

5. Золотухин, И. В. Нанокондитные структуры на пути в наноэлектронику [Текст] / И. В. Золотухин, Ю. В. Калинин, А. В. Ситников // Природа. – 2006. – № 1. – С. 11–19.
6. Береснев, В. М. Физико-химические и механические свойства наноструктурных нитридных покрытий [Текст] / В. М. Береснев, О. В. Соболев, Д. А. Колесников и др. // Металлофизические новейшие технологии. – 2012. – Т. 34, № 2. – С. 139–160.
7. Pogrebnjak, A. D. Properties of AlN films deposited to silicon substrates [Text] / A. D. Pogrebnjak, A. K. M. Muhammed // International Journal of Structronics & Mechatronics. – 2012. – Vol. 1, Issue 2. – P. 1–3.
8. Borisova, A. Properties of Aluminum Oxynitride Films Prepared by Reactive Magnetron Sputtering [Text] / A. Borisova, A. Machulyansky, M. Rodionov, Y. Yakimenko, B. Babych // IEEE XXXIV International Scientific Conference “Electronics and Nanotechnology, 2014. – P. 122–125.
9. Розенберг, Г. В. Оптика тонкослойных покрытий [Текст] / Г. В. Розенберг. – М.: Наука, 1958. – 570 с.
10. Борн, М. Основы оптики [Текст] / М. Борн, Д. Вольф. – М.: Наука, 1973. – 719 с.
11. Теллен, О. Конструирование многослойных интерференционных светофильтров [Текст] / О. Теллен // Физика тонких пленок. – 1972. – Т. 5. – С. 46–83.
12. Золотарев В. М. Оптические постоянные природных и технических сред [Текст] / В. М. Золотарев, В. Н. Морозов, Е. В. Смирнова. – Л.: Химия, Ленинградское отделение, 1984. – 215 с.

*В роботі приведено результати досліджень метрологічних характеристик ІЧ радіометра. Радіометр має високу чутливість в робочому спектральному діапазоні від 4 до 5 мкм та широкий діапазон зміни енергетичних освітленостей – від 0.001 до 20 Вт/м<sup>2</sup>. Установлено умови виконання вимірювань з відносною похибкою вимірювань освітленості, що не виходить за межі ±6 %.*

*Ключові слова: сповіщувач полум'я, радіометр інфрачервоного випромінювання, енергетична освітленість, спектр полум'я, фотоприймачі ІЧ випромінювання*

*В работе приведены результаты исследования метрологических характеристик высокочувствительного ИК-радиометра. Радиометр имеет высокую чувствительность в рабочем спектральном диапазоне от 4 до 5 мкм и широкий диапазон изменений энергетических освещенностей – от 0.001 до 20 Вт/м<sup>2</sup>. Установлены условия выполнения измерений с относительной погрешностью измерений освещенности, которая не выходит за пределы ±6 %*

*Ключевые слова: извещатель пламени, радиометр инфракрасного излучения, энергетическая освещенность, спектр пламени, фотоприемники ИК излучения*

УДК 551.510.534621.383.52

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.33133

## МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИРОБНИЦТВА СПОВІЩУВАЧІВ ПОЛУМ'Я

**І. В. Докторович**  
Інженер-конструктор\*

**В. М. Годованюк**  
Голова правління\*

Доктор технічних наук, професор  
Чернівецький національний університет  
вул. Коцюбинського, 2,  
м. Чернівці, Україна, 58012  
E-mail: rhythm@chv.ukrpack.net

**В. Г. Юр'єв**  
Начальник спеціалізованого  
конструкторського бюро  
\*ВАТ “ЦКБ Ритм”

вул. Головна, 244, м. Чернівці, Україна, 58032

### 1. Вступ

При виробництві та випробуваннях сповіщувачів полум'я, які призначені для роботи в системах пожежної безпеки, виникає проблема калібрування малих рівнів оптичних сигналів – енергетичних потоків випромінювання або освітленостей. Для вимірювань зазначених фотометричних одиниць необхідно використовувати спеціалізовані засоби, які на сьогодні промислово не випускаються. На замовлення центру по випробуванню сповіщувачів полум'я розроблено ІЧ радіометр, подальше виробництво якого потребує детального опису умов виконання вимірювань параметрів. Не менш актуальним є питання метрологічних

характеристик процесу вимірювань, тобто питання похибок та можливі шляхи їх зменшення.

Оскільки ІЧ радіометр є пороговим вимірювачем, виникає ще одна проблема – забезпечення калібрування ІЧ радіометра засобами вимірювань малих рівнів потоків. Це підбір стабільних джерел випромінювання, використання відповідних контрольних фотоприймачів і надійних порогових пристроїв для вимірювання фотосигналів.

Окрім цих проблем виникає проблема методичного характеру: контрольні фотоприймачі мають широкий спектральний діапазон чутливості – вони чутливі від видимого (0.4 мкм) до далекого ІЧ (25 мкм) діапазону. Вимірювання ж необхідно проводити в вузькій смузі

спектру – від 4 до 5 мкм. Зважаючи на селективний характер потоку випромінювання, перехід з одного типу джерела (0.4–25 мкм) на інший (4–5 мкм) потребує серйозного попереднього дослідження методик виконання вимірювань та проведення калібрування ІЧ радіометрів.

## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

До кола питань щодо метрологічного забезпечення виробництва сповіщувачів полум'я належать пошук відповідних засобів виміральної техніки та реалізація виміральної схем із забезпеченням мінімальних можливих похибок вимірювань.

