

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри електронної техніки

_____ Олександр ВОВНА
(підпис) (ім'я та прізвище)

«__» _____ 2022 р.

Випускна кваліфікаційна робота

_____ бакалавра
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Розробка електронного пристрою вимірювання високих значень температур пірометричним методом»

Виконав студент 3 курсу, групи ЕЛТзп-19
(шифр групи)

спеціальності _____ 171 Електроніка
(шифр і назва спеціальності)

_____ Делікатов Валерій Вікторович
(Прізвище, Ім'я та По-батькові) (підпис)

Керівник _____ проф. кафедри ЕТ, д.т.н., проф. _____ Анатолій ЗОРІ
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ім'я) (підпис)

Рецензент _____ зав. кафедри ЕЛІН, к.т.н., доц. _____ Олександр КОЛЛАРОВ
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ім'я) (підпис)

Нормоконтроль
зав. кафедри ЕТ, д.т.н., проф.

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

_____ Олександр ВОВНА
(підпис)

Студент _____
(підпис)

Луцьк – 2022 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки
(повна назва кафедри)

Захист відбувся _____
(дата)

з оцінкою _____

Секретар ЕК _____
(підпис)

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра _____

Тема: «Розробка електронного пристрою вимірювання високих значень температур пірометричним методом»

Спецчастина: _____

Виконавець, студент

гр. ЕЛТзп – 19

Валерій ДЕЛКАТОВ

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник

Анатолій ЗОРІ

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Консультанти:

Олександр ВОВНА

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Іван ЛАКТИОНОВ

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Олександр ШТЕПА

(підпис, дата, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

**Державний вищий навчальний заклад
"Донецький національний технічний університет"**

Інститут, факультет Комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
Кафедра Електронна техніка
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри електронної техніки

Олександр ВОВНА

« ____ » _____ 2022 року

**З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Делікатов Валерій Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розробка електронного пристрою вимірювання високих значень температур пірометричним методом

керівник проекту (роботи) Зорі Анатолій Анатолійович, д.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 29.04.2022 року № 163

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

Технічна документація та матеріали з переддипломної практики

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз та характеристика об'єкту; обґрунтування та розробка структурної схеми електронного пристрою; розробка принципової схеми електронного пристрою; оцінка метрологічних характеристик; синтез мікропроцесорної частини електронного пристрою; розробка конструкції та зовнішнього вигляду електронного пристрою.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	проф. каф. ЕТ, д.т.н., проф. Зорі А.А.		
2	зав. каф. ЕТ, д.т.н., проф. Вовна О.В.		
3.1	проф. каф. ЕТ, д.т.н., доц. Лактіонов І.С.		
3.2	доц. каф. ЕТ, к.т.н., доц. Штепа О.А.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз стану питання та існуючих можливостей вимірювання високих температур		
2	Розробка та дослідження математичної моделі визначення високих температур		
3	Розробка електронного пристрою вимірювання високих температур		
4	Додаток А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуацій на підприємстві		

Студент _____ **Валерій ДЕЛКАТОВ**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ **Анатолій ЗОРІ**
(підпис) (прізвище та ініціали)

ЛИСТ ЗАУВАЖЕНЬ

Посада, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ	Суть зауваження, оцінка та підпис

АНОТАЦІЯ

Делікатов, В.В. Розробка електронного пристрою вимірювання високих значень температур пірометричним методом / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» зі спеціальності 171 Електроніка. – ДВНЗ «ДонНТУ», Луцьк, 2022.

Пояснювальна записка: 57 стор., 20 рис., 1 табл., 19 посилань.

Розроблено стенд для експериментальних досліджень спектрального визначення температури катоду з вольфраму, як стаціонарного процесу. До складу стенду входить оптична система з фокусуванням, спектрометр, який має лінійку зі зарядовим зв'язком, та персональний комп'ютер для обробки результатів вимірювання та побудови спектрів зі застосуванням поліхроматичного методу. Розроблено стенд для здійснення досліджень процесів, які мають доволі високу швидкість протікання, а саме для процесу нагрівання пластин провідника імпульсним струмом. До складу стенду формування розряду струму входить блок синхронізації, оптичний блок, блок реєстрації спектру та персональний комп'ютер для розрахунку значення температури зі застосуванням поліхроматичного методу.

Під час проведення досліджень встановлено можливість визначення температури зразків танталу зі застосуванням поліхроматичного методу для визначення високої температури процесів, що швидко змінюються. Для здійснення вимірювального контролю високих значень температур зі застосуванням поліхроматичного методу необхідно використовувати блок захисту реєстратора оптичного випромінювання від засвічування за допомогою ослаблення оптичного сигналу. Під час виконання досліджень процесів, які мають достатньо високу швидкодію необхідно застосовувати швидкісні реєстратори, які мають часовий інтервал експозиції від одиниць до десятків мікросекунд, це дозволяє здійснювати оцінку в динамічному режимі роботи.

Ключові слова: вимірювання, температура, оптичний метод, довжина хвилі, похибка, структура, стенд, зразок.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ІСНУЮЧИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИМІРЮВАННЯ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР.....	9
1.1 Аналіз температурних шкал під час вимірювання високих температур.....	9
1.2 Аналіз характеристик і параметрів оптичних методів вимірювання високих температур.....	12
1.3 Висновки.....	24
2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР.....	25
3 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР.....	35
3.1 Розробка стенду для вимірювального контролю величини температури катода плазмотрона.....	35
3.2 Розробка електронного пристрою вимірювання температури під час нагрівання металів імпульсами струму.....	40
3.3 Висновки.....	45
ВИСНОВКИ.....	47
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	49
ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві.....	51

ВСТУП

Випускню кваліфікаційну робота спрямовано на розв'язання завдань з безконтактним вимірювальним контролем високих значень температури під час дії невідомої величини здатності до випромінювання поверхні об'єктів контролю. Аналіз значень спектрального коефіцієнту оптичного випромінювання від поверхні об'єктів контролю зі застосуванням інформації щодо здатності оптичного теплового випромінювання від цих об'єктів.

Виконання експериментальних дослідження під час здійснення безконтактного вимірювального контролю високих температур, а також вивчення поверхневих властивостей матеріалів та об'єктів обумовлюють застосування нових способів, які дозволяють розв'язувати дослідницькі завдання під час дії екстремальних умов, а також агресивного зовнішнього та внутрішнього середовища та доволі високої швидкості процесів, що протікають в середовищі, що досліджується.

Під час дослідження властивостей матеріалів, якщо на них спрямовано оптичне випромінювання від лазера чи нагрівання зі застосуванням розрядів струму, властивості речовин можуть змінюються протягом декількох одиниць чи десятків мілісекунд кількох, що суттєво ускладнює застосування інформаційних даних щодо матеріалів, які досліджуються під час дії детермінованого стану речовини. Наявність перешкод, що обумовлено дією лазерного оптичного випромінюванням, а також випаровуванням речовини і виникненням загазованого середовища, зменшує ефективність під час застосування теплового вимірювального контролю та відомих способів температурного контролю.

Під час застосування відомих способів пасивного безконтактного контролю температури необхідно знати величину спектрального коефіцієнту оптичного випромінювання від об'єкта досліджень на певній довжині хвилі, де має місце визначення параметрів і характеристик оптичного випромінювання.

Також, якщо ослаблення випромінювання має нерівномірний характер під час його проходження через агресивне середовище, потрібно знати інформацію щодо величини ослаблення середовища, що для кожного експерименту має своє відмінне значення. Під час визначення оптичного випромінювання на відомих довжинах хвиль необхідно знати природи виникненням зазначеного випромінювання.

Отже, доволі актуальним завданням є розробка та удосконалення способів і засобів, які дозволяють здійснювати вимірювальний контроль високих температур під час дії невідомого спектрального складу оптичного випромінювання від об'єктів досліджень з високими показниками швидкодії, які мають потужне виділення енергії в умовах агресивного середовища.

Метою випускної кваліфікаційної роботи бакалавра є удосконалення способу та засобів вимірювання високих значень температури під час невідомої здатності до оптичного випромінювання поверхні, що досліджується. Застосуванням удосконаленого способу дозволить визначати величину спектрального коефіцієнта оптичного випромінювання за спектром теплового випромінювання від об'єкта досліджень без наявності інформації щодо нього.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ІСНУЮЧИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИМІРЮВАННЯ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

1.1 Аналіз температурних шкал під час вимірювання високих температур

Зміна температура є одним із основних параметрів переважної більшості високотемпературних технологій, таких як ядерна, плазмова, лазерна тощо. Теоретичні та практичні дослідження в цих галузях є доволі обмеженими, вони виконуються тільки під час виробничої необхідності. У переважній більшості технологічного устаткування є обмеження щодо точності визначення температури та керування необхідного режиму за температурою промислового виробництва. Під час здійснення вимірювального контролю температури з високими показниками точності на промисловому устаткуванні застосовуються традиційні методи.

Зазначені методи вимірювального контролю температури базуються на застосуванні практичних температурних шкал. Принцип роботи цих методів ґрунтується на аналізі фізичних властивостей речовин, які залежать від зміни температури. Найбільше розповсюдження під час використання отримали властивості речовин, як сталість температури під час дії фазових переходів. Зазначені фазові переходи чистих речовин обираються як реперні точки, що застосовується для отримання температурних шкал. У теперішній час регламентується застосування міжнародної шкали температури МТШ-90. Ця шкала базується на прецизійних вимірюваннях температури, які виконано протягом 30 років у різних країнах світу. Міжнародна шкала температур МТШ-90 має 4 ділянки, останню з яких визначено для температури більше 1234,93 К, яка базується на законі Планка та реперних точках міді (1357,77К), золота (1337,33К) та срібла (1234,93К) [1]. Більше ніж точка плавлення міді відсутня реперна точка, яка придатна для застосування в шкалі МТШ-90.

Для розв'язання зазначеної проблеми здійснюється реалізація високотемпературних реперних точок на базі сплавів металу з вуглецем. У теперішній час виконуються експериментальні дослідження, під час яких завдяки багаторазовому відпалу одержують тиглі, величина сумарної похибки вимірювання температури цих фазових переходів складає не більше $0,5^{\circ}\text{C}$. Значення температури плавлення з'єднань деяких металів з вуглецем наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Значення температури плавлення з'єднань металів з вуглецем

З'єднання метал – вуглець	Температура плавлення, $^{\circ}\text{C}$
Os-C	2732
Re-C	2474
Ir-C	2290
Ru-C	1953
Pt-C	1738
Rh-C	1657
Pd-C	1492
Ni-C	1329
Co-C	1324
Fe-C	1153

Під час експериментальних досліджень різних сплавів доведено застосування сплаву на базі вольфраму як реперної точки, що дозволить здійснити відтворення температури до $3020,7\text{ K}$. Під час подальших досліджень цього напрямку можна забезпечити розширення температурного діапазону, який може бути відтворено шкалою температури завдяки застосуванню високотемпературних реперних точок фазових переходів для сплавів вольфраму з вуглецем.

Якщо базуватися на сучасних способах вимірювання температури, то під високими температурами розуміють значення термодинамічної температури, яке більше ніж температура фазового переходу з максимальною тугоплавкістю з сплавів металу та вуглецю, що досліджуються в теперішній час, тобто величина температури, що більше 3000 К.

Найпопулярніші серед засобів вимірювання температур, калібрування яких здійснюється зі застосуванням шкал температури є контактні сенсори – термопари. До їх переваг можна віднести простоту застосування, невелику вартість та широкий діапазон вимірювання температури.

Основною проблемою, яка має місце зі застосуванням шкал температури, є доволі велика складність здійснення об'єктивної оцінки величини термодинамічної похибки результату вимірювання. Ця складова похибки визначається як різниця між істинним значенням та результатом вимірювання, під час цього істинне значення температури невідомо. До іншого недоліку можна віднести непоодинокість самої температурної шкали. Так, результати порівняння еталонів одиниць вимірювання температури в точці води, що виконано три та більше разів, відрізняються між собою. Опорне значення температури під час порівняння визначається як середнє результатів порівняння та застосовуються, як орієнтир [2].

Також, ще однією особливістю передачі одиниці вимірювання температури під час здійснення радіаційної термометрії, є необхідність перегляду способів побудови шкал температури як первинних еталонів. Під час цього необхідно зосередитися на діапазоні температур, що складає більше ніж 1000°C. До теперішнього часу не повністю розв'язано проблему порівняння еталонних значень температури, якщо вони відрізняються між собою за результатами виконаних вимірювань, що виконуються різними лабораторіями та країнами [3].

1.2 Аналіз характеристик і параметрів оптичних методів вимірювання високих температур

Як альтернативний варіант класичної термометрії зі застосуванням шкал температури є безконтактне вимірювання в оптичному спектральному діапазоні, якому приділяється в останні роки доволі велику увагу [7]. У теперішній час зазначений напрямок істотно просунувся вперед завдяки розробкам багатoelementних фотоприймачів інфрачервоного спектру, вдосконалення промислових технологій, що дозволяються виготовляти ці фотоприймачів без охолодження як мікроболометричні матриці. Ці засоби мають підвищену точність вимірювання, зменшену величину інерційності, а також менші габаритні розміри фотоприймачів оптичного діапазону випромінювання. У цих пристроях є функціональна можливість викнувати реєстрацію розподілення оптичного випромінювання від об'єкта вимірювального контролю на доволі великому спектральному діапазоні довжин хвиль. Зазначені переваги є доволі вагомими, якщо порівнювати їх з безконтактними оптичними способами, що застосовуються під час реєстрацію випромінювання тільки на одній довжині хвиль.

Оптичні термометричні методи можна поділити на ті методи, що базуються на визначенні інтегрального спектру оптичного випромінювання від об'єкта вимірювального контролю, а також методи, що застосовують для розрахунку температури інформаційні дані щодо оптичного випромінювання на одній або двох, або декількох довжинах хвиль.

Метод, який базується на інтегральному спектрі оптичного випромінювання від об'єкта вимірювального контролю, покладено закон Стефана-Больцмана. У відповідно до цього закону, поверхнева щільність оптичного випромінювання від об'єкта контролю є пропорційною величиною від температури цього об'єкта, у четвертому ступені. Значення коефіцієнту пропорційності визначається сталою Стефана-Больцмана. До недоліків зазначеної типу методів можна віднести складність під час практичної

реєстрації відносно повного спектра випромінювання від розігрітого об'єкта контролю, а також істотний вплив взаємного розміщення площини об'єкта та вимірювального пристрою на результати визначення температури. Також виникає складність у визначенні коефіцієнта оптичного випромінювання від об'єкта контролю, величина якого залежить від значення довжини хвилі оптичного випромінювання та має суттєву залежність від зміни температури.

Під час застосування сучасного способу, що використовує інтегральний спектр оптичного випромінювання, визначення значення температури об'єкта досліджень з попереднім математичним моделюванням його 3D теплової картини випромінювання від нього. У літературному джерелі [4] описується процес вимірювання величини температури фюзеляжу літака під час застосування поляризаційної термограми. Проте, не зрозуміло методику визначення величини коефіцієнта оптичного випромінювання, якщо відсутні інформаційні данні щодо цього об'єкт. Зазвичай, ці данні вибирають з таблиць значень інтегрального коефіцієнту оптичного випромінювання, які для переважної більшості матеріалів зведено до таблиць. Значення інтегрального коефіцієнту оптичного випромінювання, що наведено в таблиця отримано завдяки порівнянню спектра від об'єкта еталонним спектром оптичного випромінювача, калібрування якого здійснено за шкалою температури. Це призводить до обмеження діапазону температур не більш 1500 К під час використання зазначеної групи методів вимірювання.

Оптичний метод, який базується на інформаційних даних щодо оптичного випромінювання на одній довжині хвилі, покладено закон Планка. У відповідності з цим законом, абсолютно чорне тіло, яке має температуру T під час дії термодинамічної рівноваги, спектральна щільність потужності оптичного випромінювання визначається функцією Планка:

$$R_p(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1},$$

де λ – довжина хвилі оптичного випромінювання;

$R_p(\lambda, T)$ – спектральна щільність потужності;

$C_1 = 2\pi \cdot c^2 \cdot h$ – перша пірометрична константа;

$C_2 = \frac{c \cdot h}{k}$ – перша пірометрична константа;

c – швидкість світла.

