
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 536.521.2

В. М. ТЫМКУЛ, Д. С. ШЕЛКОВОЙ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ТРЕХСПЕКТРАЛЬНОГО ПИРОМЕТРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ФОНА

Предлагается методика измерения температуры поверхности объектов оптическим трехспектральным пирометром при воздействии теплового излучения фона. Приведены конструкция макета пирометра и результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: бесконтактные методы измерения температуры, пирометр, коэффициент излучения, инфракрасное излучение.

Введение. Постановка задачи. В классической оптической пирометрии широко известны методы измерения радиационной (энергетической) T_{Σ} , яркостной $T_{я}$ и цветовой $T_{ц}$ температуры при дистанционном измерении термодинамической (истинной) температуры T излучающих поверхностей объектов [1—3]. При этом, как указывается в работах [4, 5], необходимо учитывать процесс отражения сторонних источников излучения поверхностью объектов при измерении температуры оптическими пирометрами. В этих же работах рассматривается методика оценивания влияния теплового излучения фона на результат измерения температуры тел, находящихся в нагревательной печи, классическими радиационным, яркостным и цветовым пирометрами. В работе [6], в частности, отмечается, что влияние сторонних источников излучения на результаты измерения температуры поверхности объекта может быть учтено путем введения эквивалентного коэффициента излучения. Тем не менее, по мнению авторов, необходимы дальнейшие исследования по изучению влияния как температуры фонового излучения, так и коэффициента излучения фона на результат измерения температуры объектов не только классическими, но и современными устройствами оптической пирометрии, в том числе оптическим трехспектральным пирометром [7, 8].

В этой связи в настоящей статье предлагается методика измерения температуры поверхности объектов оптическим трехспектральным пирометром при воздействии теплового излучения фона в отсутствие достоверной информации о коэффициенте излучения объекта.

Рассмотрим соотношения, функционально связывающие измеряемые классическими пирометрами температуры с термодинамической температурой поверхности объекта T и температурой фона $T_{фон}$ [4, 5]:

$$T_{\Sigma} = T \sqrt[4]{\varepsilon + (1 - \varepsilon) T_{фон}^4 / T^4} ;$$
$$T_{я}^{-1} = T^{-1} - \frac{\lambda}{c_2} \ln \left\{ \varepsilon(\lambda) + [1 - \varepsilon(\lambda)] \exp \left[-\frac{c_2}{\lambda} (T_{фон}^{-1} - T^{-1}) \right] \right\} ;$$

$$T_{\text{ц}}^{-1} = T^{-1} + \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1) c_2} \ln \left\{ \frac{\varepsilon(\lambda_{\text{эф1}}) + [1 - \varepsilon(\lambda_{\text{эф1}})] \exp \left[-\frac{c_2}{\lambda_1} (T_{\text{фон}}^{-1} - T^{-1}) \right]}{\varepsilon(\lambda_{\text{эф2}}) + [1 - \varepsilon(\lambda_{\text{эф2}})] \exp \left[-\frac{c_2}{\lambda_2} (T_{\text{фон}}^{-1} - T^{-1}) \right]} \right\},$$

где ε — интегральный коэффициент излучения поверхности объекта; $\varepsilon(\lambda_{\text{эф1}})$ и $\varepsilon(\lambda_{\text{эф2}})$ — спектральный коэффициент излучения поверхности объекта на эффективных длинах волн λ_1 и λ_2 цветового (двухцветного) пирометра; $\varepsilon(\lambda)$ — спектральный коэффициент излучения поверхности объекта на рабочей длине волны яркостного пирометра; c_2 — постоянная в формуле Планка.

Излучение фона рассматривалось как излучение черного тела.

Методика измерения термодинамической температуры объектов. Предлагаемая методика разработана для пирометра, описанного в работах [7, 8]. При наличии фонового и внутреннего излучения оптических элементов работу пирометра можно описать следующей системой уравнений [9]:

$$\left. \begin{aligned} U_{\Sigma}(\lambda_{\text{эф1}}, T) &= \frac{K_1 \varepsilon(\lambda_{\text{эф1}}) (c_1 / \lambda_{\text{эф1}}^5)}{\exp(c_2 / \lambda_{\text{эф1}} T) - 1} + \eta [1 - \varepsilon(\lambda_{\text{эф1}})] U_{\text{фон}}(\lambda_{\text{эф1}}) + U_o(\lambda_{\text{эф1}}); \\ U_{\Sigma}(\lambda_{\text{эф2}}, T) &= \frac{K_2 \varepsilon(\lambda_{\text{эф2}}) (c_1 / \lambda_{\text{эф2}}^5)}{\exp(c_2 / \lambda_{\text{эф2}} T) - 1} + \eta [1 - \varepsilon(\lambda_{\text{эф2}})] U_{\text{фон}}(\lambda_{\text{эф2}}) + U_o(\lambda_{\text{эф2}}); \\ U_{\Sigma}(\lambda_{\text{эф3}}, T) &= \frac{K_3 (c_1 / \lambda_{\text{эф3}}^5)}{\exp(c_2 / (\lambda_{\text{эф3}} T)) - 1} \varepsilon(\lambda_{\text{эф3}}) + \eta [1 - \varepsilon(\lambda_{\text{эф3}})] U_{\text{фон}}(\lambda_{\text{эф3}}) + U_o(\lambda_{\text{эф3}}), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $U_{\Sigma}(\lambda_{\text{эф}i}, T)$, $U_{\text{фон}}(\lambda_{\text{эф}i})$ и $U_o(\lambda_{\text{эф}i})$ — сигналы на выходе приемника излучения пирометра на i -й эффективной длине волны $\lambda_{\text{эф}i}$, $i=1, 2, 3$, соответственно при визировании исследуемого объекта, участков фона и при закрытом входном зрачке объектива прибора; η — коэффициент, зависящий от фонового освещения, условий наблюдения поверхности объекта и индикатрисы отражения; c_1 — постоянная в формуле Планка; $\varepsilon(\lambda_{\text{эф}i})$ — коэффициент излучения поверхности объекта на эффективных длинах волн;