При випробуваннях сповіщувачів полум'я, регулюючи режим роботи джерела, необхідно устанавлювати та періодично контролювати енергетичну освітленість в площині розміщення сповіщувача полум'я в межах від 0.001 до 20 Вт/м<sup>2</sup>. Відомі на сьогодні радіометри інфрачервоного (ІЧ) випромінювання не забезпечують вимірювання малих рівнів освітленості – радіометр РАТ-2П має діапазон вимірювань енергетичної освітленості від 10 до 2000 Вт/м<sup>2</sup> [1]; вимірвач середньої потужності і енергії лазерного випромінювання ИМО-2Н – від 2 до 3.3·10<sup>5</sup> Вт/м<sup>2</sup> [2]; перетворювач густини теплового потоку ПТП-03 – від 0 до 500 Вт/м<sup>2</sup> та прилад для вимірювання густини теплового потоку ИТП-11 – від 10 до 99.9 Вт/м<sup>2</sup> [3]; мікропроцесорний прилад ИТП-МГ4 «Поток» – від 2 до 500 Вт/м<sup>2</sup> [4]. Як бачимо, вимірювання верхньої межі енергетичної освітленості (20 Вт/м<sup>2</sup>) можна провести будь-яким вищеприведеним вимірвачем, проте, вимірювання малих рівнів освітленості жоден з них не забезпечує.

Окрім зазначеної проблеми вимірювань існує потреба контролю зміни потоків на незначну величину. Так, при визначенні параметрів порогових властивостей та енергетичних характеристик чутливості електронно-оптичних приладів (ЕОП) для деяких із них необхідно змінювати потоки випромінювання – збільшувати або ослаблювати їх – на досить малі величини. Наприклад, контрастометри температури, датчики загазованості та задимленості, датчики переміщення і т. п., повинні реагувати на зміну потоків на (0.1–0.15) децибел, або в разях – в (1.02–1.04) рази. А отже, за допомогою радіометрів ІЧ випромінювання, чутливість яких не краща за 1 Вт/м<sup>2</sup>, неможливо визначити зміну енергетичної освітленості з 1 до 1.04 Вт/м<sup>2</sup> – на таку зміну радіометр просто не зреагує.

Таким чином виникає потреба в ІЧ радіометрі з пороговою чутливістю 0.001 Вт/м<sup>2</sup>.

Як відомо [5] випромінювання тіл в інфрачервоному діапазоні довжин хвиль обумовлене температурою даного тіла. Найбільш універсальними джерелами з неперервним широким спектральним діапазоном випромінювання є теплові джерела, а точніше, моделі абсолютно чорних тіл. Найширшого застосування в установах для контролю фотоелектричних параметрів електронно-оптичних пристроїв набули АЧТ з температурами 373 К, 573 К і 1200 К [6]. Тому для вимірювань фотоелектричних параметрів ІЧ радіометрів в процесі досліджень необхідно було вибрати оптимальне по температурі та енергоспоживанню джерело оптичного випромінювання.

Важливим моментом в технічному завданні на розробку ІЧ радіометра була вимога щодо спектрального діапазону чутливості. Якщо спектральна характеристика первинного перетворювача відмінна від вимог, проводять так зване корегування. Оскільки вищезгадані радіометри не забезпечують порогової чутливості, немає змісту корегувати їх спектральні характеристики. При розробці ІЧ радіометра був підібраний відповідний інтерференційний фільтр, який змінив форму характеристики. Природно що вона відмінна від теоретичної, а тому важливо правильно врахувати її при калібруванні радіометра [7].

## 3. Цілі та задачі досліджень

На сьогодні виробництво сповіщувачів полум'я не забезпечене контрольними засобами вимірювань параметрів оптичного випромінювання, яке використовується при перевірці якості сповіщувачів.

На замовлення НВФ «Тензор» авторами розроблений ІЧ радіометр, який повинен бути робочим засобом вимірювання при випробуваннях сповіщувачів полум'я і повинен забезпечувати:

- робочий спектральний діапазон – від 4 до 5 мкм;
- діапазон вимірювань енергетичної освітленості – від 0.001 до 20.0 Вт/м<sup>2</sup>;
- межі допустимої основної відносної похибки вимірювань енергетичної освітленості ( $\delta_E$ ) в діапазоні від 0.02 Вт/м<sup>2</sup> до 20 Вт/м<sup>2</sup> – не більші  $\pm 6\%$ .

Правильний вибір засобів вимірювань, побудова устанавки, контроль параметрів потоку випромінювання та досягнення мінімальних похибок вимірювань – це мета проведення досліджень параметрів засобів вимірювань сповіщувачів полум'я. Висвітлення та розв'язання розглянутих проблем дозволить розробникам зекономити час з метрологічного забезпечення розробок сповіщувачів.

## 4. Конструктивні рішення при розробці радіометра

Випромінювання тіл в інфрачервоному діапазоні довжин хвиль обумовлене температурою даного тіла. Тому в радіометрі використовується приймач на основі напівпровідникової термобатарей, який чутливий в широкому спектральному діапазоні. Оптичний потік випромінювання попадає на чорнену поверхню приймальної площадки та нагріває її. Термобатарея фіксує нагрів та видає фотосигнал у вигляді електричної напруги, пропорційної оптичному потоку. Необхідний спектральний діапазон чутливості радіометра формується інтерференційним фільтром з пропусканням в області 4–5 мкм. Для збільшення чутливості приладу та зменшення впливу випромінювання навколишніх предметів, що досягається за рахунок звуження кута поля зору, перед фотоприймачем встановлено лінзу виготовлену з фтористого кальцію (CaF<sub>2</sub>).

Оскільки в радіометрі в якості фотоприймача використовується тепловий фотоприймач, то при вимірюваннях потік випромінювання визначається різницею температур джерела випромінювання та середовища, в якому перебуває приймач. Це обумовлює жорсткі вимоги щодо підтримування постійної температури

приміщення та радіометричної головки на протязі часу проведення вимірювань.

Структурна схема радіометра приведена на рис. 1.