Для фотонних фотоприймачів оптичного випромінювання, які отримали широке розповсюдження у теперішній час, замість спектральної щільності оптичної потужності використовують спектральну щільність потоку фотонів від об'єкта дослідження. Функція Планку для цього випадку представляється такою залежністю:

$$\Phi_p(\lambda, T) = \frac{C_1}{c \cdot h \cdot \lambda^4} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1},$$

де $\Phi_p(\lambda, T)$ – спектральна щільність потоку фотонів.

На відміну від абсолютно-чорного тіла, спектральний коефіцієнт оптичного випромінювання якого дорівнює значенню одиниці, оптичне випромінювання від реальних об'єктів описується такою функціональною залежністю:

$$\Phi(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot \Phi_p(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{C_1}{c \cdot h \cdot \lambda^4} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1},$$

де $\varepsilon(\lambda, T)$ – спектральний коефіцієнт оптичного випромінювання, значення якого реальних тіл дорівнює менше ніж одиниця для всього спектру.

Отже, зміну температури об'єкту дослідження можна визначити аналітично за допомогою значення спектральної щільності потоку фотонів на

довжині хвилі, де здійснюється реєстрація, а також завдяки визначенню величини спектрального коефіцієнта оптичного випромінювання на заданій довжині хвилі (див. рис. 1.1).

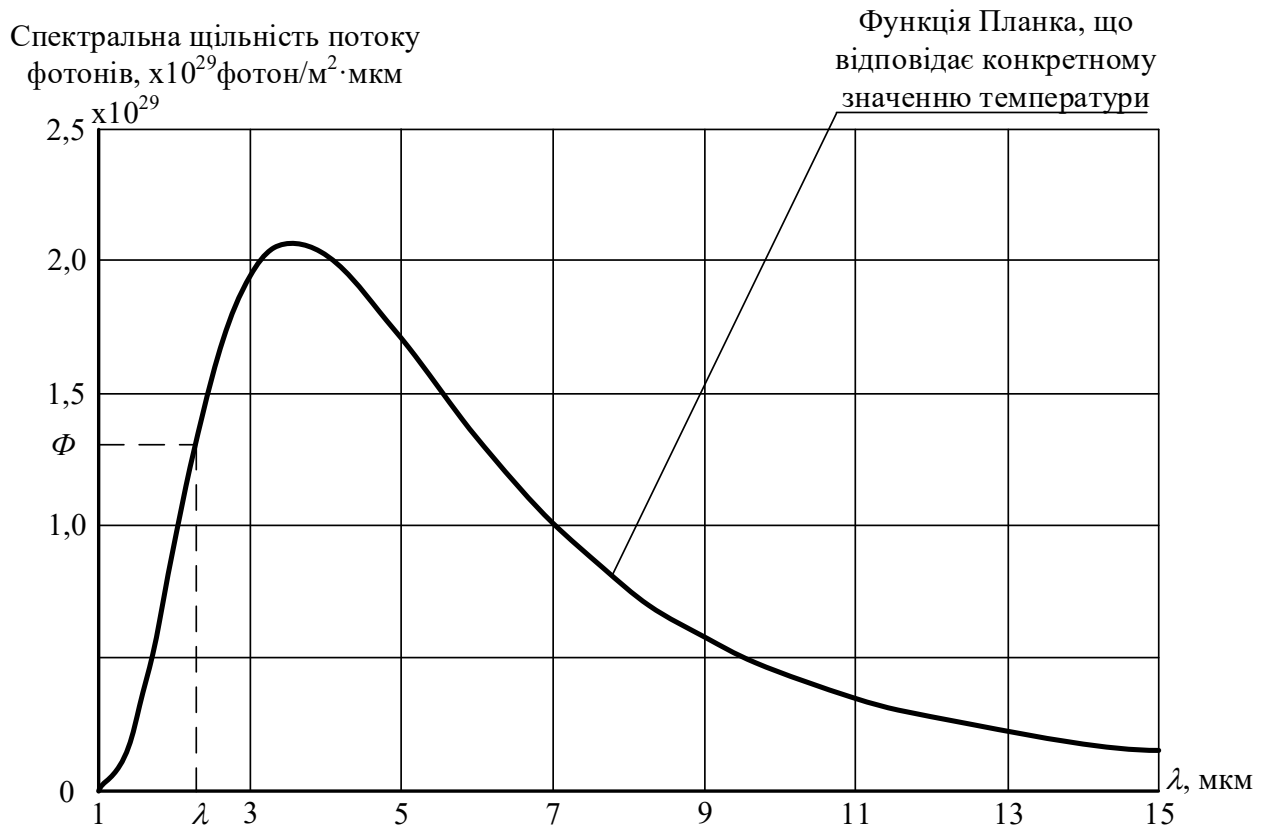


Рисунок 1.1 – Застосування яскравого методу визначення температури об'єктів, що досліджуються

Яскравий метод визначення температури об'єктів має такі переваги, як простота під час практичної реалізації, а також відносно невелика вартість обладнання. До недоліків цього методу можна віднести необхідність інформаційних даних щодо величини спектрального коефіцієнту оптичного випромінювання на певній довжині хвилі, а також значення спектрального коефіцієнту ослаблення газової суміші. Також, виконання одиничного вимірювання може призвести до підвищення випадкової складової похибки результату вимірювання, а здійснення серії вимірювань для зменшення випадкової складової похибки, не дозволить виконувати вимірювання зміни температури процесів, що протікають з доволі високою швидкістю.

Один із способів зменшення випадкової складової похибки результату вимірювання базується на застосуванні яскравого способу визначення температури зі застосуванням декількох довжин хвиль. За методикою, що розроблено фірмою «FAR Associates» [5], можна розробити мультиспектральний метод яскравості зі застосуванням такої послідовності дії:

- збирання інформаційних даних щодо спектру випромінювання зі застосуванням лінійки з зарядовим зв'язком, кожному з пікелів цієї лінійки відповідає ділянка 2нм;

- здійснюється розрахунок яскравої температури на кожній зі зазначених ділянок, якщо значення отримано на всіх ділянках дорівнюють між собою, то вважається, що значення температури знайдено;

- якщо значення температури на ділянках оптичного спектру відрізняються між собою, то здійснюється побудова гістограми температур, з цієї гістограми визначається найімовірніше значення температури, а також середньоквадратичне відхилення цієї температури.

У [6] наводяться результати експериментальних досліджень з спектрального визначення температури до 3000 К, що здійснюється в умовах загазованого середовищі. З аналізу результатів досліджень встановлено переваги мультиспектрального способу яскравості над його класичним варіантом. Проте облік впливу загазованого середовища на інтенсивність оптичного випромінювання для мультиспектрального методу не є очевидний. Під час аналізу літературного джерела [6] виявлено, що мають місце доволі велика кількість проблем з практичної реалізації цього способу. Зазначені недоліки пропонується вирішити завдяки дослідженню властивості матеріалів під час дії на них високої температури [6].

Інший напрямок проведення досліджень спрямовано на визначення величини невідомого коефіцієнта оптичного випромінювання завдяки апроксимації цієї залежності лінійною або поліноміальною функцією [7]. Також отримав істотний розвиток метод яскравої термометрії в галузі безконтактних вимірювань [8]. У роботі [9] виконується мінімізація похибки, виникнення якої

обумовлено невідомою величиною коефіцієнта оптичного випромінювання. Математичне моделювання здійснюється зі застосуванням поліноміальної функцією з введенням додаткових поправочних коефіцієнтів під час калібрування вимірювальних пристроїв.

Біхроматичний метод базується на використанні даних щодо оптичного випромінювання на двох довжинах хвиль (див. рис. 1.2). Зі застосуванням функції Планка допускається, що має місце рівномірне ослаблення оптичного випромінювання на двох довжинах хвиль під час проходження його через аналізоване середовище. Зазначене допущення дає змогу мінімізувати вплив аналізованого середовища на результат вимірювання температури. Для визначення значення температури визначається відношення величини спектральної щільності потоку фотонів на двох аналізованих довжинах хвиль:

$$\frac{\Phi_1(\lambda_1, T)}{\Phi_2(\lambda_2, T)} = \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} \cdot \frac{\lambda_2^4}{\lambda_1^4} \cdot \frac{\exp\left(\frac{C_1}{\lambda_1 \cdot T}\right) - 1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda_2 \cdot T}\right) - 1}.$$

Якщо має місце рівномірне ослаблення оптичного випромінювання на зазначених довжинах хвиль λ_1 та λ_2 , то якщо взяти відношення спектральної щільності потоку фотонів, то його величина є незмінною. Проте у зазначеному випадку величину температури неможливо визначити в наявному вигляді, отже, під час визначення температури за допомогою біхроматичного методу застосовуються до рівняння Вина [7]:

$$\Phi_w(\lambda, T) = \frac{C_1}{c \cdot h \cdot \lambda^4} \cdot \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right).$$

Наведена залежність є першим членом під час розкладання формули Планка до ряду:

$$\Phi_p(\lambda, T) = \frac{C_1}{c \cdot h \cdot \lambda^4} \cdot \left[\exp\left(-\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - \exp\left(-\frac{2 \cdot C_2}{\lambda \cdot T}\right) - \exp\left(-\frac{3 \cdot C_2}{\lambda \cdot T}\right) \dots \right].$$

Під час переходу до рівняння Вина можна отримати аналітичну залежність для визначення величини температури зі застосуванням методу спектрального відношення, отже:

$$\frac{\Phi_1(\lambda_1, T)}{\Phi_2(\lambda_2, T)} = \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} \cdot \frac{\lambda_2^4}{\lambda_1^4} \cdot \frac{\exp\left(\frac{C_1}{\lambda_1 \cdot T}\right) - 1}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda_2 \cdot T}\right) - 1}.$$

звідси отримано аналітична залежність для розрахунку значення температури, що вимірюється:

$$T = C_2 \cdot \frac{(\lambda_2 - \lambda_1) \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2}{\ln \left[\frac{\lambda_2^4 \cdot \varepsilon(\lambda_1, T) \cdot \Phi_2(\lambda_2, T)}{\lambda_1^4 \cdot \varepsilon(\lambda_2, T) \cdot \Phi_1(\lambda_1, T)} \right]} = \frac{C_2}{\Lambda_w} \cdot \frac{1}{\ln \left[\frac{\lambda_2^4 \cdot \varepsilon(\lambda_1, T) \cdot \Phi_2(\lambda_2, T)}{\lambda_1^4 \cdot \varepsilon(\lambda_2, T) \cdot \Phi_1(\lambda_1, T)} \right]}.$$

де $\Lambda_w = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$ – еквівалентна довжина хвилі.

Математичне наближення Вина має місце лише під час виконання наступної нерівності:

$$\frac{C_2}{\lambda \cdot T} \gg 1.$$

Під час практичного застосування модель Вина з високим ступенем точності співпадає з формулою Планка до довжин хвиль [10]:

$$\lambda = 0,25 \cdot \frac{C_2}{T}.$$

Ця область знаходиться ліворуч від максимуму ізотерми Планка. Застосування біхроматичного методу вимірювання температури в області Вина наведено на рис. 1.2.

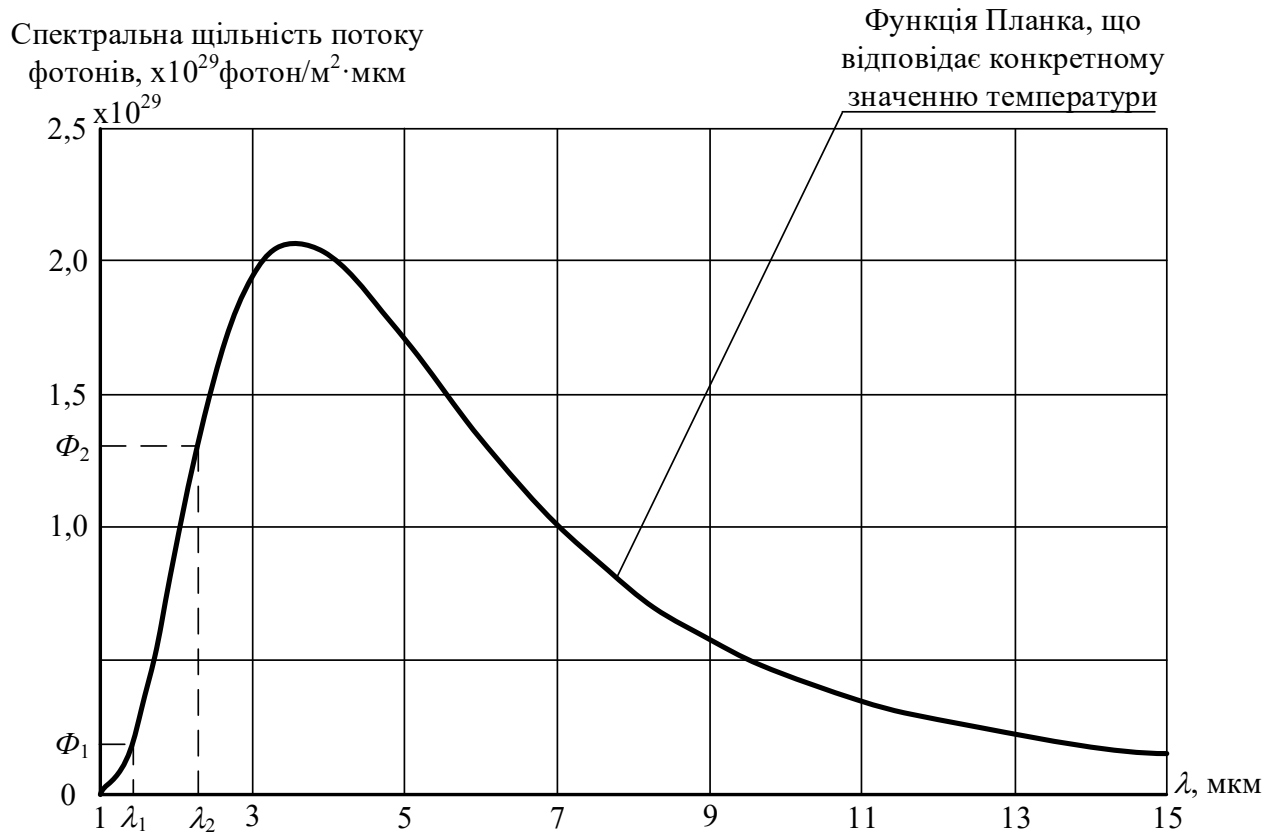


Рисунок 1.2 – Застосування біхроматичного методу вимірювання температури

Як під час застосування яскравого методу, для зменшення випадкової складової похибки результату вимірювання розрахунок біхроматичним методом здійснюється на декількох довжинах хвиль, цей метод має назву мультиспектральний біхроматичний.

Якщо базуватися на залежності зміни величини інструментальної похибки результату вимірювання від зміни величини еквівалентної довжини хвилі, то необхідно вибрати якомога більшу відстань між λ_1 та λ_2 . Для реалізації мультиспектрального біхроматичного методу, який здійснює реєстрацію оптичного випромінювання на двох та більше довжинах хвиль,

можна застосувати фотодіодний пірометр. До переваг цього методу можна віднести відносну невисоку вартість пристрою, а до недоліків часову затримку, що має місце під час перенастроювання пристрою, що дозволяє здійснювати одночасну реєстрацію оптичного випромінювання на двох діапазонах довжин хвиль. Під час застосування мультиспектрального біхроматичного методу, який використовує два діапазону довжин хвиль, здійснюється вимірювання інтенсивності оптичного випромінювання зі застосуванням широкодіапазонного фотоприймача на базі InGaAs чи германієвого фотодіода. Після цього вводять коефіцієнти корекції для зменшення складової похибки результату вимірювання, що обумовлено невідомим значенням $\varepsilon(\lambda, T)$ [11].