$$K_i = A \omega_{\text{зр}} S(\lambda_{\text{эф}i}) \tau_o(\lambda_{\text{эф}i}) \tau_a(\lambda_{\text{эф}i}) \tau_{\text{ф}}(\lambda_{\text{эф}i}), \quad i=1, 2, 3,$$

где A и $\omega_{\text{зр}}$ — площадь входного зрачка и угол поля зрения объектива пирометра; $\tau_o(\lambda_{\text{эф}i})$, $\tau_a(\lambda_{\text{эф}i})$, $\tau_{\text{ф}}(\lambda_{\text{эф}i})$ — коэффициенты пропускания соответственно оптической системы пирометра, слоя атмосферы между объектом и пирометром и спектральных фильтров на эффективной длине волны $\lambda_{\text{эф}i}$; $S(\lambda_{\text{эф}i})$ — спектральная чувствительность приемника излучения на эффективной длине волны $\lambda_{\text{эф}i}$.

Следует отметить, что эффективные длины волн спектральных диапазонов вычисляются по формуле [1]

$$\lambda_{\text{эф}i} = \frac{\int_{(\Delta\lambda_i)} \varepsilon(\lambda, T) L_0(\lambda, T) \tau_{\text{ф}}(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{(\Delta\lambda_i)} \varepsilon(\lambda, T) L_0(\lambda, T) \tau_{\text{ф}}(\lambda) \frac{1}{\lambda} S(\lambda) d\lambda}, \quad i=1, 2, 3,$$

где $L_0(\lambda, T)$ — спектральная яркость абсолютно черного тела при температуре T ; $\Delta\lambda_1$, $\Delta\lambda_2$, $\Delta\lambda_3$ — эффективная полоса пропускания соответственно первого, второго и третьего спектральных фильтров.

Анализ системы уравнений (1) показывает, что, в общем случае, в ней содержится четыре неизвестные величины, а именно: $\varepsilon(\lambda_{эф1})$, $\varepsilon(\lambda_{эф2})$, $\varepsilon(\lambda_{эф3})$ и T . Для решения этой системы воспользуемся соотношением [9, 10]

$$\varepsilon(\lambda_{эф3}) = \alpha_1 \varepsilon(\lambda_{эф1}) + \alpha_2 \varepsilon(\lambda_{эф2}), \quad (2)$$

где

$$\alpha_1 = \frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_3}, \quad \alpha_2 = \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta\lambda_3}.$$

Анализ достоверности соотношения (2) будет рассмотрен далее.

В соответствии с выражением (2) система уравнений (1) становится системой с тремя неизвестными величинами: $\varepsilon(\lambda_{эф1})$, $\varepsilon(\lambda_{эф2})$ и T , решение которой может быть получено в виде трансцендентного уравнения для определения температуры T поверхности объекта:

$$\begin{aligned} & \frac{A}{\exp(-c_2/\lambda_{эф1}T) - \eta\varepsilon_{фон}(\lambda_{эф1})\exp(-c_2/\lambda_{эф1}T_{фон})} + \\ & + \frac{B}{\exp(-c_2/\lambda_{эф2}T) - \eta\varepsilon_{фон}(\lambda_{эф2})\exp(-c_2/\lambda_{эф2}T_{фон})} = \\ & = \frac{C}{\exp(-c_2/\lambda_{эф3}T) - \eta\varepsilon_{фон}(\lambda_{эф3})\exp(-c_2/\lambda_{эф3}T_{фон})}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\varepsilon_{фон}(\lambda_{эфi})$ — коэффициенты излучения фона на эффективных длинах волн, а коэффициенты A , B и C определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} A &= \pi\alpha_1\lambda_{эф1}^{-5} \frac{K_3}{c_1K_1} [U_{\Sigma}(\lambda_{эф1}) - \eta U_{фон}(\lambda_{эф1}) - U_0(\lambda_{эф1})]; \\ B &= \pi\alpha_2\lambda_{эф2}^{-5} \frac{K_3}{c_1K_2} [U_{\Sigma}(\lambda_{эф2}) - \eta U_{фон}(\lambda_{эф2}) - U_0(\lambda_{эф2})]; \\ C &= \frac{\pi\lambda_{эф3}^{-5}}{c_1} [U_{\Sigma}(\lambda_{эф3}) - \eta U_{фон}(\lambda_{эф3}) - U_0(\lambda_{эф3})]. \end{aligned}$$