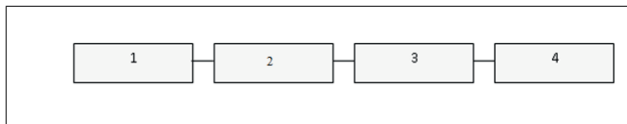


Рис. 1. Структурна схема радіометра ІЧ діапазону:  
1 – головка радіометрична (РГ); 2 – передпідсилювач (ПП); 3 – аналого-цифровий перетворювач (АЦП); 4 – рідкокристалічний індикатор (РКІ)

Світловий потік від джерела випромінювання падає на фоточутливий елемент радіометричної головки (1), генерує фотосигнал, який підсилюється ПП(2). АЦП (3) перетворює напругу в цифровий код, який виводиться на індикатор (4). За допомогою перемикача піддіапазонів вимірювання встановлюється необхідний діапазон чутливості радіометра 0–2 або 0–20 Вт/м.

Радіометр складається з електронного блоку та радіометричної головки.

Для зручності на задній панелі електронного блоку радіометра розміщені вимикач живлення СЕТЬ, запобіжник 0.25 А, шнур для під'єднання радіометра до мережі 220 В, клема заземлення, роз'єм для під'єднання радіометричної головки ИЗМ.ГОЛОВКА та роз'єм аналогового виходу після передпідсилювача Выход для підключення зовнішнього цифрового вольтметра, або іншого пристрою при відносних вимірюваннях розміщені, а на передній панелі радіометра - тільки цифрове табло, перемикач піддіапазонів вимірювання ДИАПАЗОН і ручка установки нуля УСТ 0.

### 5. Методики проведення атестації радіометра

#### 5. 1. Методика вимірювання спектральної характеристики

Часто буває вигідно використовувати вікно прозорості атмосфери 3–5 мкм для виявлення сильно нагрітих об'єктів, які випромінюють в цьому діапазоні. Наприклад, у випадку випромінювання смуги вуглекислого газу, що є залишком практично всіх продуктів згорання. Спектральні характеристики полум'я в атмосфері приведено на рис. 2, а, б [8].

Один із шляхів покращення порогових властивостей оптико-електронних систем – це обмеження спектрального діапазону чутливості фотоприймача, виділивши робочу його частину.

Оскільки в радіометрі використовується приймач на основі напівпровідникової термобатарей, який чутливий в широкому спектральному діапазоні, то робочий спектральний діапазон чутливості радіометра (в даній розробці) формується спектральною характеристикою коефіцієнта пропускання світлофільтра, який вимірювався на установці для вимірювання спектральних характеристик, структурна схема якої наведена на рис. 3.

Зауважимо, що приймач на основі напівпровідникової батареї потребує акуратного поводження з ним і під час проведення вимірювань та експлуатації необхідно було дотримуватися певних правил. А

саме, оберегти радіометричну головку від ударів; установлювати її в місцях захищених від потоків повітря, протягів та випромінювання теплових джерел (радіаторів опалення, нагрівних елементів, ламп розжарювання і т. п.). Для того щоб уникнути порушення теплового режиму роботи радіометра під час проведення вимірювань не торкатися радіометричної головки. Оператор під час проведення вимірювань повинен знаходитися поза межами поля зору РГ. При переустановці РГ та налагоджуванні вимірювань потрібно працювати в подвійних бавовняних рукавичках. Щоб уникнути механічного пошкодження та забруднення вхідного вікна радіометричної головки (лінзи) головка в неробочому стані повинна бути закрита кришкою.

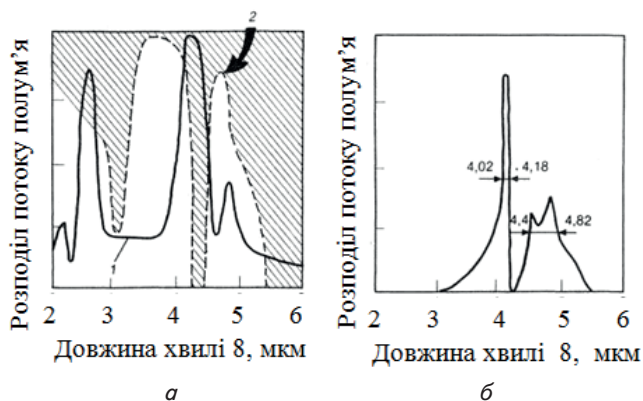


Рис. 2. Спостереження факелу полум'я в атмосфері (а) та його спектр, який «спостерігається» крізь атмосферу (б).

Крива 1 (а) – спектр випромінювання полум'я (СО<sub>2</sub> + тверді частинки при високій температурі); крива 2 – поглинання в смузі СО<sub>2</sub> при низькій температурі

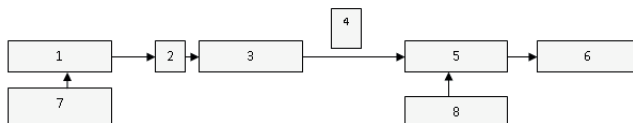


Рис. 3. Структурна схема установки для вимірювання спектральних характеристик світлофільтрів та фотоприймачів: 1 – джерело випромінювання (глобар); 2 – модулятор; 3 – спектральний комплекс КСВУ-6; 4 – досліджувані світлофільтр; 5 – оптико-акустичний приймач ОАП-5; 6 – селективний підсилювач У2-8; 7 – блок живлення глобара (Б5-21); 8 – блоки живлення ОАП-5 (Б5-44 – 3 шт.)

Відомо, що коефіцієнт пропускання світлофільтра визначається як відношення потоку випромінювання що пройшов фільтр до потоку, який на нього падає, або за співвідношенням фотосигналів на виході фотоприймача, які виникли при дії цих потоків. Тому вимірювання спектральної характеристики коефіцієнта пропускання світлофільтра проводилися наступним чином.

Після підготовки устаткування до роботи, що входить до складу установки та виходу джерела випромінювання (глобара) на робочий режим, проведено вимірювання фотосигналів  $U_{\lambda k}$  в спектральному діапазоні від 2500 нм до 6500 нм.