Окремо від біхроматичного та яскравого методів розроблено та застосовується метод визначення температури на базі спектрального максимуму теплового випромінювання. Цей метод базується на законі Вина, у відповідності з яким довжина хвилі, на якій має місце максимальне значення величини теплового випромінювання, та однозначно визначає величину температури об'єкта досліджень.

До розробки та промислового використання багатoelementних сенсорів визначення максимуму теплового випромінювання здійснювалося завдяки дослідженню спектрального діапазону зі застосуванням монохроматора, що визначало під час застосування методу тільки для дослідження стаціонарних теплових процесів. Зі застосуванням фотоприймачів, що здійснюють одночасну реєстрацію перехідної області спектра, яка має максимальне значення функції Планка, та істотно розвиває цей метод [12]. Визначення температури за значенням довжини хвилі оптичного випромінювання, що відповідає максимуму, наведено на рис. 1.3.

У роботі [10] наведено результати експериментальних досліджень зі застосуванням різних типів матеріалів у спектральній вимірювальних пристроях температури в умовах дії агресивного середовища, а також стороннього додаткового оптичного випромінювання. У роботі [13] наводяться результати розробки активних методів визначення температури. У теперішній

час розроблено методи вимірювання температури невідомого об'єкта без додаткової інформації щодо спектрального коефіцієнта оптичного випромінювання, які мають мінімальне значення методичною похибкою результату вимірювання температури [14].

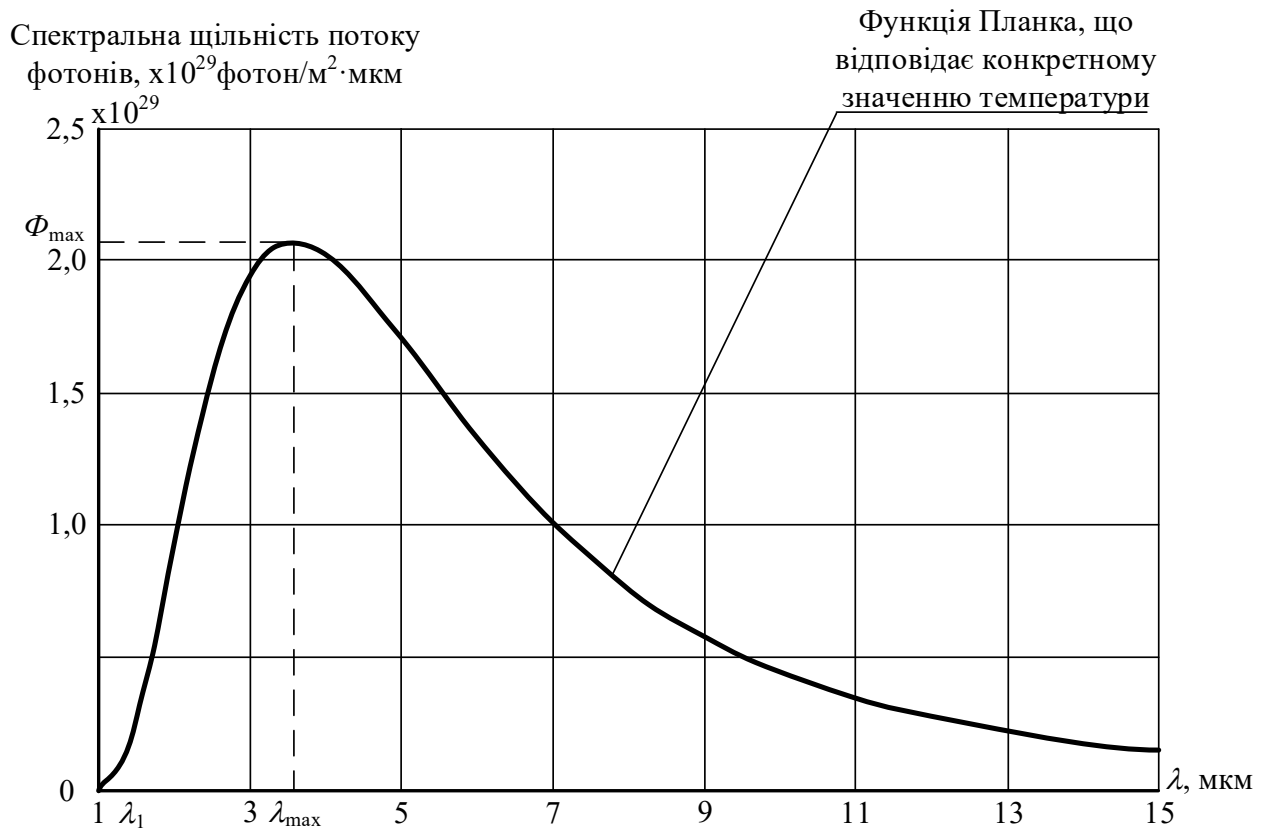


Рисунок 1.3 – Визначення температури за значенням довжини хвилі оптичного випромінювання, що відповідає максимуму

Метод базується на рівняння Вина, у відповідності з яким координати Вина визначаються як:

$$x = \ln(\lambda^4 \cdot \Phi_w);$$

$$y = \frac{C_2}{\lambda},$$

спектральний розподіл у зазначених координатах має лінійну залежність, а величина кута нахилу цієї залежності визначається температурою об'єкта дослідження. Відхилення значень від лінійної залежності обумовлено значеннями спектрального коефіцієнта оптичного випромінювання на різних довжинах хвиль. Під час апроксимації спектрального розподілу, як лінійної залежності в координатній Вина, можна визначити значення температури об'єкта досліджень (див. рис. 1.4).

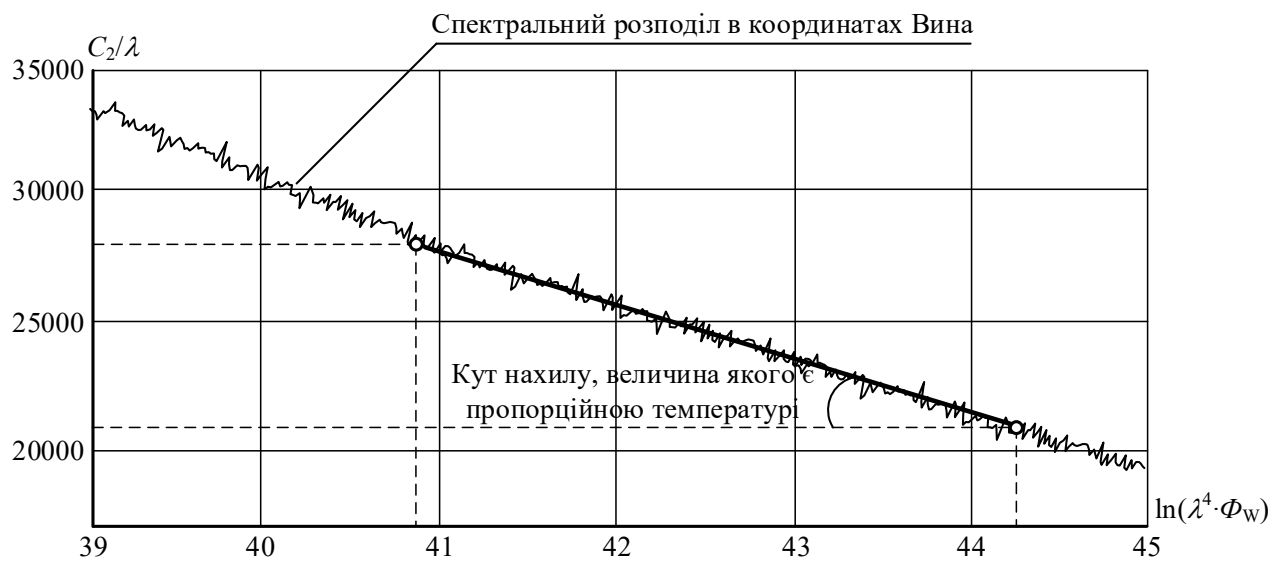


Рисунок 1.4 – Представлення спектральної щільності оптичного випромінювання в координатах Вина

Під час експериментальних досліджень встановлено можливість вимірювання температури об'єктів до 2700 K [15]. До переваг зазначеного методу можна віднести можливість після одержання спектру виключити з його аналізу ділянки, які мають явне відхиленням від теплового оптичного випромінювання, що обумовлено побічним плазмовим або лазерним випромінюванням [16].

До основного недоліку зазначених методів безконтактного визначення температури є залежність результатів вимірювання від спектрального коефіцієнта оптичного випромінювання об'єкта досліджень. Якщо відсутні данні щодо цього спектрального коефіцієнта, то це призводить виникнення

складової методичної похибки результату вимірювання температури. Зазначена кількість різних методів говорить про відсутність найкращого методу, що дозволяє усунути впливу цього недоліку [17].

До іншого недоліку можна віднести відсутність в результатах експериментальних досліджень ознак рівноважного характеру оптичного випромінювання. Цей недолік має істотний вплив, якщо аналізуються параметри процесів, що швидко змінюються, а саме горіння або вибух. Під час протікання зазначених процесів не можливо без перевірки мати впевненість відповідності оптичного випромінювання законом Планка. Якщо застосовується поліхроматичне або мультиспектральне визначення температури за допомогою спектрального розподілу оптичного випромінювання від об'єкта дослідження, то проблему можна розв'язати шляхом зіставленням одержаного спектру з набором теплових спектрів, що розраховано для абсолютно-чорного тіла [6], під час цього попередньо виконується оцінка порядку вимірюваного значення температури [15].

Під час здійснення вимірювань високих значень температур зі застосуванням багатохвильових методів має місце істотний недолік. У переважній більшості алгоритмів обробки спектрів у теперішній час застосовується формула Планка, а також співвідношення Вина з аналізом спектральних характеристик у відповідних координатах. Ця методика застосовується під час вимірювання температури в діапазоні довжин хвиль оптичного випромінювання від 400 до 1000 нм тіл, які нагріті до температури 2000 К. Представлення теплового спектра у розглянутих координатах дозволяє визначити ділянки довжин хвиль, де об'єкт має оптичне випромінювання, як сіре тіла, а визначення його значення температури можна здійснювати без відомого значення коефіцієнта випромінювання. Під час дії високої температури у видимій частині спектру визначається не тільки область Вина, а й перехідна область функції Планка, а застосування функції Вина для обробки результатів вимірювання температури призводить до виникнення зазначеної складової методичної похибки вимірювання.

1.3 Висновки

У теперішній час, незважаючи на отримання високотемпературних сплавів металів і вуглецю, застосування шкал температури в області високих значень температур до 3000 К має доволі високу складність зазначеного сплаву зі стабільною точкою фазового переходу.

Переважає більшість методів спектрального визначення температури використовує функцію Вина, застосування якої дозволяє визначати величину температури без використання наближених методів розрахунку. Для зменшення величини похибки, що обумовлено зазначеним наближенням, під час переходу до вимірювання високих температур область спектра зсувається до коротких хвиль.

Вимірювальний контроль значення температури без інформації щодо коефіцієнта оптичного випромінювання об'єкта дослідження остаточно не вирішено. Існує необхідність удосконалення вимірювальних електронних пристроїв, що повинні мати високе значення чутливості, це дозволяє зменшити складову методичної похибки вимірювання температури без застосування способів корекції значення коефіцієнта оптичного випромінювання.

2 РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Зі застосуванням наближеної функції Вина можна отримати аналітичне співвідношення для розрахунку значення температури біхроматичним методом. Для визначення межі застосування наближеної функції Вина під час дії різних значень добутку $\lambda \cdot T$ можна отримати універсальну функцію Планка для спектральної щільності потоку фотонів. Базовий алгоритм наведено [18], введемо такі змінні:

$$X = \frac{\lambda \cdot T}{C_2};$$

$$Y = \Phi_p(\lambda, T) \cdot \frac{c \cdot h \cdot \lambda^4}{C_1}.$$

З обліком функції Планка виконаємо перетворення до такого вигляду:

$$Y = \frac{1}{X^4} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{1}{X}\right) - 1}.$$

Змінні будуть змінюватися так само, як λ та $\Phi_p(\lambda, T)$. Координати максимального значення наведеної функції будуть дорівнювати: $X_{\max} = 0,255$ та $Y_{\max} = 4,78$. Для отримання універсальної функції Планка виконано нормування змінних:

$$\xi = \frac{X}{X_{\max}};$$

$$\eta = \frac{Y}{Y_{\max}} = \frac{1}{\xi^4} \cdot \frac{\exp\left(\frac{1}{X_{\max}}\right) - 1}{\exp\left(\frac{X_{\max}}{\xi}\right) - 1}.$$

Універсальну функцію Планка, що побудовано в координатах η та ξ , наведено на рис. 2.1, на цьому рисунку також наведено функції Вина та Релея-Джинса.

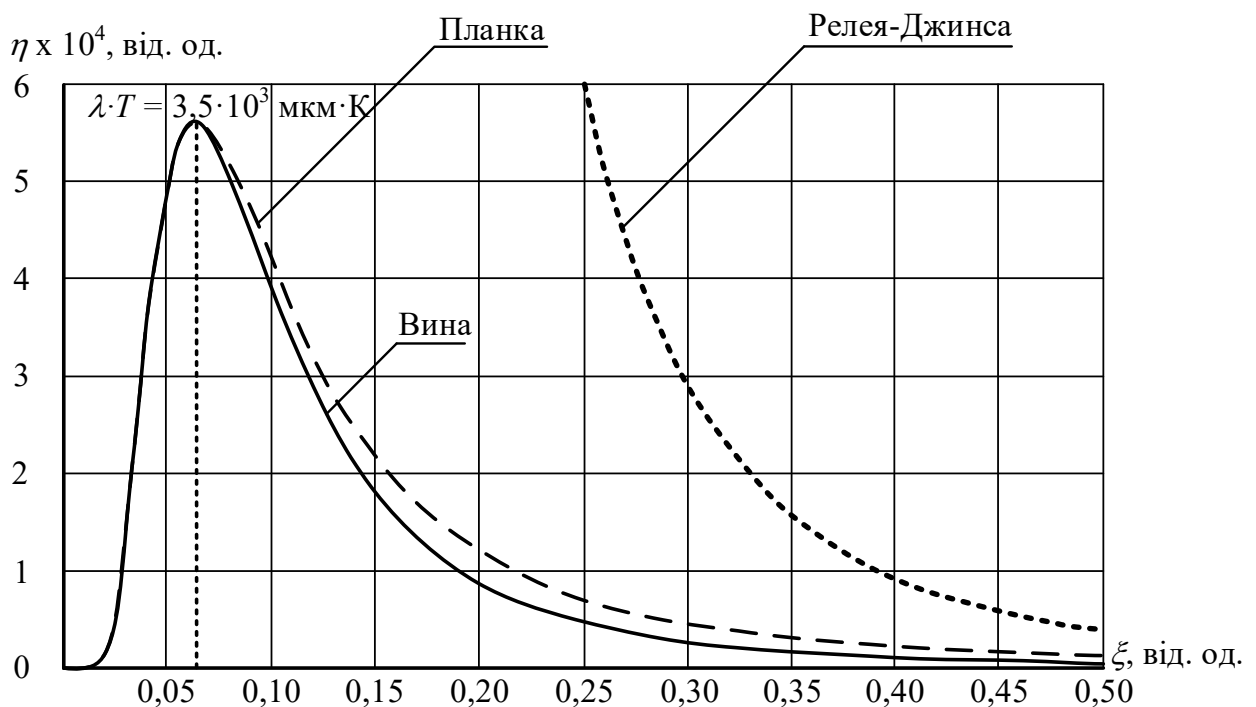


Рисунок 2.1 – Універсальну функцію Планка, що побудовано в координатах η та ξ

З аналізу наведеної універсальної функціональної залежності Планка можна зробити висновок, що наближена функція Вина зі збільшенням значення $\lambda \cdot T = 3,5 \cdot 10^3$ мкм·К з'являється додаткове значення похибки.

