температури матеріалу поверхні за допомогою установки УГ-002, поверхня якої виготовлена з алюмінієвого сплаву в поєднанні з керамічним корпусом, та у формі зрізаного конуса, що дозволяє виконувати вимірювання як прямої поверхні, так і з особливостями вимірювань під різним кутом візування даної поверхні.

У внутрішню частину поверхні установки вбудований термометр в комплекті з регулятором вимірювачем РТ-0102, який дозволяє встановлювати потрібні значення температури та відслідковувати її зміни. Для додаткового контролю температури був взятий термометр цифровий типу ТТ-Ц016 в комплекті з термопарою Т912 для контактних вимірювань температури, у діапазоні вимірювання від $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $500 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для вимірювання інфрачервоного випромінювання використовувався пірометр FLUKE 972-2, який дозволяє проводити вимірювання у діапазоні від мінус $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$, і абсолютною похибкою вимірювання $\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Даний прилад працює у діапазоні довжин хвиль інфрачервоного випромінювання від 8 мкм . до 14 мкм .

Коефіцієнт випромінювання поверхні установки становить $\varepsilon = 0,45$ (взято із таблиць як для алюмінію) але дана поверхня за час своєї експлуатації набула різного типу механічних змін, збільшення шорсткості поверхні, різного роду забруднення які вплинули на властивості спектрального коефіцієнту випромінювання. У випадку з вимірюваннями контактним термометром цей параметр для нас не є важливим, але безконтактні вимірювання температури показали наскільки відхилення пірометром по забрудненій поверхні змінювали виміряні значення.

За відсутності додаткового термометра та регулятора температури, фактичну температуру поверхні дізнатись було б практично неможливо. Попри це в деяких точках вдавалось знайти потрібні значення

температури поверхні. Як бачимо з зображень різниця практично у декілька міліметрів точки вимірювання давала більше 10 °С різниці у значеннях температури, це те на що вплинула вже видозмінена нагрівальна поверхня. Також через геометричні особливості нагрівальної поверхні, помітні різниці температур на самій верхній частині та на бічних ділянках поверхні, що говорить про погану теплопровідність.

Таблиця 3

Виміряні значення температури під час експериментальних досліджень

Значення установки УГ-002, °С	ТТ-Ц016, °С	FLUKE 972-2, °С
60,3	60,1	63,6
60,2	60,1	56,1
60,4	60,1	60,3
100,4	100,2	102,0
100,1	99,9	98,9
100,1	100,1	108,6
100,2	100,1	85,9
100,2	100,1	103,6



Отже коефіцієнт випромінювання даної поверхні за час її експлуатації значно змінився, в той же момент для контактних вимірювань вона повністю придатна для експлуатації, що нам і підтвердили значення виміряні контактною термопарою. Ще ми наочно розглянули як ступінь забруднення може вплинути на сам коефіцієнт випромінювання, і те що важливо є вимірювання проводити в одній і тій же точці, оскільки від кута візування, змінювалось його виміряне значення.

Вивільнена енергія W у формі випромінювання залежить від довжини хвилі випромінювання λ :

$$W = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (9)$$

де $h = 6.63 \cdot 10^{-14}$ Дж, – стала Планка,
 $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. – швидкість світла.

Довжина хвилі випромінювання обернено пропорційна енергії, яка виділяється при переході. Для більш детального огляду впливу різних довжин хвиль при вимірюваннях температури використовуємо математичну модель, яка дозволить побачити результат зі різних значеннях вимірюваної температури та діапазону хвиль за формулою:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} c_1 * \lambda^{-5} (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} d\lambda = \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} c_1 * \lambda^{-5} (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} d\lambda \quad (10)$$

де $\lambda_1 = 8$, $\lambda_2 = 12$, $\lambda_3 = 7$, $\lambda_4 = 14$, інтегральні значення довжин хвиль для двох варіантів рівнянь, $c = 3 * 10^8$ м/с стала Планка, та T – значення температури у градусах Цельсія, у даному випадку використаємо 20 °C та 100 °C, щоб більш краще розглянути різницю.

Отже за формулою

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} c * \lambda^{-5} (e^{\frac{c}{\lambda T}} - 1)^{-1} d\lambda \quad (11)$$

де $T = 20$ °C, а $c = 3 * 10^8$ отримаємо приблизне значення - 2504.57, в той же час коли для значень $\lambda_3 = 7$, $\lambda_4 = 14$ при $T = 20$ °C, отриманий результат дорівнює - 12731.48.