Установивши перед приймачем 5 досліджуваний фільтр, проведено, не змінюючи чутливості підсилювача У2-8, вимірювання фотосигналів  $U_{\lambda\phi}$  в цьому ж спектральному діапазоні – в діапазоні від 2500 нм до 6500 нм.

Спектральна характеристика коефіцієнта пропускання світлофільтра ( $J_\lambda$ ) визначалася за формулою:

$$\tau_\lambda = \frac{U_{\lambda\phi}}{U_{\lambda\kappa}} \tag{1}$$

За даними вимірювань  $J_\lambda$  були визначені довжини хвиль  $\lambda_{0.5}^{\cdot}$  і  $\lambda_{0.5}^{\cdot\cdot}$ , на яких коефіцієнти пропускання світлофільтра  $\tau_{\lambda 0.5}(\tau_{\lambda 0.5}^{\cdot}) = 0.5 \cdot \tau_{\lambda \max}$  та які визначають якість спектральної характеристики радіометричної головки.

Результати вимірювань спектральної характеристики коефіцієнта пропускання світлофільтра приведено на рис. 4

Результати вимірювань основних параметрів світлофільтра приведено в табл. 1

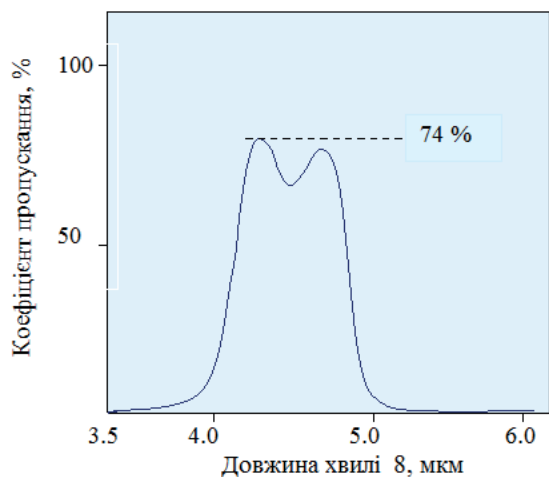


Рис. 4. Спектральна характеристика коефіцієнта пропускання світлофільтра

Таблиця 1

Результати вимірювань основних параметрів світлофільтра

Параметр	Номінальне значення	Допустиме відхилення	Фактичне значення
$\tau_{\max}$ , %	не менше 50.0	–	74.0
$\lambda_{0.5}^{\cdot}$ , мкм	4.0	$\pm 0.3$	4.03
$\lambda_{0.5}^{\cdot\cdot}$ , мкм	5.0	$\pm 0.3$	4.76
$\Delta \lambda_{0.5}$ , мкм	1.0	$\pm 0.3$	0.73
Нерівномірність вершини спектральної характеристики, %	не більше 15.0	–	10.0

Аналогічно було проведено вимірювання спектральної характеристики коефіцієнта пропускання вхідного вікна радіометричної головки, яке виготовлено із фтористого кальцію.

Результати вимірювань спектральної характеристики коефіцієнта пропускання вхідного вікна радіометричної головки приведено на рис. 5.

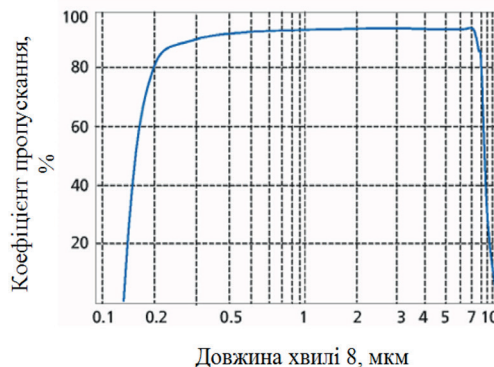


Рис. 5. Спектральна характеристика коефіцієнта пропускання вхідного

Спектральна чутливість термобатарейного фотоприймача в першому наближенні є неселективною характеристикою, тим більше вона є неселективною у вузькому спектральному діапазоні (4–5 мкм). Таким чином, спектральна характеристика чутливості радіометричної головки, з врахуванням спектральних характеристик пропускання вхідного вікна та світлофільтра, має такий самий вигляд, як і фільтр.

### 5. 2. Методики визначення основної відносної похибки

Визначення меж допустимої основної відносної похибки вимірювань ( $\delta_E$ ).

Для визначення основної відносної похибки вимірювання енергетичної освітленості ( $\delta_E$ ) необхідно визначити похибку юстування радіометра ( $\delta_{\text{ю}}$ ), нелінійність енергетичної характеристики чутливості ( $\delta_s$ ) і короткочасну нестабільність чутливості ( $\delta_t$ ).

Визначення похибки юстування радіометра ( $\delta_{\text{ю}}$ ) проводилося на установці, яка збиралася на базі фотометричної лави ФСМ-4У. Структурну схему установки приведено на рис. 6.

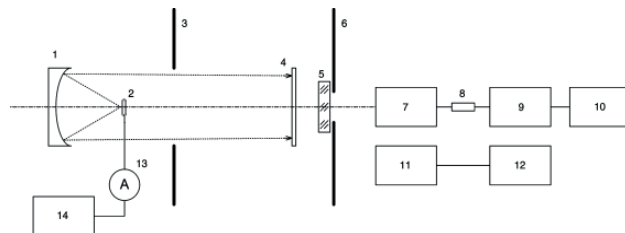


Рис. 6. Структурна схема установки для вимірювання основних параметрів ІЧ радіометра: 1 – сферичне дзеркало; 2 – джерело ІЧ випромінювання; 3, 6 – екрани з комплексу ФСМ-4У; 4 – непрозорий теплоізолюючий екран; 5 – інтерференційний фільтр; 7 – еталонний фотоприймач ПП-2; 8 – резистор  $R=1 \text{ МОМ} \pm 0.1 \%$ ; 9 – прицезійний перетворювач струм-напруга ППТН-02; 10 – вольтметр універсальний В7-28; 11 – РГ вимірюваного радіометра; 12 – блок електронний вимірюваного радіометра; 13 – амперметр М2015; 14 – блок живлення СНП-40