Виконаємо оцінку величини похибки наближеної функції Вина у видимому, середньому та далекому інфрачервоному діапазонах. Під час проведення розрахунків застосовуємо данні, що отримано на граничних

довжинах хвиль кожного з діапазонів. Результати розрахунків наведено на рис. 2.2, 2.3 та 2.4, показують, зі збільшенням значення температури різниця між термодинамічною температурою та температурою, що визначено за допомогою наближеної функції Вина, збільшується. Це показує на необхідність здійснення розрахунку значення високих температур без застосування наближеної функції Вина.

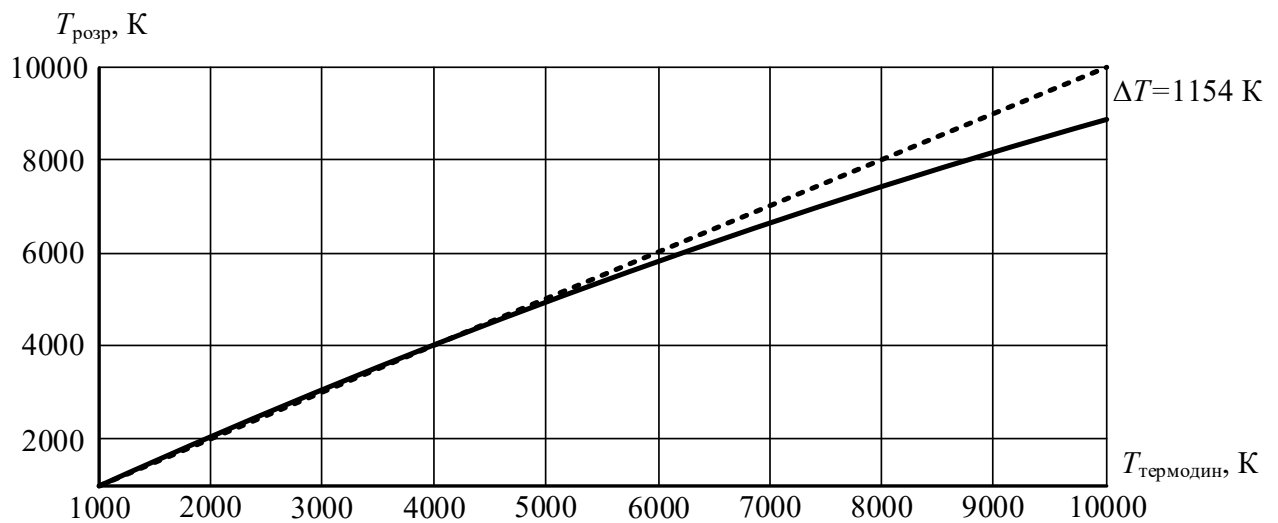


Рисунок 2.2 – Результати розрахунку значення температури на довжині хвиль $\lambda_1 = 0,4$ мкм та $\lambda_2 = 1$ мкм

Якщо визначити аналітичну залежність зміни температури зі застосуванням формули Планка без застосування функції Вина, має місце трансцендентне рівняння такого вигляду:

$$T = \frac{C_2}{\lambda_1 \cdot \ln \left[\frac{\lambda_2^4 \cdot \varepsilon(\lambda_1, T) \cdot \Phi(\lambda_2, T) \cdot \exp\left(\frac{C_2}{\lambda_2 \cdot T} - 1\right)}{\lambda_1^4 \cdot \varepsilon(\lambda_2, T) \cdot \Phi(\lambda_1, T)} + 1 \right]}.$$

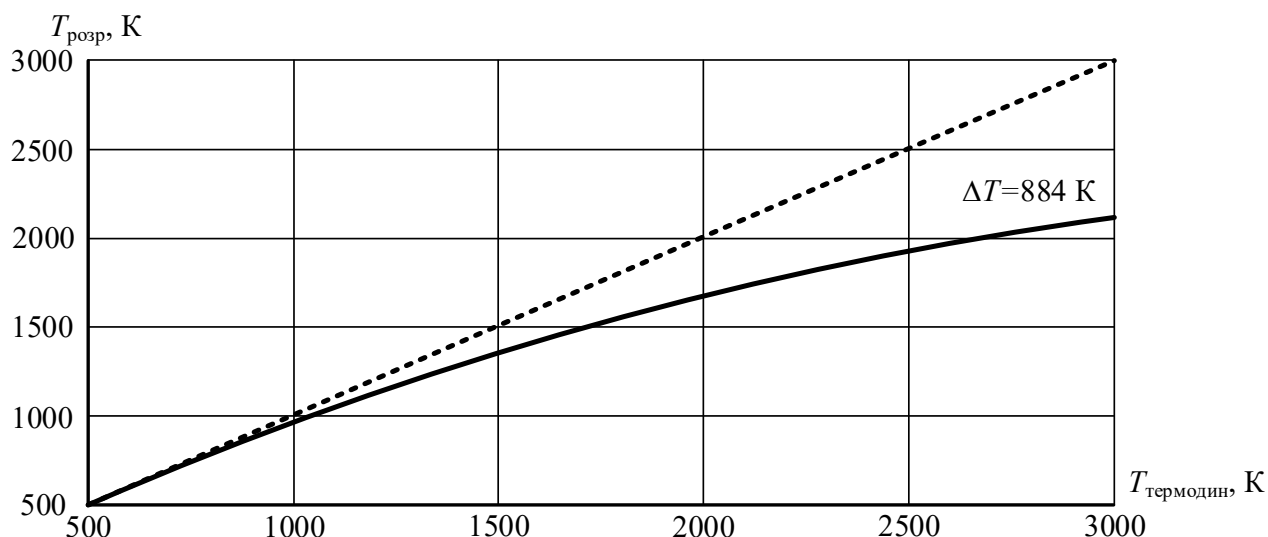


Рисунок 2.3 – Результати розрахунку значення температури на довжині хвиль $\lambda_1 = 3 \text{ мкм}$ та $\lambda_2 = 5 \text{ мкм}$

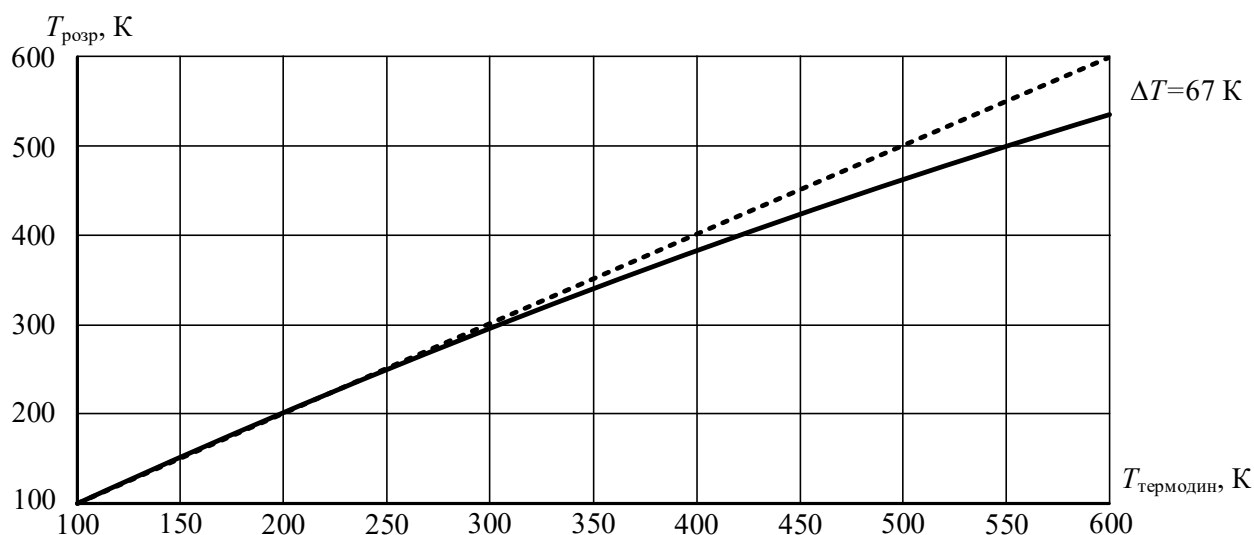


Рисунок 2.4 – Результати розрахунку значення температури на довжині хвиль $\lambda_1 = 8 \text{ мкм}$ та $\lambda_2 = 14 \text{ мкм}$

Для розв'язання отриманого трансцендентного рівняння застосовуються наближені чисельні методи розрахунку. Як базовий метод застосовується метод Ньютона, який забезпечує високу збіжність результатів розрахунку. Геометричну інтерпретацію застосування наближеного чисельного методу Ньютона наведено на рис. 2.5.

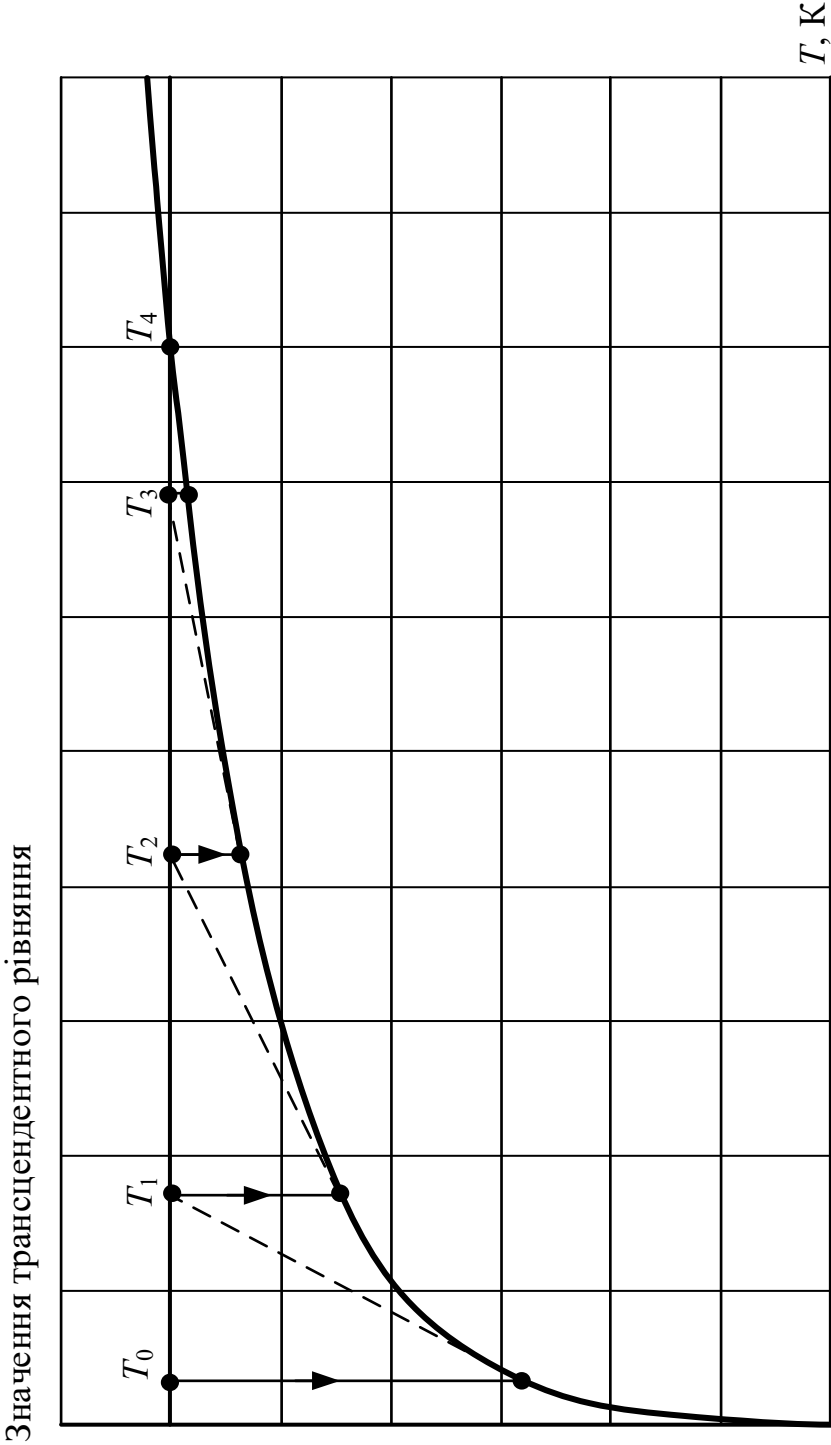


Рисунок 2.5 – Геометрична інтерпретація застосування наближеного чисельного методу Ньютона

Розрахункова формула наближеного методу Ньютона:

$$T_{N+1} = T_N - \frac{f(T_N)}{f'(T_N)}; N \geq 0,$$

де N – номер ітерації.

Якщо застосувати ця формулу для отриманого трансцендентного рівняння, то отримано получим:

$$f(T_N) = \frac{\Phi_1(\lambda_1, T_N)}{\Phi_2(\lambda_2, T_N)} - \frac{\lambda_2^4 \cdot \varepsilon(\lambda_1, T_N) \cdot \exp\left(\frac{C_1}{\lambda_2 \cdot T_N} - 1\right)}{\lambda_1^4 \cdot \varepsilon(\lambda_2, T_N) \cdot \exp\left(\frac{C_2}{\lambda_1 \cdot T_N} - 1\right)};$$

$$f'(T_N) = \frac{C_1}{\lambda_1 \cdot T_N^2} \cdot \exp\left(\frac{C_1}{\lambda_1 \cdot T_N}\right) \cdot \frac{\Phi_2(\lambda_2, T_N)}{\Phi_1(\lambda_1, T_N)} - \frac{C_2}{\lambda_2 \cdot T_N^2} \cdot \exp\left(\frac{C_2}{\lambda_2 \cdot T_N}\right) \cdot \frac{1}{\Phi_1(\lambda_1, T_N)}.$$

Критерієм, щодо закінчення ітераційного циклу, є виконання такої нерівності:

$$|T_{N+1} - T_N| < \varepsilon,$$

де ε – регламентована точність результату розрахунку.

Функція $f(T_N)$ є безперервною функцією, яку можна двічі диференціювати, отже, зазначена функція задовольняє необхідним умовам для застосування наближеного методу Ньютона. Для того, що забезпечити збіжність методу, а також мінімізувати кількість ітерацій необхідно застосовувати значення температури T_0 , величину якого наближено до істинного. Як таке значення температури можна використати температуру, що одержано яскравим методом зі застосуванням однієї довжини хвилі, а також

температуру за довжинами хвиль випромінювання λ_1 та λ_2 . Під час практичного використання методу з обліком ослаблення оптичного випромінювання, яке пройшло через вимірювальне середовище від джерела до фотоприймача, величина розрахункове значення температури може істотно відрізнятись від істинного. Отже, доцільно застосовувати як перше наближення температуру, значення якої отримано методом спектрального відношення за наближеною функцією Вина.

Виконано оцінку під час застосування описаного методу. Як вихідні інформаційні дані необхідно застосовувати значення інтенсивності оптичного випромінювання для температури $T=10000$ К на довжинах хвиль $\lambda_1 = 0,4$ мкм та $\lambda_2 = 1$ мкм. Значення температури під час першого наближення отримано зі застосуванням біхроматичним методу за наближеною функцією Вина, що дорівнює $T_0 = 8846$ К. Графічне представлення ітераційного циклу наведено на рис. 2.6. Для розрахунку значення температури зі застосуванням біхроматичним способом використовується рівняння Планка необхідно три ітерації. Наближений метод Ньютона для розв'язання рівняння біхроматичного методу без застосування функції Вина можна використовувати зі значенням добутку більше $\lambda \cdot T = 3,5 \cdot 10^3$ мкм · К для високих температур.