Для порівняння розглянемо значення $T = 100$ °C, та $\lambda_1 = 8$ мкм., $\lambda_2 = 12$ мкм. Які приблизно дорівнюють 2417.62, а у діапазоні $\lambda_3 = 7$, $\lambda_4 = 14$, відповідно приблизно дорівнює 12402.34.

Отже в контексті фізики випромінювання отримані результати означають, що внески деяких діапазонів довжин хвиль при вимірюванні температури поверхні є менш важливими. у порівнянні за інші діапазонами довжин хвиль, це залежить від температури яка вимірюється, та необхідної точності отримання результатів. Це означає, що ширший діапазон довжин хвиль є більш чутливим та надійним для вимірювання, оскільки охоплює більше теплової інформації. Наприклад у важкій промисловості допускається вимірювання з меншою точністю, ніж у медицині, тому саме довжина хвилі, вимірюваний діапазон, та значення необхідної точності, це ті величини на які потрібно звертати увагу при виборі засобу вимірювальної техніки, та проведенні вимірювань.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Отже провівши експериментальні дослідження коефіцієнту випромінювання, та довжини хвилі, як деякі з факторів які впливають на точність результату безконтактного вимірювання температури, та на практиці розглянувши наскільки велику похибку може давати особливість поверхні, кут випромінювання, та не правильно підібраний коефіцієнт випромінювання поверхні, можемо дійти висновку що безконтактних вимірювань температури є важливим:

- кута вимірювання температури поверхні об'єкту;
- температури об'єкту;
- матеріалу поверхні об'єкту;
- ступінь і методи механічної обробки поверхні;
- довжини хвилі випромінювання засобу вимірювальної техніки.

Тільки врахувавши ці елементи ми можемо бути впевнені у правильності отриманих результатів проведеного вимірювання, це в свою чергу взаємопов'язано з виробничим процесом, якістю готового виробу, та задоволеності кінцевого споживача.

Перспектива яка вбачається у розвитку даного напрямку полягає у дослідженні кожного з факторів які впливають на процес вимірювання інфрачервоного випромінювання, щоб при повному їх вивченні дійти до розуміння того як можна впливати змінюючи окремі з них щоб отримати бажаний результат.

Врахування цих елементів забезпечує правильність результатів, що впливає на якість виробу і задоволеність кінцевого споживача. Подальші дослідження кожного фактору допоможуть досягнути розуміння їхнього впливу на вимірювання інфрачервоного випромінювання та отримання бажаних результатів.

Література

1. «Вимірювання температури: теорія та практика», Бескид Бід, Львів 2006 р.
2. «Инфракрасная термография» О. Госсорг. Мир 1988 р.
3. «Измерение температуры малых тел пиромерами излучения», Чернин. С. М., Коган А. В. М. Энергія, 1980.
4. МПУ 06-78:2012 Пірометри часткового випромінювання із цифровою індикацією температури. Методика повірки. Харків 2012 р.
5. ДСТУ 3194:2005 Державна повірочна схема для засобів вимірювання температури. Держспоживстандарт, Київ 2005р.
6. «Теплопередача з елементами масообміну (теорія і практика процесу)». В.Р. Кулінченко, С.Й. Ткаченко
7. Моделювання впливу багаторазових відбиттів фонового випромінювання на результати термографії. Хоц Наталія; Пшиштупа Кшиштоф; Міхалева Марина; Руслан Берестов.

References

1. «Temperature Measurement: Theory and Practice,» Beskid Bid, Lviv, 2006.
2. «Infrared Thermography," O. Gossorg, Mir, 1988.
3. «Temperature Measurement of Small Objects with Radiation Pyrometers,» S. M. Chernin, A. V. Kogan, M. Energia, 1980.
4. MPU 06-78:2012 "Partial Radiation Pyrometers with Digital Temperature Indication. Verification Methodology," Kharkiv, 2012.
5. DSTU 3194:2005 «National Verification Scheme for Temperature Measurement Instruments,» Derzhspozhyvstandart, Kyiv, 2005.
6. "Heat Transfer with Mass Transfer Elements (Theory and Practice of the Process)". V.R. Kulichenko, S.Y. Tkachenko
7. Simulation of the influence of multiple reflections of background radiation on the thermography results. Hots, Nataliya; Przystupa, Krzysztof; Mikhalewa, Maryna; Ruslan, Berestov.