До вищезазначених вимог щодо правил під час проведення вимірювань, для забезпечення калібрування ІЧ радіометра з малими похибками необхідно щоб еталонний фотоприймач (ФП) був атестований по чут-

ливості до енергетичної освітленості з похибкою, яка не перевищувала  $\pm 3\%$ ; оснащення для кріплення еталонного фотоприймача та радіометричної головки приладу забезпечувало установку вхідного вікна вимірюваної РГ в площині калібрування енергетичної освітленості; сферичне дзеркало з зовнішнім алюмінієвим покриттям мало світловий діаметр 100–110 мм та фокусну відстань 150–200 мм, а тіло джерела ІЧ випромінювання мало вигляд плоскої спіралі розмірами  $12 \times 12$  мм та виготовлене з ніхромової дротини  $\varnothing = (0.7-0.8)$  мм виток до витка таким чином, щоб в напрямку випромінювання тіло розжарювання мало вигляд суцільного випромінюючого елемента. Форма та розміри джерела ІЧ випромінювання зображено на рис. 7.

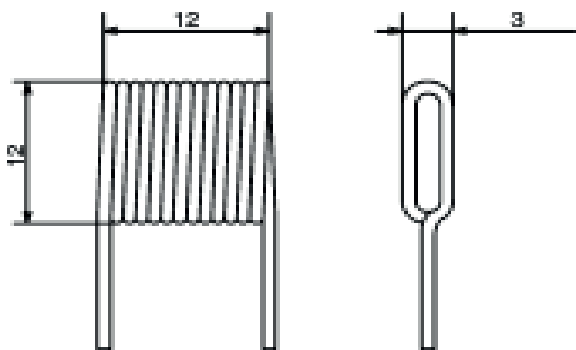


Рис. 7. Форма джерела ІЧ випромінювання

Для забезпечення достатнього рівня потоку випромінювання струм споживання джерелом інфрачервоного випромінювання установлювався в межах 11–12 А, фактичне значення якого контролювалося амперметром М2015 та підтримувалося на протязі вимірювань з точністю  $\pm 0.05$  А.

Не менш важливим елементом установки є інтерференційний фільтр, за допомогою якого виділявся вузький спектральний діапазон ніж спектральна характеристика радіометричної головки, тобто, створювалося монохроматичне випромінювання в діапазоні чутливості радіометра. Для цього використовувався інтерференційний фільтр з максимальним пропусканням на довжині хвилі  $\lambda_{\max} = 4.2$  мкм та півшириною  $\Delta\lambda_{0.5} = 0.2$  мкм;

Після підготовки джерела оптичного випромінювання до роботи, установки робочого струму та прогрівання його на протязі 15 хв., джерело випромінювання переміщувалося вздовж оптичної вісі відносно дзеркала до положення, при якому було створено квазіпаралельний пучок променів. Переміщуючи систему сферичне дзеркало 1 та джерело ІЧ випромінювання 2 відносно екранів 3 і 6, добивалися рівномірності світлового поля в площині розміщення фоточутливого елемента еталонного ФП. Паралель-

ність променів та рівномірність світлового поля установлювалися візуально.

Після налагоджування оптичної частини освітлювача нерівномірність енергетичної освітленості в площині кріплення еталонного ФП (РГ досліджуваного радіометра) не перевищувала  $\pm 10\%$  в світловому діаметрі  $\varnothing_{\text{св}} = 25$  мм.

Перед тим як використати еталонний ФП було проведено відбір кращого з семи порожнинних фотоприймачів типу ПП-1 та ПП-2. Критерієм переваги була висока чутливість та найменше її відхилення від середнього значення результатів вимірювання енергетичної освітленості.

Паспортні дані порожнинних фотоприймачів та результати вимірювань приведені в табл. 2, 3

Проаналізувавши результати досліджень, приведених в табл. 3, в якості еталонного ФП вибрано приймач ПП-2 № 44, який має високу чутливість ( $S_k = 41.09$  мкВ/Вт) та найменше відхилення отриманого значення освітленості від середнього ( $\ast = +0.5\%$ ).

Еталонний ФП установлювався на відстані 1.5 м від дзеркала (1). Переміщуючи ФП відносно напрямку випромінювання, було встановлено його фоточутливий елемент на оптичній вісі джерела випромінювання. В цьому положенні було зафіксовано еталонний ФП та проведено наступні вимірювання.

Для зменшення похибки вимірювань чутливість перетворювача ППТН-02 вибиралася такою, при якій фотосигнал мав не менше трьох значущих цифр на цифровому табло вольтметра В7-28. Ця умова виконувалася при встановленні перемикача піддіапазонів вимірювання на діапазон чутливості радіометра 0–2 Вт/м<sup>2</sup>.

Таблиця 2

Паспортні дані основних параметрів порожнинних фотоприймачів

Тип приймача	Заводський номер	Рік випуску	Дата атестації	Чутливість $S_k$ , $\frac{\text{мкВ}}{\text{Вт} \cdot \text{м}^2}$	Положення діафрагми, мм	Температурна залежність чутливості
ПП-1М	01	–	19.11.03	13.2	8.0	$S_t = S_k(1 - 0.003(t - 21))$
ПП-1	7	1988	30.11.07	5.93	19±1	$S_t = S_k(1 - 0.4(T - 293)10^{-2})$
	28	1985	30.11.07	4.60		
	67	1984	30.11.07	6.38		
ПП-2	24	1986	10.86	42.2	18±1	$S_t = S_k(1 - 1.1(T - 293)10^{-2})$
	35	1987	30.11.07	39.9		
	44	1987	30.11.07	40.6		

Після установки фільтра 5 перекривався потік випромінювання непрозорим теплоізолюючим екраном 4 і витримувався еталонний ФП в затемненому стані не менше 10 хв. За допомогою ручки ППТН-02 УСТ 0 установлювали нуль з точністю до  $\pm 1$  одиниці молодшого розряду. Якщо із-за впливу фонових засвіток навколишнього середовища не вдавалося установити нуль, фіксувалися покази В7-28  $U_m$ .