Під час реєстрації спектральних масивів випромінювання можна попередньо виконувати аналіз спектра для усунення ділянок з нерівномірним характером для плазмового та лазерного випромінювання, а також тих ділянок спектра, де має місце поглинання випромінювання навколишнім середовищем. Зі застосуванням такої властивості методу є можливість на першому етапі усунути ділянки спектра, які мають спотворену інформацію щодо випромінювання від об'єкта досліджень та отримати масив $\Phi(\lambda, T)$ для подальших розрахунків. На наступному етапі цього методу для кожної пари $\Phi_J(\lambda_J, T)$, $\Phi_K(\lambda_K, T)$ масиву $\Phi(\lambda, T)$ розраховується значення температури T_{JK} . На третьому етапі на базі масиву температур T_{JK} представляється графічно температурна гістограма, яку наведено на рис. 2.7.

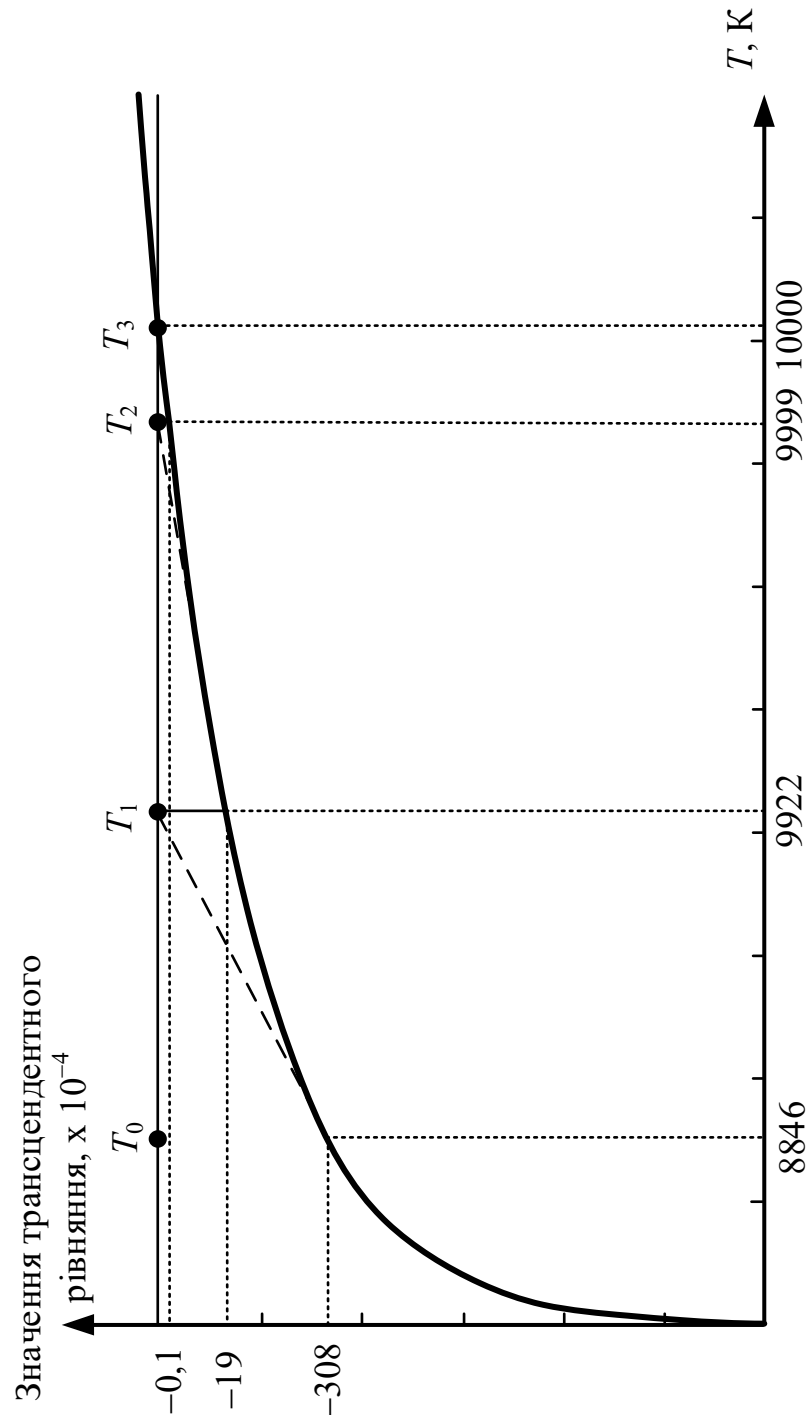


Рисунок 2.6 – Графічна інтерпретація ітераційного методу визначення величини температури $T = 10000 K$ на $\lambda_1 = 0,4 \text{ мкм}$ та $\lambda_2 = 1 \text{ мкм}$ біхроматичним методом на базі функції Планка

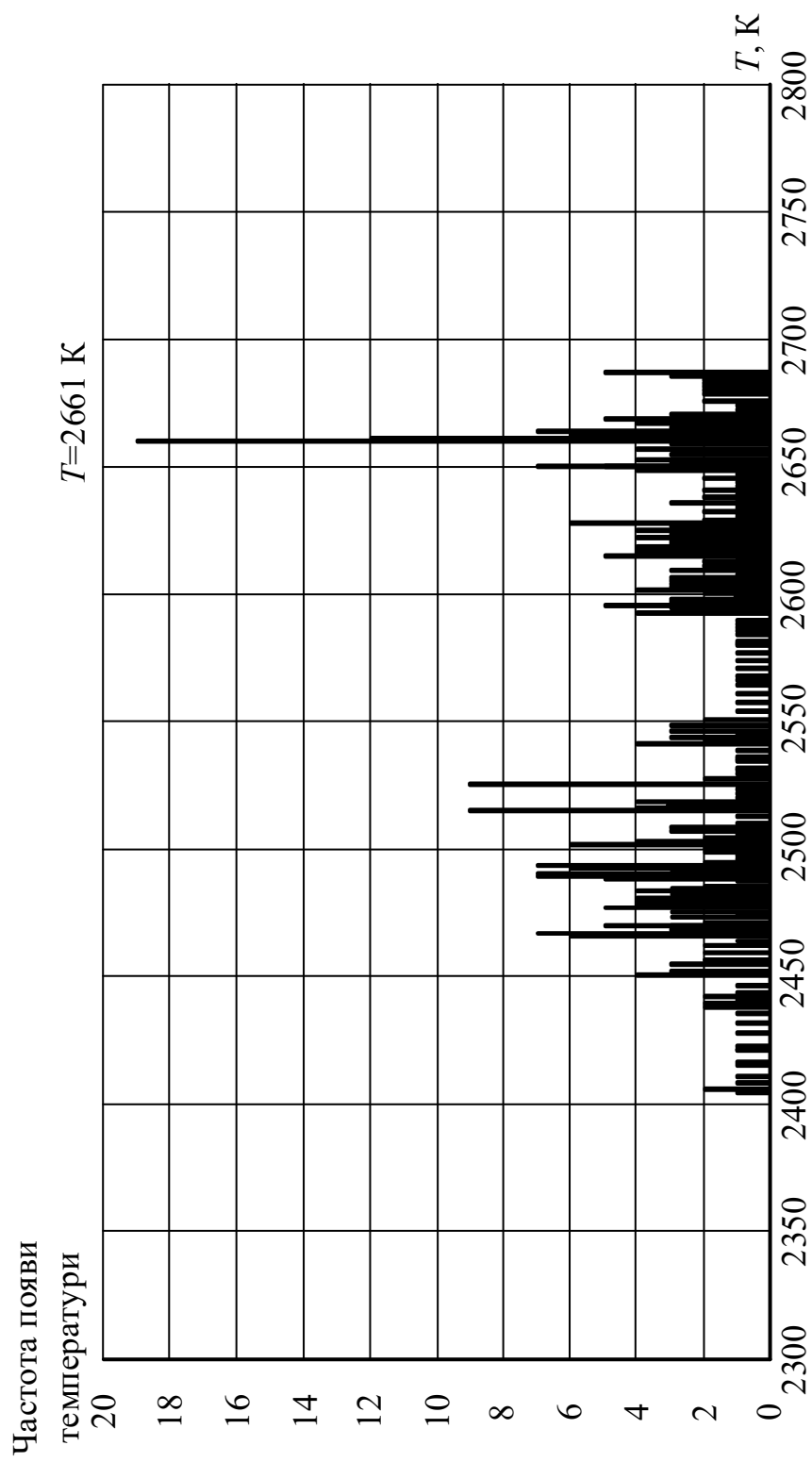


Рисунок 2.7 – II Результат температурної гістограми зі застосуванням поліхроматичного методу вимірювання

На кінцевому етапі застосування поліхроматичного методу значення температури, що має максимальну ймовірність, визначається як максимальне значення температурної гистограми. Отже це значення з'являється найбільшу кількість разів у масиві температур T_{JK} .

Виконано оцінку величини систематичної похибки результату вимірювання, значення якої істотно зменшується під час переходу до розрахунків температури від наближеної функції Вина до ітераційних розрахунків температури. Величина систематичної похибки результату вимірювання може бути більше 10 %, що вказує на необхідність переходу до ітераційних розрахунків під час вимірювання високих температур для зменшення цієї складової похибки.

Виконано розрахунок величини інструментальної похибки результату вимірювання для зазначеного методу. Доказано, що величина інструментальної похибки під час застосування наближеної функції Вина може бути не менше 3%, що вказує на можливість застосування співвідношення для визначення інструментальної похибки з використанням функції Вина в більшості практичних задач.

Розраховано значення методичної похибки для зазначеного методу. Виконано оцінку величини методичної похибки зі застосуванням функції Вина, величина якої більше 10 %, що вказує на необхідність оцінки величини цієї похибки без застосування функції Вина.

3 РОЗРОБКА ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ ВИМІРЮВАННЯ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

3.1 Розробка стенду для вимірювального контролю величини температури катода плазмотрона

Найбільше розповсюдження під час практичної реалізації отримання високих температур у стаціонарному режимі є застосування катоду, який виготовлено з тугоплавкого матеріалу, що розміщено в плазмотроні. Під час безконтактного вимірювання температури використання катоду є доволі ускладнено через стороннє випромінювання плазми.

Під час реалізації розглянутого методу, що передбачає здійснення попереднього аналізу спектра та усунення ділянок, які мають нерівномірне випромінюванням, необхідно використання статистичного розрахунку зі застосуванням поліхроматичного методу без використання наближеної функції Вина. Це дозволить отримати задовільні результати в умовах дії перешкод від плазми. Для здійснення перевірки розглянутого методу розроблено установку для вимірювання значень температури катода з вольфраму, який застосовується в плазмотроні. Структурну схему стенду наведено на рис. 3.1. Оптичне випромінювання від катода з вольфраму, який має довжину 5 мм. (див. рис. 3.2), проходить через оптичну ланку, яка утворює паралельний потік, що подається до дифракційної ґрати. Оптична система установки має в своєму складі об'єктив, який забезпечує введення оптичного випромінювання до волоконно-оптичного зонду, а також світлофільтра, який зменшує інтенсивність оптичного випромінювання. Після віддзеркалення випромінювання від дифракційної ґрати здійснюється розкладання потоку до спектру. Зображення спектру утворюється на поверхні матриці зі зарядовим зв'язком. Отриманий спектр перетворюється до цифрового вигляду та інформація передається до персонального комп'ютера для обробки даних.

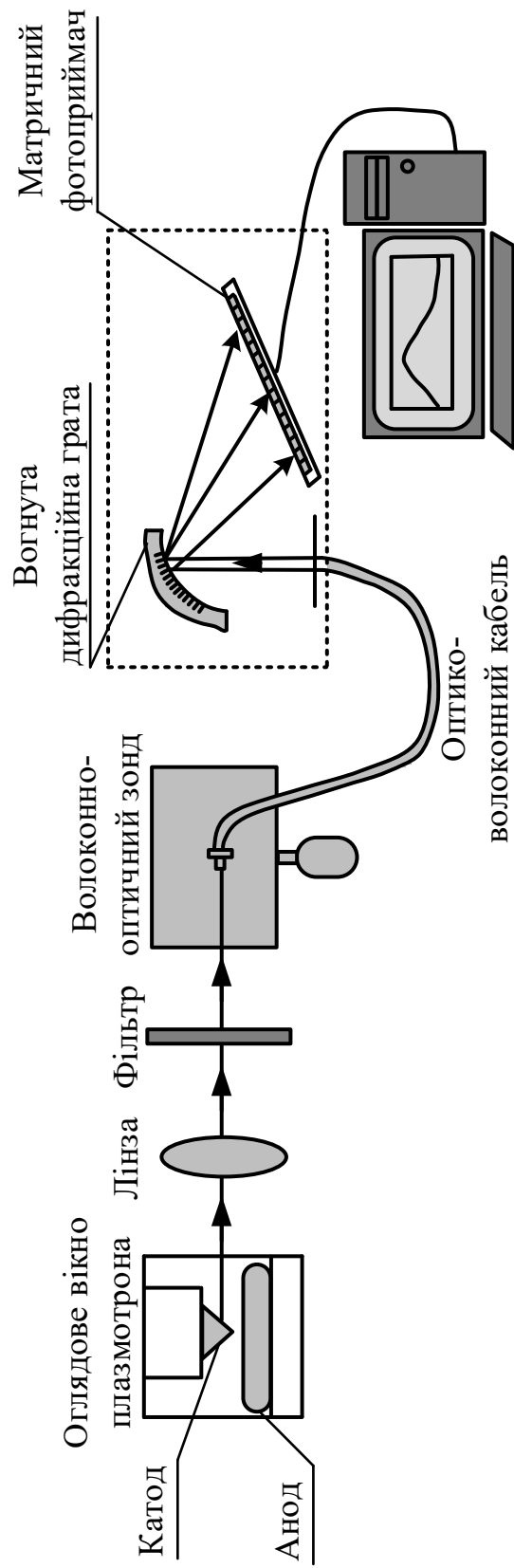


Рисунок 3.1 – Структурна схема стенду для вимірювального контролю температури катода плазмотрона

До складу стенда входить джерело живлення електричною енергією плазмотрона типу TIG160HFROK, яке має величину вихідного струму 60 А. Також стенд має в своєму складі аргоно-дуговий плазмотрон з вольфрамовим катодом і анодом з міді. Величина зазору між катодом і анодом складає 5 мм. Приймальна сторона стенду складається з лінзи, яка має фокусну відстань 10, та лінійки фотоприймачів зі зарядовим зв'язком, типу TCD1304, мікрометричну платформу та персональний комп'ютер з розробленою програмною компонентною.

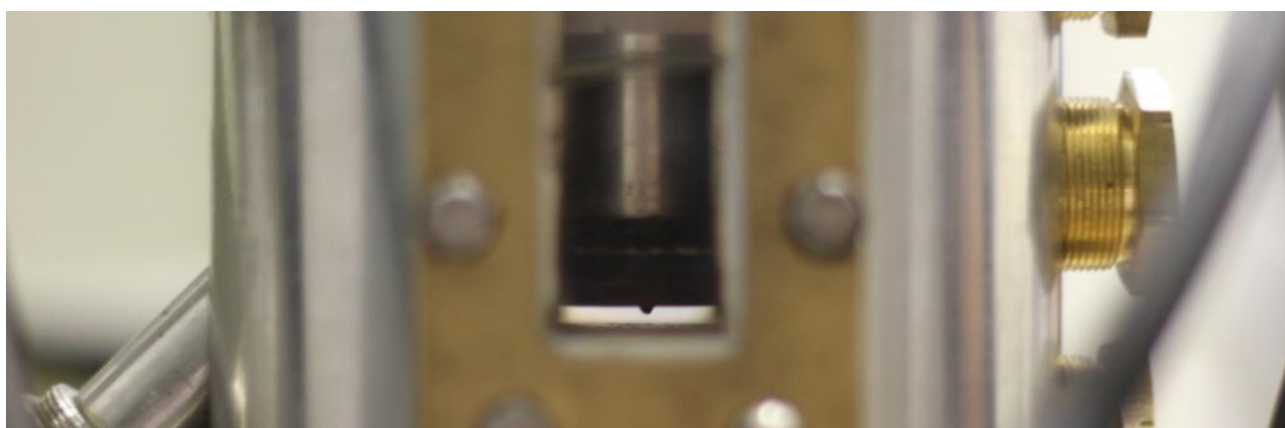


Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд катоду з вольфраму в плазмотроні

Перед початком здійснення вимірювання визначається вплив оптичної ланки на спектр оптичного випромінювання для одержання апаратної спектральної функції. Для визначення зазначеної функції застосовується стандартизована модель абсолютно чорного тіла типу М-360, яка виготовляється фірмою Mikron Infrared.