На вхід еталонного ФП подавався потік випромінювання та, після встановлення показів вольтметра,

проводилися вимірювання величини загального сигналу  $U_{зар1}$ .

Енергетична освітленість ( $E_{e1}$ ) визначалася за формулою

$$E_{e1} = \frac{U_{зар1} - U_T}{S_V}, \tag{2}$$

де  $E_{e1}$  – енергетична освітленість, Вт/м<sup>2</sup>;  $U_{зар1}$  та  $U_T$  – відповідно загальний та темновий сигнали з еталонного ФП, В;  $S_V$  – чутливість еталонного ФП з врахуванням температури навколишнього середовища під час вимірювань,  $\frac{В \cdot м^2}{Вт}$ .

Із-за нерівномірності вершини спектральної характеристики чутливості (рис. 4) енергетична освітленість, яку має показувати радіометр при калібруванні з врахуванням спектральної чутливості на довжині хвилі калібрування,  $E_{ек}$  визначалася за формулою

$$E_{ек} = E_{еср} \times \frac{K_{\lambda}}{K_{ср}}, \tag{4}$$

де  $K_{\lambda}$  – значення спектральної чутливості на довжині хвилі калібрування, відн. од.;  $K_{ср}$  – середнє значення спектральної чутливості, відн. од.

Значення  $K_{ср}$  визначалася по спектральній характеристиці.

Результати вимірювань параметрів порожнинних фотоприймачів

Тип приймача	Заводський номер	Фотосигнал, $U_c$ , мкВ		Чутливість $S_k$ , мкВ/Вт – з врахуванням температури (17 °С)	Енергетична освітленість, визначена по В7-28, Вт/м <sup>2</sup>	$\Delta E = E - E_{ср}$	$\delta = \frac{\Delta E}{E_{ср}} \cdot 100 \%$
		В7-28	ППТ-Н2+В7-28				
ПП-1М	01	3075	3035	13.36	229.2	+4.9	+2.2
ПП-1	7	1350	1355	6.125	220.4	-3.9	-1.74
	28	1075	1068	4.75	226.3	+2.0	+0.89
	67	1448	1453	6.59	219.7	-4.6	-2.05
ПП-2	24	9755	9675	42.7	228.45	+4.15	+1.85
	35	8905	8800	40.4	220.4	-3.9	-1.74
	44	9265	9230	41.09	225.5	+1.2	+0.5
Середнє значення енергетичної освітленості $E_{ср}$ , Вт/м <sup>2</sup>					224.3		±2 %

Оскільки розміри еталонного ФП в чотири рази менші за розміри вхідного вікна радіометричної головки, то для визначення середнього значення енергетичної освітленості в площині калібрування еталонний ФП переміщувався відносно попереднього положення *вліво-вправо* та *вниз-вверх* на 6–7 мм, проводилися ще чотири вимірювання енергетичної освітленості та визначалася за формулою 3 величина освітленості ( $E_{еср}$ ), яку створює джерело випромінювання, як середньоарифметичне значення п'яти вимірювань

$$E_{еср} = \frac{E_{e1} + E_{e2} + \dots + E_{e5}}{5}. \tag{3}$$

Результати вимірювань енергетичної освітленості приведені в табл. 4.

Таблиця 4

Результати вимірювань енергетичної освітленості

Енергетична освітленість, Вт/м <sup>2</sup>						$\Delta E = E_{еср} - E_{емакс}$ , Вт/м <sup>2</sup>	$\delta_e = \frac{\Delta E}{E_{еср}} \cdot 100, \%$
$E_{e1}$	$E_{e2}$	$E_{e3}$	$E_{e4}$	$E_{e5}$	$E_{еср}$		
2.23	2.24	2.20	2.23	2.21	2.22	0.02	~ 1

Нерівномірність освітленості  $\delta_e$  не перевищує 1 %, що є досить непоганою умовою для подальших вимірювань.

Таблиця 3

Замість еталонного ФП установлювалася радіометрична головка вимірюваного радіометра та, не змінюючи режиму роботи джерела випромінювання, проводилися вимірювання енергетичної освітленості  $E_e$  та визначалася за формулою 5 величина відхилення ( $\delta_{ю}$ ) вимірної енергетичної освітленості за допомогою радіометра ( $E_e$ ) від освітленості вимірної за допомогою еталонного ФП ( $E_{еср}$ )

$$\delta_{ю} = \frac{E_{еср} - E_e}{E_{еср}} \cdot 100 \%. \tag{5}$$

Результати вимірювань приведені в табл. 5

Таблиця 5

Результати калібрування ІЧ радіометра

№ п/п	$U_{еталон}$ , мкВ	$E_{еср} = \frac{U_{еталон}^{ср}}{S_k}$	Покази радіометра, $E_e$ , Вт/м <sup>2</sup>	$\Delta E = E_e - E_{еср}$	$\delta_{ю} = \frac{\Delta E}{E_{еср}} \cdot 100 \%$
1	5733	2.326 Вт/м <sup>2</sup>	2.36	+0.03	±1.8
2	5726		2.33	-0	
3	5722		2.35	+0.02	
4	5724		2.32	-0.01	
5	5720		2.33	-0	
6	5722		2.31	-0.02	
7	5724		2.35	+0.02	
8	5722		2.37	+0.04	
9	5724		2.34	+0.01	
10	5730		2.30	-0.03	

Величина  $\delta_{ю}$  є похибкою юстування і, за умовою технічного завдання, не повинна перевищувати ±2 %.

Зазначимо, що на результат вимірювання енергетичної освітленості впливає пропускання атмосфери, спектральна характеристика коефіцієнта пропускання якої приведено на рис. 8 [5].

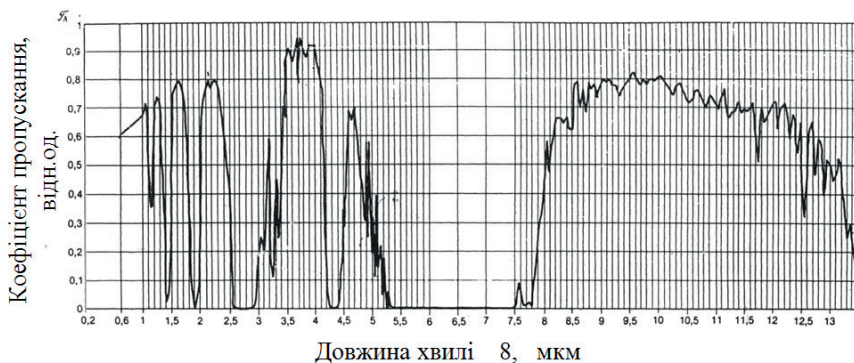


Рис. 8. Спектральна характеристика пропускання атмосфери при довжині траси  $D=1.852$  км

Як бачимо, у вибраному спектральному діапазоні 4,5 мкм є сильно-поглинаюча смуга з максимумом на довжині хвилі 4,3 мкм. Хоча відстань між джерелом випромінювання та радіометричною головкою під час проведення калібрування радіометра не перевищувала 2 м, проте, в меншій мірі ніж це показано на рис. 8, вплив смуги поглинання все ж таки є. Щоб цей вплив менше позначався на результатах вимірювань, користувачу необхідно буде зберігати геометрію між радіометричною головкою та джерелом випромінювання.

Вимірювання нелінійності енергетичної характеристики чутливості ( $\delta_s$ ) і визначення діапазону вимірювань енергетичної освітленості проводилися на установці, структурна схема якої приведена на рис. 9.

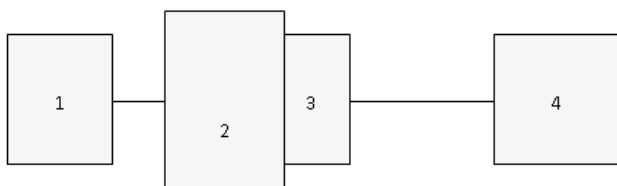


Рис. 9. Структурна сема установки для вимірювання нелінійності енергетичної характеристики чутливості: 1 – блок живлення Б5-21; 2 – освітлювач ІДНМ4.004.00.00; 3 – головка радіометрична (РГ); 4 – електронний блок радіометра

В даній методиці використовується метод додаткового світла, який забезпечує високу якість та малу похибку вимірювань нелінійності енергетичної характеристики чутливості [9, 10].

В освітлювачі 2 в якості джерел випромінювання використовуються лампи розжарювання типу КГМ24-150 з температурою тіла розжарювання  $T=2856$  К. Це, так звані, джерела типу А, спектральний розподіл випромінювання яких визначається законом Планка. Проте, складовою конструкції ламп є скляна колба, спектральна характеристика пропускання якої змінює розподіл випромінювання АЧТ.

На рис. 10 приведено спектральну характеристику пропускання колби лампи розжарювання (1) і спектральні розподіли випромінювання АЧТ (2) та лампи розжарювання (3) при температурі 2856 К.

Як бачимо, випромінювання такого освітлювача лежить поза межами чутливості радіометричної головки. Тому при вимірюваннях фільтр з радіометричної головки було знято.

Після підготовки устаткування до роботи установлювалася головка радіометрична в посадочне місце стенду, а перемикач діапазонів чутливості радіометра – в положення 0–2.

При відкритому одного з каналів випромінювання встановлювався потік, при якому покази радіометра становили 30–40 % від величини верхньої межі діапазону чутливості і проводилися вимірювання енергетичної освітленості  $E_1$ .

Аналогічно вимірювався сигнал  $E_2$ , перекривши випромінювання

даного каналу і відкривши другий канал випромінювання.

Відкривалися обидва канали випромінювання і вимірювався сигнал  $E_3$ .

Нелінійність чутливості ( $\delta_s$ ) визначалася за формулою:

$$\delta_s = \frac{E_1 + E_2 - E_3}{E_1 + E_2} \times 100 \% \quad (6)$$

Подальші вимірювання проводилися наступним чином. Встановлювався в кожному каналі потік, при якому покази радіометра були рівні  $E_3 \pm 10\%$  і по черзі вимірювалися ці сигнали.

Результати вимірювань нелінійності енергетичної характеристики чутливості приведено в табл. 6.

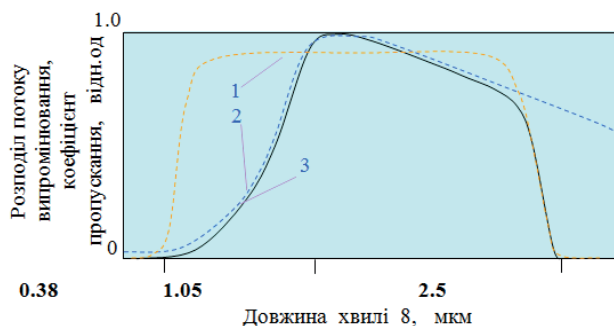


Рис. 10. Спектральна характеристика пропускання скла колби лампи (1) та спектральні характеристики випромінювання АЧТ (2) та лампи розжарювання (3) з температурою 2856 К