Після закінчення реєстрації спектра здійснюється його відновлення зі застосуванням апаратно-спектральної функції. Розпочинається перший етап обробки спектра, під час дії якого вибирається ділянки спектра, що не має максимального значення оптичного випромінювання плазми. Для кожної з двох значень інтенсивності на довжинах хвиль λ_j та λ_k визначається розрахункове значення температури T_{jk} за спектральним відношення.

Під час дії першої операції визначається масив значень температур, за яким будується гістограма, яку наведено на рис. 3.3. Вимірювальне значення інтенсивності на довжинах хвиль не залежить, тому виконується апроксимація цієї температурної гістограми зі застосуванням нормального закону розподілу. Математичне очікування гістограми дорівнює ймовірному значенню температури, що визначено на першому етапі операції.

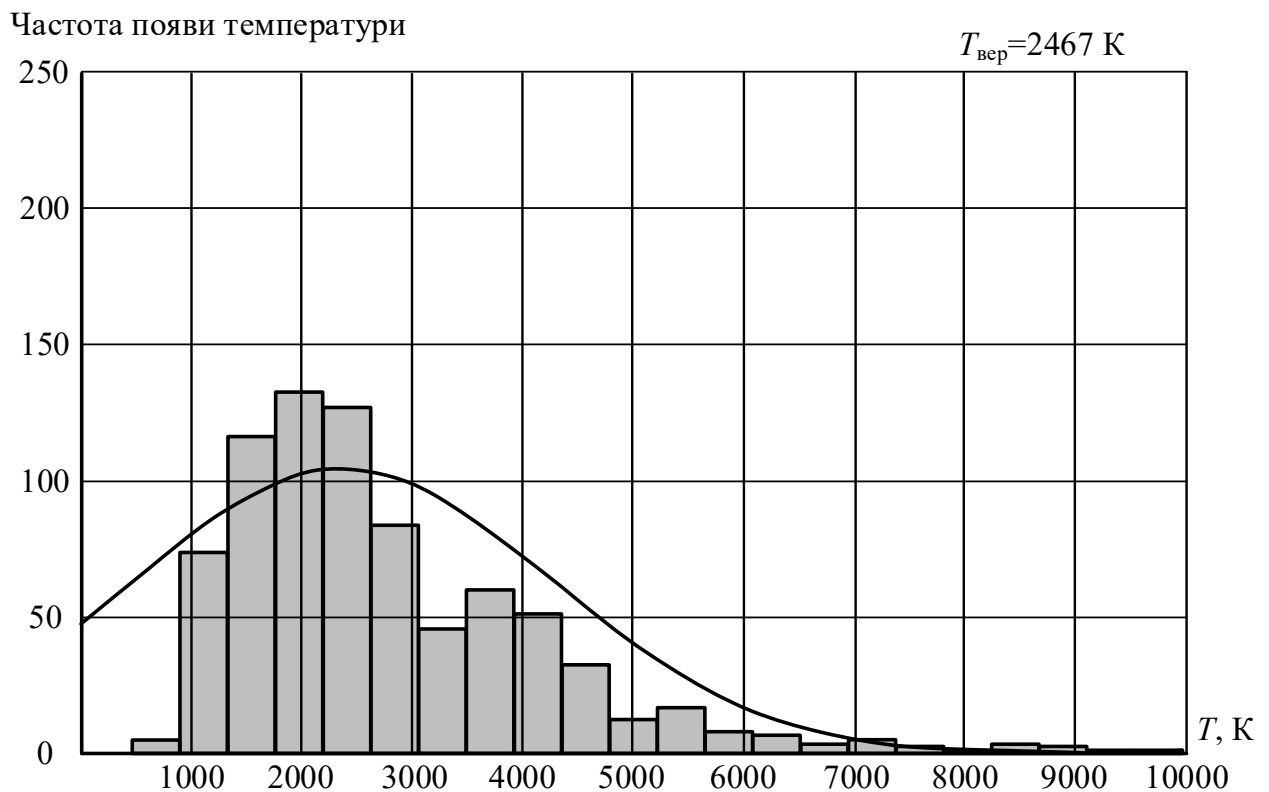


Рисунок 3.3 – Температурна гістограма, яку отримано зі застосуванням поліхроматичного методу вимірювального контролю

Для здійснення обліку впливу оптичного випромінювання від аргонної плазми плазмотрона застосовуються довідкові інформаційні дані, а також результати попередніх експериментальних досліджень. Спектр розподілу оптичного випромінювання, а також випромінювання від катода, наведено на рис. 3.4. Довжини хвиль для розрахунку значення температури обираються на ділянках спектру, що не має максимального значення оптичного випромінювання від плазми.

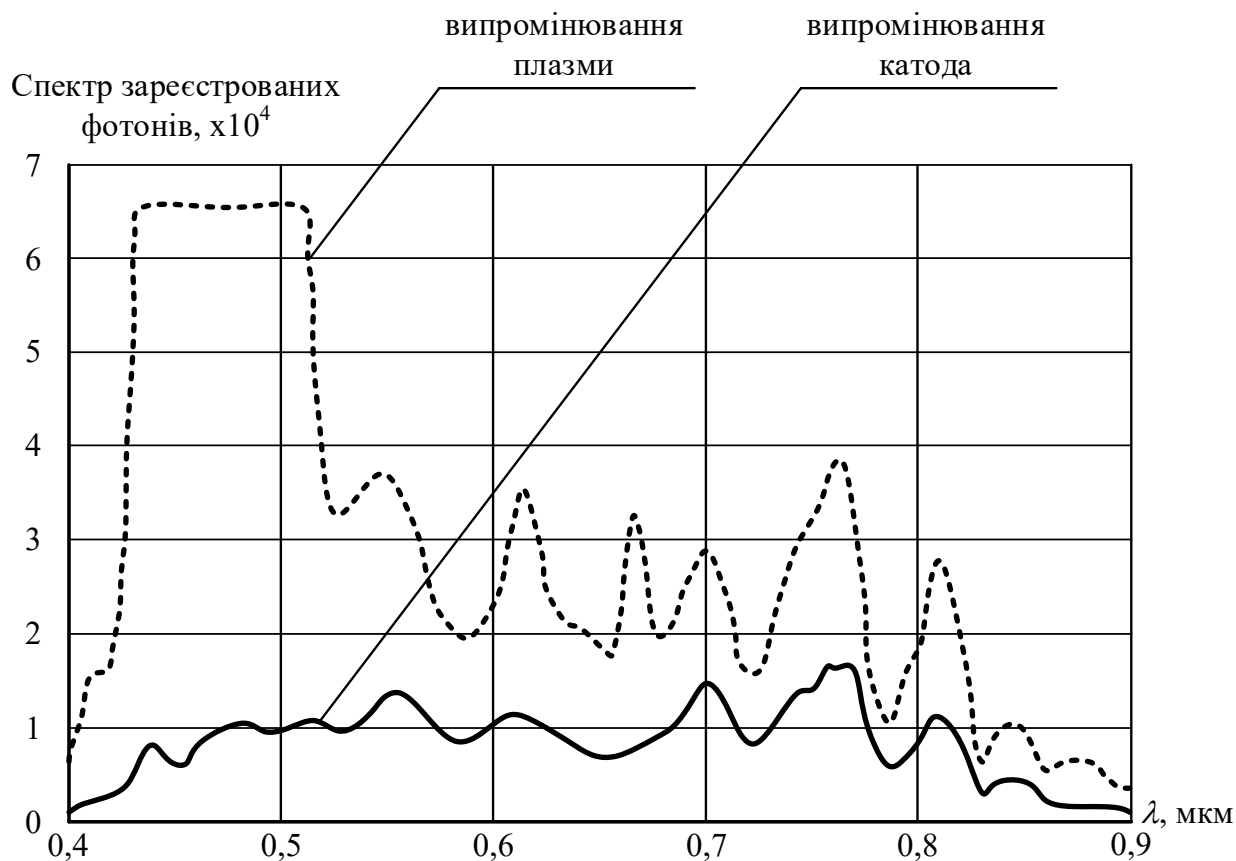


Рисунок 3.4 – Спектр розподілу оптичного випромінювання, а також випромінювання від катода

Значення температури за довжиною катода змінюється від 2450 К, що складає в його основі, та до 2690 К, що становить на осі катода. Отримані значення градієнту температури корелюють з величинами температур, що закладалися під час розробки та створення пристроїв охолодження катода плазмотрона.

Під час аналізу результатів експериментальних досліджень [19] визначення значення в стаціонарному режимі температури вольфрамового катода можна зробити висновок, що можна застосовувати поліхроматичний метод вимірювання температури, значення якої знаходиться поза межами існуючих у теперішній час реперних точок, а також під час відсутності додаткової інформації щодо здатності до випромінювання поверхні.

Під час попереднього аналізу спектру, що досліджується, з виключенням ділянок оптичного випромінювання плазми дозволить визначати ефективність

зазначеного методу в порівнянні його з класичними безконтактними методами вимірювання температури. Якщо існує необхідність визначення у стаціонарному режимі високих температур, то для захисту фотоприймача оптичного випромінювання від засвічення необхідно застосовувати нейтральні світлофільтри, які виготовляються з оптичного скла типу НС.

3.2 Розробка електронного пристрою вимірювання температури під час нагрівання металів імпульсами струму

Після апробації зазначеного методу з вимірювання в стаціонарних умовах температури не більше 2500 К, необхідно виконати дослідження за більш високі значення температури. З обліком потужності, значення якої підвищується, переважна більшість процесів будуть мати нестационарний характер та швидко змінюватися.

Одним з зазначених процесів є нагрів матеріалів, що є тугоплавкими, за допомогою імпульсів струму високої потужності. Такі дослідження необхідно здійснювати для визначення температурних властивостей матеріалів, а також вимірювання точок фазового переходу.

Дослідження мають місце для вимірювання температур, значення яких більше 3000 К, зі застосуванням поліхроматичного методу без використання функції Вина для вимірювання точки фазового переходу танталу, зовнішній вигляд зразків якого наведено на рис. 3.5.

Як матеріал для зразків застосовується тантал, температура плавлення якого становить 3300 К. Під час виконання різних експериментальних досліджень встановлено, що значення температури фазового переходу мають різні результати. Отже, тантал задовольняє вимогам до зазначених температурних досліджень. Зразки виготовляються у вигляді пластин з танталу, який має 1 % домішки ніобію. Цей зразок розміщено під оптичним склом ТФ-5, а як підкладка застосовується оптичне скло К-8. Для забезпечення закріплення

скла зі зразком застосовуються пластини з текстоліту. Геометричні розміри зразків танталу 14 x 4мм.

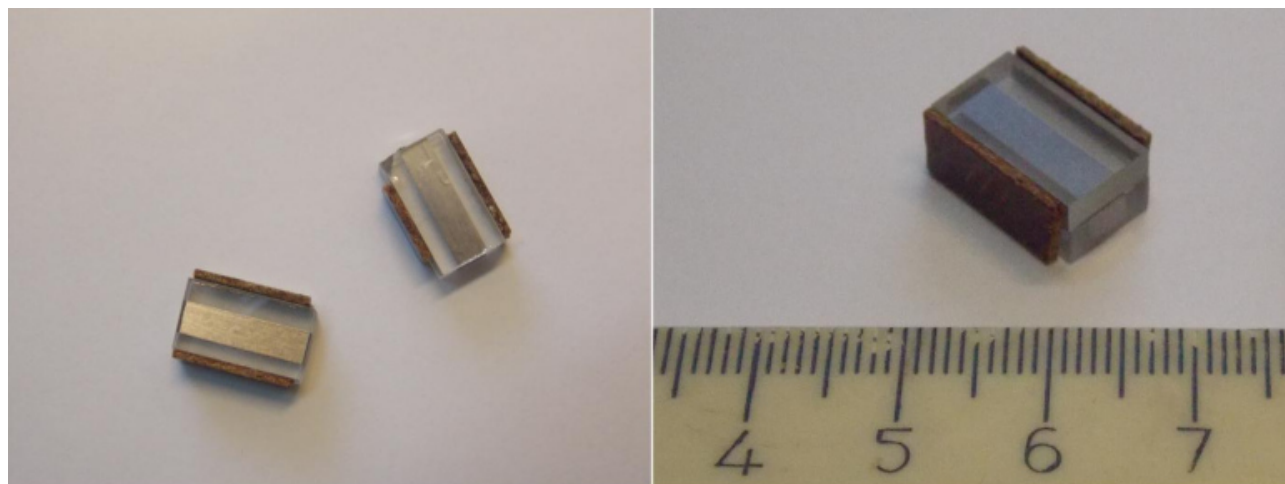


Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд зразків з танталу

Для забезпечення нагрівання зразка, що досліджується, до температури плавлення потрібно мати імпульс струму великої потужності. Для отримання цього імпульсу струму застосовується силовий блок типу ВС-20-10, паралельно якому підключено два конденсатора типу ІЧ 50-3 УЧ, які мають ємність 3 мкФ та максимальне значення напруги 50 кВ, також застосовується керамічний дисковий резистор опором 6 Ом, що має малу величину індуктивності.

Нагрівання зразка імпульсами струму є доволі швидкодіючим процесом, тому потрібно забезпечити синхронізацію роботи спектрометра та силового блоку. Як блок синхронізації нагрівання зразка танталу зі застосування імпульсів струму та спектрометра застосовується генератор імпульсів типу Г5-63. Для здійснення формування імпульсів необхідної амплітуди та тривалості, який здійснює запуск спектрометра, використовується генератор імпульсів типу Г5-54.

Під час нагрівання зразка може статися його вибух. Для забезпечення вимог до техніки безпеки під час експериментальних досліджень необхідно зразок розмістити в тисках, що забезпечить розподілення електричного контакту у захисній камері.

Схему структурну розробленого стенду для експериментальних досліджень температури зразка танталу наведено на рис. 3.6. У стенді застосовується кіловольтметр для вимірювання падіння напруги на конденсаторах типу ІЧ 50-3 УЧ, а також осцилограф для визначення амплітуди струму під час розряду конденсаторів на зразок, що досліджується. Зовнішній вигляд камери зі зразком, контактними лещатами та підключенням оптико-волоконного кабелю спектрометра наведено на рис. 3.7.

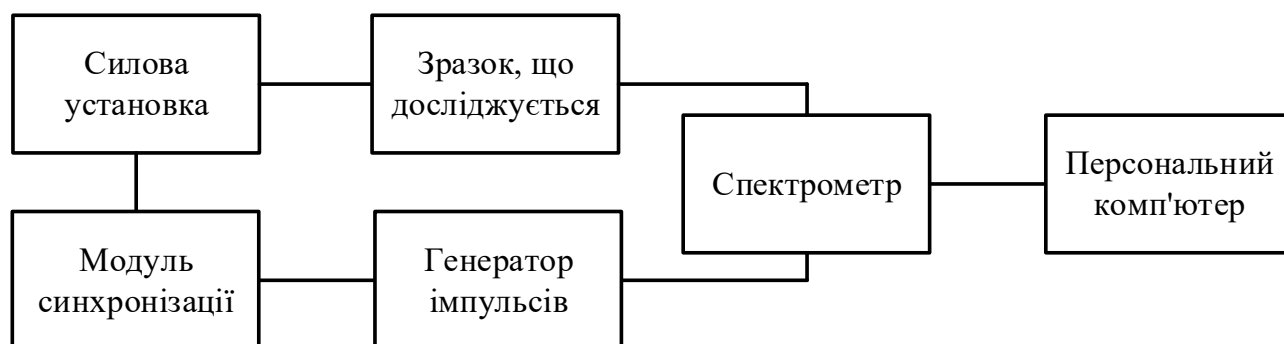


Рисунок 3.6 – Схема структурна розробленого стенду для експериментальних досліджень температури зразка танталу

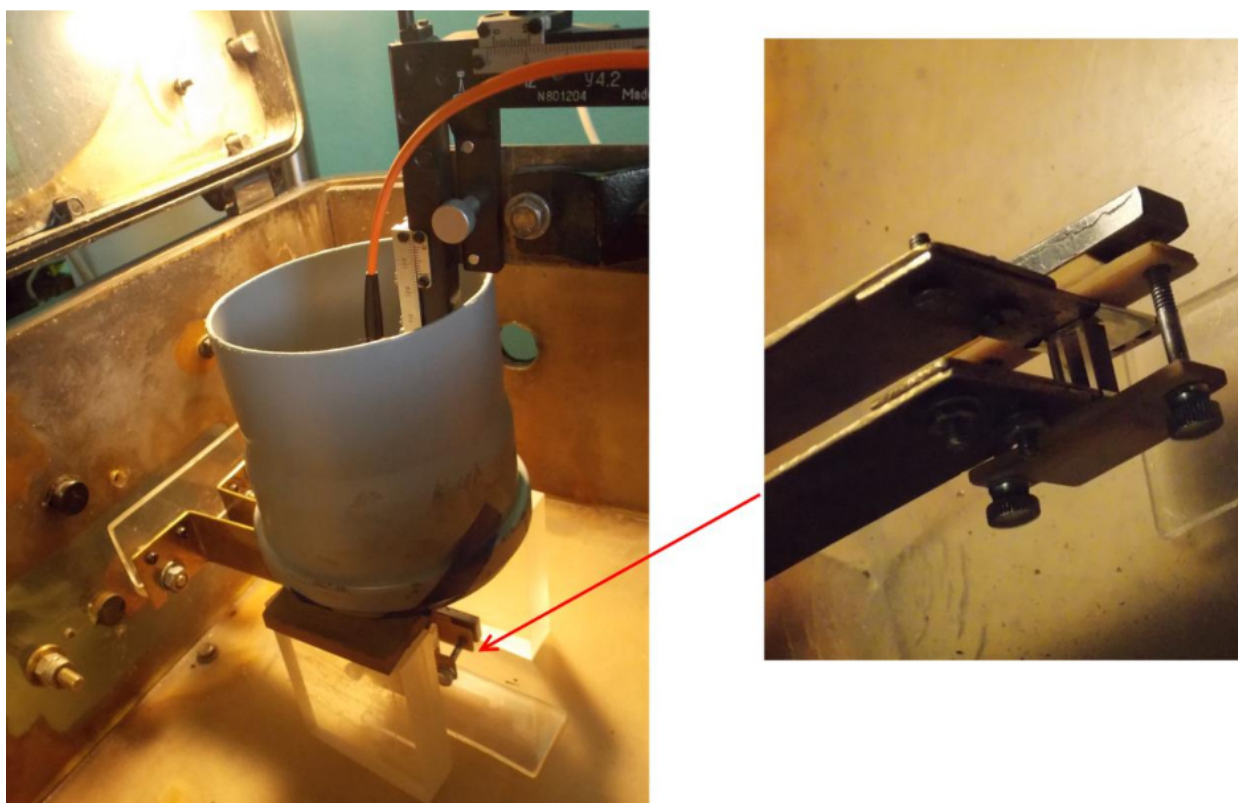


Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд камери зі зразком

Забезпечення калібрування спектрометра виконується зі застосуванням моделі абсолютно чорного тіла типу Mikron M360.

Спочатку експериментальних досліджень має місце заряд конденсаторів від силової блоку до величини напруги 7 кВ. Після закінчення заряду з формуванням стартового імпульсу від блоку синхронізації має місце розряд конденсаторів протягом тривалості імпульсу 100 мкс. Під час цього розряду величина температура зразка може сягати точки плавлення. Значення застосованого часового інтервалу співпадає з найменшим часом експозиції лінійки зі зарядовим зв'язком типу TCD1304, що наводиться в технічних характеристиках спектрометра. Під час розряду конденсаторів на зразок передається імпульс струму, який здійснює нагрівання зразка до значення температур (3000 – 4000) К, що попередньо оцінюється за допомогою однохвильового яскравого пірометричного вимірювача температури.

Під час реалізації експериментальних досліджень вимірюються масиви наборів спектрів оптичного випромінювання та виконується визначення значення температури зі застосуванням поліхроматичного методом чисельними методами без застосування функції Вина. Спектр теплового оптичного випромінювання від зразка під час нагрівання його імпульсом струму наведено на рис. 3.8. Гістограму температури, що визначено з масивів даних цього спектру, наведено на рис. 3.9.

Результат визначення температури знаходиться в межах від 3000 до 3450 К. Розкид значень температури обумовлено різницею геометрії в зразків, що не дозволяло точно отримати точку плавлення танталу. Якщо використовувати зразків, які мають точку плавлення приблизно 3400 К, то данні є узгодженими з довідниковим значенням температури плавлення.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок щодо можливості застосування наведеного поліхроматичного методу для вимірювального контролю високих значень температури в процесах, що мають високу швидкодію. Отримане значення систематичної похибки вимірювання температури склало не більше 100 К.

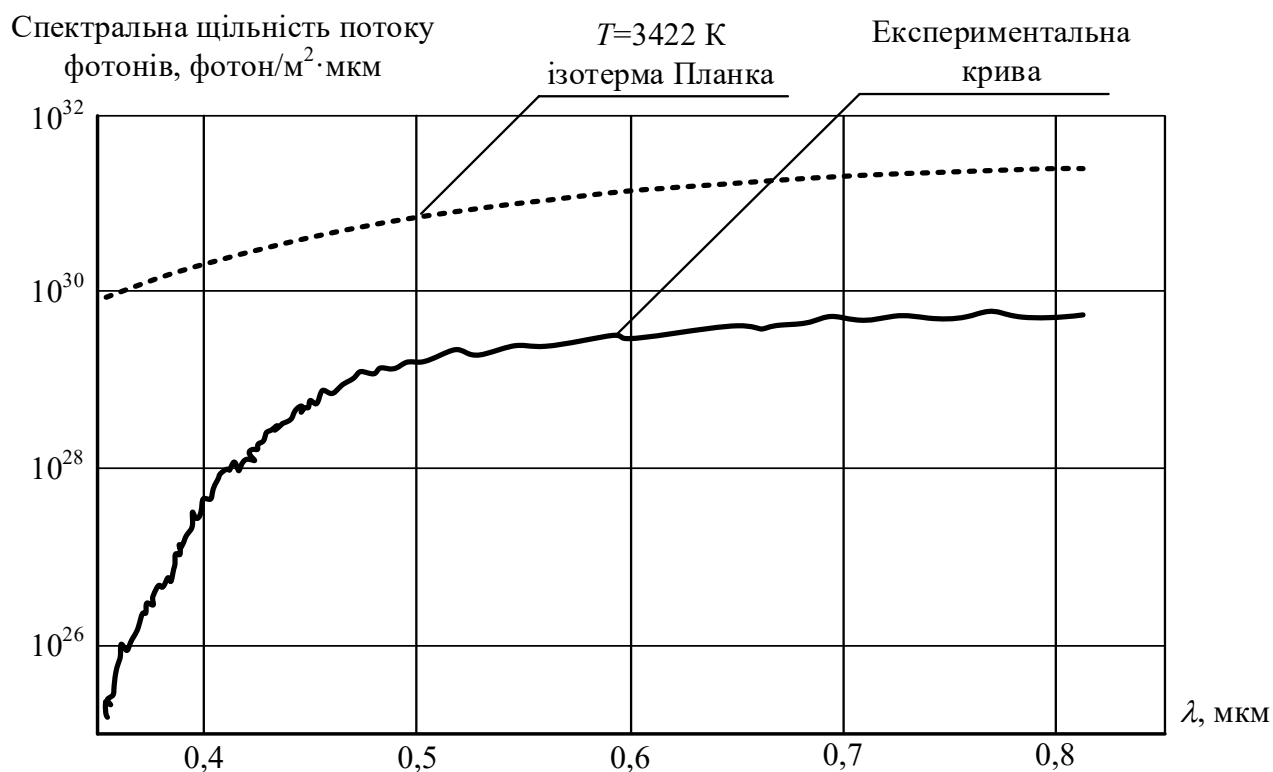


Рисунок 3.8 – Спектр теплового оптичного випромінювання від зразка під час нагрівання його імпульсом струму

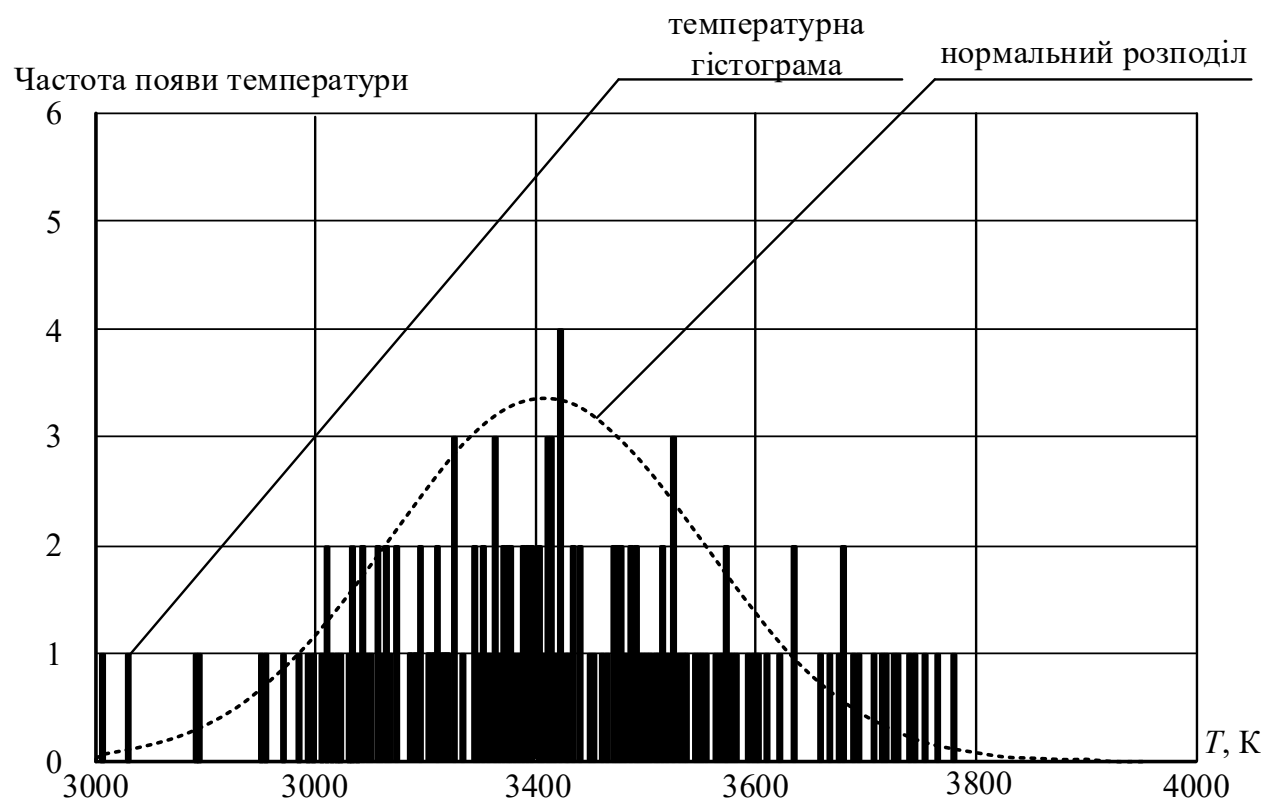


Рисунок 3.9 – Гістограма температури, що визначено з масивів даних цього спектру

Для удосконалення описаного методу вимірювання значення високих температур під час аналізу процесів, що швидко змінюються, є застосування замість лінійок зі зарядовим зв'язком швидкодіючих матриць зі зарядовим зв'язком з накопиченням заряду та часовою затримкою.

3.3 Висновки

Розроблено стенд для експериментальних досліджень спектрального визначення температури катоду з вольфраму, як стаціонарного процесу. До складу стенду входить оптична система з фокусуванням, спектрометр, який має лінійку зі зарядовим зв'язком, та персональний комп'ютер для обробки результатів вимірювання та побудови спектрів зі застосуванням поліхроматичного методу.

Під час аналізу результатів досліджень визначення величини температури вольфрамового катода плазмотрона доказано можливість використання поліхроматичного методу під час вимірювального контролю величин температур, які знаходяться за межами реперних точок. Ці точки використовуються у теперішній час в МТШ-90, а також їх можна застосовувати під час відсутності інформації щодо здатності до оптичного випромінювання поверхні, що досліджується.

Розроблено стенд для здійснення досліджень процесів, які мають доволі високу швидкість протікання, а саме для процесу нагрівання пластин провідника імпульсним струмом. До складу стенду формування розряду струму входить блок синхронізації, оптичний блок, блок реєстрації спектру та персональний комп'ютер для розрахунку значення температури зі застосуванням поліхроматичного методу.

Під час проведення досліджень встановлено можливість визначення температури зразків танталу зі застосуванням поліхроматичного методу для визначення високої температури процесів, що швидко змінюються.

Для здійснення вимірювального контролю високих значень температур зі застосуванням поліхроматичного методу необхідно використовувати блок захисту реєстратора оптичного випромінювання від засвічування за допомогою ослаблення оптичного сигналу.

Під час виконання досліджень процесів, які мають достатньо високу швидкодію необхідно застосовувати швидкісні реєстратори, які мають часовий інтервал експозиції від одиниць до десятків мікросекунд, це дозволяє здійснювати оцінку в динамічному режимі роботи.

ВИСНОВКИ

У теперішній час, незважаючи на отримання високотемпературних сплавів металів і вуглецю, застосування шкал температури в області високих значень температур до 3000 К має доволі високу складність зазначеного сплаву зі стабільною точкою фазового переходу.

Переважає більшість методів спектрального визначення температури використовує функцію Вина, застосування якої дозволяє визначати величину температури без використання наближених методів розрахунку. Для зменшення величини похибки, що обумовлено зазначеним наближенням, під час переходу до вимірювання високих температур область спектра зсувається до коротких хвиль.

Вимірювальний контроль значення температури без інформації щодо коефіцієнта оптичного випромінювання об'єкта дослідження остаточно не вирішено. Існує необхідність удосконалення вимірювальних електронних пристроїв, що повинні мати високе значення чутливості, це дозволяє зменшити складову методичної похибки вимірювання температури без застосування способів корекції значення коефіцієнта оптичного випромінювання.

Виконано оцінку величини систематичної похибки результату вимірювання, значення якої істотно зменшується під час переходу до розрахунків температури від наближеної функції Вина до ітераційних розрахунків температури. Величина систематичної похибки результату вимірювання може бути більше 10 %, що вказує на необхідність переходу до ітераційних розрахунків під час вимірювання високих температур для зменшення цієї складової похибки.

Виконано розрахунок величини інструментальної похибки результату вимірювання для зазначеного методу. Доказано, що величина інструментальної похибки під час застосування наближеної функції Вина може бути не менше 3%, що вказує на можливість застосування співвідношення для визначення

інструментальної похибки з використанням функції Вина в більшості практичних задач.

Розраховано значення методичної похибки для зазначеного методу. Виконано оцінку величини методичної похибки зі застосуванням функції Вина, величина якої більше 10 %, що вказує на необхідність оцінки величини цієї похибки без застосування функції Вина.