Таблиця 6

Результати вимірювань нелінійності енергетичної характеристики чутливості

	Покази ІЧ радіометра				
	0–2 Вт/м <sup>2</sup>		0–20 Вт/м <sup>2</sup>		
$E_{c1}$ Вт/м <sup>2</sup>	0.100	0.410	1.17	3.83	5.10
$E_{c2}$ Вт/м <sup>2</sup>	0.342	1.037	3.23	11.57	14.83
$E_{c1} + E_{c2}$	0.442	1.447	4.40	15.40	19.93
$E_{c3}$	0.444	1.451	4.42	15.52	19.82
$(E_{c1} + E_{c2}) - E_{c3}$	0.002	0.004	0.02	0.12	0.11
$\delta_s, \%$	0.5	0.4	0.5	0.8	0.6

При нелінійності енергетичної характеристики чутливості, що не перевищує 0.8 % (при вимозі  $\delta_s \leq 1.0$  %) діапазон вимірювання енергетичної освітленості знаходиться в межах від 0 до 20 Вт/м<sup>2</sup>.

Вимірювання нестабільності чутливості ( $\delta_t$ ) проводилися на установці, структурна схема якої наведена на рис. 9.

Нестабільність чутливості визначалася за п'ятьма вимірюваннями, ресструючи покази радіометра через інтервали часу (1–1,5 хв.).

Нестабільність чутливості ( $\delta_t$ ) у відсотках визначається за формулою:

$$\delta_t = \frac{E_{\max} - E_{\text{cp}}}{E_{\text{cp}}} \times 100 \%, \tag{7}$$

де  $E_{\text{cp}}$  – середнє арифметичне значення п'яти вимірювань радіометра;  $E_{\max}$  – покази радіометра, максимально відмінні від  $E_{\text{cp}}$ .

Результати вимірювань нестабільності чутливості ( $\delta_t$ ) приведено в табл. 7.

Таблиця 7

Результати вимірювань нестабільності чутливості

$E_{\text{э}}, \text{ мВт/м}^2$						$E_{\text{cp}}, \text{ мВт/м}^2$	$\Delta E_{\text{э}}$	$\delta_t, \%$
0	1 хв.	2 хв.	3 хв.	4 хв.	5 хв.			
2.33	2.35	2.33	2.30	2.36	2.36	2.34	0.04	1.7

З врахуванням складових похибок основна відносна похибка вимірювань енергетичної освітленості  $\delta_E$  (у відсотках) визначалася за формулою

$$\delta_E = \pm 1.1 \times \sqrt{\delta_s^2 + \delta_t^2 + \delta^2 + \delta^2}, \tag{8}$$

де  $\delta_s$  – нелінійність енергетичної характеристики, %;  $\delta_t$  – нестабільність чутливості, %;  $\delta_{\text{ю}}$  – похибка юстування, %;  $\delta_{\text{yc}}$  – похибка еталонного ФП (згідно з його паспортом), %.

І не виходить за межі  $\pm 5.1$  % при вимозі 6.0 %.

## 6. Висновки

1. В результаті розробки ІЧ радіометра створено вимірювальну установку, до складу якої входить високостабільне джерело ІЧ випромінювання, – нестабільність не перевищує  $\pm 0.5$  %, яке забезпечує достатні рівні енергетичної освітленості для проведення вимірювань параметрів ІЧ радіометрів.

2. В якості контрольних фотоприймачів досліджено декілька типів порожнинних приймачів типу ПП-1, -2 та відібрано один із них (ПП-2) для подальшого використання при вимірюваннях.

3. Для ІЧ радіометра підібрано фільтр з робочим спектральним діапазоном від 4 до 5 мкм – діапазоном, в якому випромінює полум'я продуктів згорання. Проведено дослідження форми спектральної характеристики та приведено формулу, за якою враховується форма спектральної характеристики чутливості.

4. Дослідження технічних параметрів та метрологічних характеристик ІЧ радіометра підтвердили придатність ІЧ радіометра для використання його в якості робочого еталонного засобу вимірювань при випробуваннях сповіщувачів полум'я, що покращить якість і надійність сповіщувачів.

5. В результаті досліджень визначено основну відносну похибку виконання вимірювань, яка не виходить за межі вимог – похибка менша  $\pm 6$  %.

## Література

1. Официальный сайт ОАО "ТЕНЗОР" [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.tenzor.net/>
2. Измеритель средней мощности и энергии лазерного излучения ИМО-2Н [Текст] / Паспорт, Волгоград, 1986.
3. ОАО Научно-производственное предприятие «Эталон» [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www.omsketalon.ru/](http://www.omsketalon.ru/)
4. ТОО «Фирма Геосистема» [Электронный ресурс] / Режим доступа: [www.geosystem.kz](http://www.geosystem.kz)
5. Криксунов, Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники [Текст] / Л. З. Криксунов. – М.: Сов. радио, 1978. – 400 с.
6. Васильченко, Н. В. Измерение параметров приемников оптического излучения [Текст] / Н. В. Васильченко, В. А. Борисов и др. – М.: Радио и связь, 1983. – 88 с.
7. Гуревич, М. М. Фотометрия. Теория, методы и приборы [Текст] / М. М. Гуревич. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.
8. Госсорг, Ж. Инфракрасная термография, Основы, техника, применение [Текст] / Ж. Госсорг. – М.: «Мир», 1988. – 64 с.
9. Бутенко, В. К. Установка для вимірювання динамічного діапазону фотоприймачів [Текст] / В. К. Бутенко, В. М. Годованюк, І. В. Докторович, В. Г. Юр'єв // Науковий вісник Чернівецького університету. – 2001. – Вип. 112. – С. 67–70.
10. Докторович, І. В. Методика определения динамического диапазона полупроводниковых фотоприёмников [Текст] / І. В. Докторович, В. К. Бутенко, В. Н. Годованюк, В. Г. Юрьев // ТКЭА. – 2002. – № 6. – С. 14–15.