Розроблено стенд для експериментальних досліджень спектрального визначення температури катоду з вольфраму, як стаціонарного процесу. До складу стенду входить оптична система з фокусуванням, спектрометр, який має лінійку зі зарядовим зв'язком, та персональний комп'ютер для обробки результатів вимірювання та побудови спектрів зі застосуванням поліхроматичного методу.

Розроблено стенд для здійснення досліджень процесів, які мають доволі високу швидкість протікання, а саме для процесу нагрівання пластин провідника імпульсним струмом. До складу стенду формування розряду струму входить блок синхронізації, оптичний блок, блок реєстрації спектру та персональний комп'ютер для розрахунку значення температури зі застосуванням поліхроматичного методу.

Під час проведення досліджень встановлено можливість визначення температури зразків танталу зі застосуванням поліхроматичного методу для визначення високої температури процесів, що швидко змінюються.

Для здійснення вимірювального контролю високих значень температур зі застосуванням поліхроматичного методу необхідно використовувати блок захисту реєстратора оптичного випромінювання від засвічування за допомогою ослаблення оптичного сигналу.

Під час виконання досліджень процесів, які мають достатньо високу швидкодію необхідно застосовувати швидкісні реєстратори, які мають часовий інтервал експозиції від одиниць до десятків мікросекунд, це дозволяє здійснювати оцінку в динамічному режимі роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. The International Temperature Scale of 1990 / Metrologia, 1990. – №. 27. – P. 310.
2. Походун, А.И. Современное состояние и перспективы развития термометрии / А.И. Походун // Мир Измерений, 2011. – № 4(122). – С. 64.
3. Чуновкина, А.Г. Методы обработки результатов ключевых сличений и их влияние на принятие решений о подтверждении неопределенностей измерений, заявляемых участниками сличений / А.Г. Чуновкина // «ТЕМПЕРАТУРА-2015». – СПб: ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева», 2015. – С. 42 – 44.
4. Тымкул, В.М. Методика и результаты измерения температуры сложных поверхностей на основе поляризационных термограмм / В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, Ю.А. Фесько // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2014 – №1(5). – С. 81 – 87.
5. Felice, R.A. The Spectropyrometer – a Practical Multi-wavelength Pyrometer / R.A. Felice // Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry; Eighth International Temperature Symposium held 21-24 October 2002 in Chicago, Illinois, 2002. – № 7. – P. 711 – 716.
6. Felice, R.A. Expert System Spectropyrometer Results for non-black, ton-grey, or Changing Emissivity and Selectively Absorbing Environments / R.A. Felice // International workshop – Radiation measurements of bodies with unknown emissivities at the ElectroTechno exposition (Nov. 2 – 4, Moscow) – Moscow, 2003.
7. Yang, C-L. Optimum identifications of spectral emissivity and temperature for multi-wavelength pyrometry / C-L Yang, J-M Dai, Y. Hu // Chinese Phys. Lett, 2003. – № 20(10). P. 1685 – 1688.
8. Свет, Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур / Д.Я. Свет. – М.: Наука, 1982. – 296 с.
9. Фрунзе, А.В. Алгоритм определения действительной температуры

объекта с учетом температурной зависимости его излучательной способности / А.В. Фрунзе // Датчики и системы, 2014. – №10. С. 50 – 54.

10. Магунов, А.Н. Спектральная пирометрия / А.Н. Магунов. М.: Физматлит, 2012. – 248 с.

11. Фрунзе, А.В. Пирометры спектрального отношения: преимущества, недостатки и пути их устранения/ А.В. Фрунзе // Фотоника, 2009. – №4. С. 32 – 37.

12. Русин, С.П. Об определении температуры непрозрачных материалов по спектральному максимуму теплового излучения / С.П. Русин // Теплофизика высоких температур, 2014. – Т. 52. – №5. – С. 698 – 703.

13. Магунов, А.Н., Спектральная пирометрия / А.Н. Магунов // Приборы и техника эксперимента, 2009. – №4. С 5 – 28.

14. Магунов, А.Н. Лазерная термометрия твердых тел / А.Н. Магунов. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.

15. Магунов, А.Н. Выбор спектрального интервала, в котором нагретый непрозрачный объект излучает как серое тело / А.Н. Магунов // «Приборы и техника эксперимента», 2010. – № 6. – С. 148 – 152.

16. Магунов, А.Н. Измерение температуры объектов с неизвестной излучательной способностью методом спектральной пирометрии / А.Н. Магунов // Научное приборостроение, 2010. – Т.20. – № 3. – С. 22 – 26.

17. Снопко, В.Н. Основы методов пирометрии по спектру теплового излучения / В.Н. Снопко. – Минск: Институт физики им. Б.И. Степанова, 1999. – 224 с.

18. Брамсон, М.А. Инфракрасное излучение нагретых тел / М.А. Брамсон. – М.: Наука, 1964. – 226 с.

19. Бодров, В.Н. О возможности определения высоких значений термодинамической температуры в условиях плазменных помех при отсутствии реперных точек / В.Н. Бодров, М.А. Бесчастный // Приборы, 2015. – № 8. – С. 28 – 33.

ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві

До приміщення науково-дослідного відділу та організації робочого місця з обліком шкідливих виробничих факторів пред'являється ряд вимог. Приміщення, в якому знаходиться робоче місце з персональним комп'ютером, повинно мати природне освітлення, бажано з однобічним розміщенням світових прорізів, площа осклянілості яких не повинна перевищувати 25 % від площі стіни світових прорізів. Віконні прорізи в приміщенні з персональним комп'ютером повинні мати регульовані жалюзі чи занавіски або інші сонцезахисні пристрої. Не допускається розташування робочих місць з персональним комп'ютером у підвальних і цокольних поверхах. Робочі місця з персональними комп'ютерами рекомендується розміщувати в окремих приміщеннях. Площа на одного працюючого з персональним комп'ютером повинна складати 6 м², об'єм – 20 м³. Неприпустиме розташування персонального комп'ютера, під час якого працюючий звернений обличчям або спиною до вікон чи кімнати задньої частини персонального комп'ютера, де монтуються вентилятори.

Забороняється застосовувати для обробки інтер'єра приміщень з персональними комп'ютерами полімерні матеріали (дерев'яностружечні плити, шпалери, що миються, плівкові та рулоні синтетичні матеріали, шаруватий паперовий пластик та ін.), що виділяються в повітря шкідливі хімічні речовини, що перевищують гранично допустимі концентрації, не включені до «Переліку дозволених, МЗ» 1977-1985 р.

У лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідної роботи робочі місця з персональними комп'ютерами розташовані від стіни з вікнами на відстані 1 м, відстань між столами 3 м. Екрани моніторів знаходяться від очей користувача на відстані 700 мм відповідно до СН 512-78, приміщення ($S=21 \text{ м}^2$, $V=73,5 \text{ м}^3$) дозволяє розташовувати більше 3 робочих місця.

Робочі місця в положенні сидячі відповідають вимогам ДСТ 12.2.032 – 78 та ДСТ 12.2.029 – 77. Поверхня робочого столу знаходиться на висоті 0,75 м від підлоги, розміри робочої поверхні стільниці складають 1050x590 міліметрів, розміри вільного простору для ніг під столом складає висота 650, глибина 550, ширина 450 міліметрів, відповідно. Робочий стілець оснащений підйомно-поворотним пристроєм, що забезпечує регуляцію висоти сидіння та спинки, пневматичним і гідравлічними амортизаторами та обладнанні підлокітниками.

А.1 Мікроклімат робочого місця

У приміщенні науково-дослідного відділу є джерела тепловиділення, тому необхідно визначити необхідні умови його вентилявання. Витрати повітря в приміщенні з додатковим тепловиділенням визначаються за формулою:

$$L = \frac{Q_{\text{НАД}}}{c \cdot p \cdot (t_{\text{В}} - t_{\text{Н}})}, \quad (\text{A.1})$$

де $Q_{\text{НАД}}$ – надлишкове виділення тепла в робочому приміщенні, ккал/год.;

c – теплоємність повітря (0,237 ккал/кг);

p – об’ємна вага повітря (1,226 кг/м³);

$t_{\text{В}}$ – температура витяжного повітря (30°C);

$t_{\text{Н}}$ – температура приточного повітря (20°C).

Розраховується надлишкове надходження тепла за формулою:

$$Q_{\text{НАД}} = Q_{\text{УСТ}} + Q_{\text{ПЕР}} + Q_{\text{ОСВ}} + Q_{\text{СР}}, \quad (\text{A.2})$$

де $Q_{\text{уст}}$ – виділення тепла від устаткування;

$Q_{\text{пер}}$ – виділення тепла від персоналу;

$Q_{\text{осв}}$ – надходження тепла від електричного освітлення;

$Q_{\text{ср}}$ – надходження тепла від сонячної радіації через вікна.

Визначається виділення тепла від устаткування за формулою:

$$Q_{\text{уст}} = P \cdot K_a \cdot K_6 \cdot 860, \quad (\text{A.3})$$

де P – сумарна потужність устаткування, кВт/год;

K_a – коефіцієнт установленної потужності (0,95);

K_6 – коефіцієнт одночасної роботи (1,0).

$$\begin{aligned} Q_{\text{уст}} &= [x_1 \cdot k_1 + x_2 \cdot k_2 + x_3 \cdot k_3 + x_4 \cdot k_4 + x_5 \cdot k_5 + x_6 \cdot k_6 + x_7 \cdot k_7 + \\ &+ x_8 \cdot k_8 + x_9 \cdot k_9] \cdot K_a \cdot K_6 \cdot 860 = \\ &= [1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,07 + 2 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,06 + 1 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,6 + 4 \cdot 0,15 + \\ &+ 1 \cdot 3,5] \cdot 0,95 \cdot 1 \cdot 860 = 5131 \text{ ккал/год.} \end{aligned}$$

Визначається виділення тепла від обслуговуючого персоналу за допомогою формули:

$$Q_{\text{пер}} = n \cdot g = 2 \cdot 100 = 200 \text{ ккал/год,} \quad (\text{A.4})$$

де n – кількість працюючих;

g – кількість тепла, що виділяє один працівник за годину (100 ккал/год.).

Визначається надходження тепла від електричного освітлення за формулою:

$$Q_{\text{осв}} = E_m \cdot g_1 \cdot S = 300 \cdot 0,05 \cdot 21 = 315 \text{ ккал/год,} \quad (\text{A.5})$$

де E_M – нормована освітленість для зорової роботи, величина якої дорівнює 300 лк;

g_1 – питома тепловиділення на 1 м² підлоги під час освітленості в 1 лк (для люмінесцентних ламп – 0,05 ккал/год.);

S – площа приміщення, м².

Визначається надходження тепла від сонячної радіації через вікна за формулою:

$$Q_{CP} = F \cdot g_2 \cdot K_{OCL} = 7,5 \cdot 65 \cdot 0,4 = 195 \text{ ккал/год}, \quad (A.6)$$

де F – площа віконних прорізів (3 x 2,5=7,5 м²);

g_2 – кількість тепла, що надходить через 1 м² віконного прорізу (65 ккал/год.);

K_{OCL} – коефіцієнт ослаблення, приймається 0,4.

Визначається кількість надлишкового тепла:

$$Q_{HAД} = Q_{УСТ} + Q_{ПЕР} + Q_{OCB} + Q_{CP} = 5131 + 200 + 315 + 195 = 5841 \text{ ккал/год.}$$

Визначаються витрати повітря в приміщенні:

$$L = \frac{Q_{HAД}}{c \cdot p \cdot (t_B - t_H)} = \frac{5848}{0,237 \cdot 1,226 \cdot (30 - 20)} = 2010 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Існуюча в наявності система кондиціонування та вентилявання має продуктивність 2200 м³/год., що задовольняє необхідним нормативам.

Параметри мікроклімату на робочих місцях регламентуються ДНАОП 0.03.3.15 – 86 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень № 4088–86». Відповідно доданих санітарних норм температура повітря, швидкість руху повітря та відносна вологість у холодні періоди року повинна складати

(22 – 24) градуса за Цельсієм, 0,1 метра в секунду та (40 – 60) %, відповідно. Під час збереження всіх параметрів можливе коливання температури від 21 до 25 градусів Цельсія. У теплі періоди року температура повітря повинна складати (23 – 25) градусів Цельсія, швидкість руху повітря (0,1 – 0,2) метрів в секунду, вологість (40 – 60) %. Температура може коливатися від 22 до 26 градусів Цельсія під час збереження всіх інших параметрів мікроклімату. Вище зазначені норми цілком відповідають фактичним даним приміщення лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідним відділом.

А.2.2 Розрахунок системи загального рівномірного освітлення з лампами розжарювання для приміщення, в якому використовуються зорові роботи високої точності

Розміри приміщення: довжина ($a=6$ м), ширина ($b=3,5$ м), висота ($H=3,5$ м). Приміщення має світлу побілку: коефіцієнт відбиття $P_{\text{стелі}} = 70$ %, $P_{\text{стін}} = 50$ %. Висота робочих поверхонь (столів) $h_p = 0,7$ м. Для освітлення прийнято світильники типу УПМ-15, що розташовано на стелі, відстань від світильника до стелі $h_c = 0,4$ м. Мінімальна освітленість за нормами $E=200$ лк.

1) Визначається висота підвісу світильників над підлогою:

$$h_0 = H - h_c = 3,5 - 0,4 = 3,1 \text{ м.}$$

Для світильників загального освітлення з лампами розжарювання потужністю до 200 Вт мінімальна висота підвісу над підлогою відповідно до СНІП П-4-79 повинна бути в межах (2,5 – 4,0) м, залежно від характеристики світильника. Освітлення лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідного відділу відповідає цій вимозі.

2) Визначається висота підвісу світильника над робочою поверхнею:

$$h = h_0 - h_p = 3,1 - 0,7 = 2,4 \text{ м.}$$

Рівномірність освітлення досягається під час відповідного співвідношення відстані між світильниками (L) та висоти їх підвісу (h).

3) Визначається рекомендована відстань між світильниками:

$$L = 0,7 \cdot h = 0,7 \cdot 2,4 = 1,68 \text{ м.}$$

4) Розраховується необхідна кількість світильників:

$$N = \frac{a \cdot b}{L^2} = \frac{6 \cdot 3,5}{1,68^2} = 7,4.$$

Приймається 8 світильників, з обліком розмірів приміщення вони розташовуються у два ряди по 4 штуки.

5) Світловий потік лампи світильника ($\Phi_{\text{л}}$) визначається за формулою:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot K_3 \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta},$$

де E – нормативна освітленість, лк;

K_3 – коефіцієнт запасу, який враховує зниження освітленості в результаті забруднення та старіння ламп;

S – площа приміщення, що освітлюється, м²;

Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення для ламп розширювання (1,15);

N – кількість світильників;

n – кількість ламп у світильнику;

η – коефіцієнт використання світового потоку, що визначається за світлотехнічними таблицями залежно від показника приміщення (i) та

коефіцієнтів відбиття стін і стелі.

6) Визначається показник приміщення:

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} = \frac{6 \cdot 3,5}{3,5 \cdot (6 + 3,5)} = 2,21.$$

Коефіцієнт використання $\eta = 0,48$ для світильника УПМ-15 ($i = 2,5$, $P_{\text{стелі}} = 70\%$, $P_{\text{стін}} = 50\%$)

Світловий потік одного світильника, а значить і лампи, оскільки за конструктивним виконанням у світильнику цього типу встановлена лише одна лампа, дорівнює:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 21 \cdot 1,15}{6 \cdot 1 \cdot 0,48} = 1677 \text{ лм.}$$

9) обирається лампа Б-150 потужністю 150 Вт, світловий потік якої дорівнює 2000 лм. Хоча це значення на 19,2 % більше розрахованого, проте не перевищує встановлену норму ($-0\% < \Phi_{\text{л}} < +20\%$). Сумарна електрична потужність усіх світильників, встановлених у приміщенні становить:

$$P_{\text{св}} = P \cdot N = 150 \cdot 8 = 1200 \text{ Вт.}$$