Анализ работы пирометра. Критерием работы оптического трехспектрального пирометра является достоверность соотношения (2). На основе обработки многочисленных экспериментальных данных для анализа спектральных коэффициентов излучения металлов, сплавов, природных образований и сред была проведена количественная проверка соотношения (2), содержащая следующие действия [9]:

1) на основе анализа спектральных коэффициентов излучения $\varepsilon(\lambda)$ различных материалов в области длин волн от 8 до 14 мкм определялись рассчитываемые (моделируемые) значения коэффициента $\varepsilon_M(\lambda_{эф3})$ с учетом данных о коэффициентах $\varepsilon(\lambda_{эф1})$ и $\varepsilon(\lambda_{эф2})$ и о ширине спектральных интервалов: $\Delta\lambda_1 = 10 - 8 = 2$ мкм, $\Delta\lambda_2 = 14 - 10 = 4$ мкм, $\Delta\lambda_3 = 14 - 8 = 6$ мкм;

2) по графикам коэффициентов $\varepsilon(\lambda)$ для каждого материала выбирались реальные значения коэффициента излучения $\varepsilon_p(\lambda_{эфз})$;

3) в соответствии с пп. 1, 2 осуществлялось построение графиков корреляции моделируемых $\varepsilon_m(\lambda_{эфз})$ и реальных $\varepsilon_p(\lambda_{эфз})$ значений коэффициентов излучения.

Расчет моделируемого коэффициента $\varepsilon_m(\lambda_{эфз})$ производился в среде автоматизации MathCad.

График корреляции коэффициентов $\varepsilon_m(\lambda_{эфз})$ и $\varepsilon_p(\lambda_{эфз})$ для некоторых металлов, сплавов, природных образований и сред представлен на рис. 1.

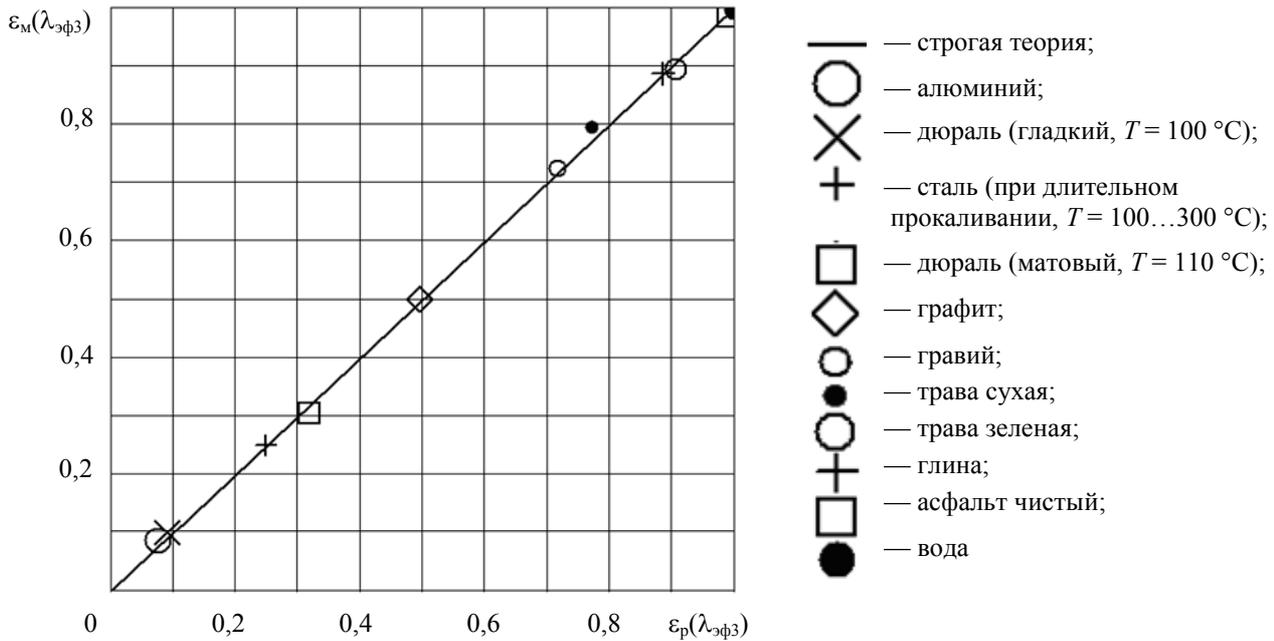


Рис. 1

Анализ соотношения (2) и приведенного графика позволяет отметить следующее:

— наличие корреляции значений моделируемых $\varepsilon_m(\lambda_{эфз})$ и реальных $\varepsilon_p(\lambda_{эфз})$ коэффициентов излучения свидетельствует о достоверности соотношения (2), по крайней мере, для спектральных коэффициентов излучения исследованных материалов и сред;

— математически достоверность соотношения (2) обосновывается выражением

$$\int_{(\Delta\lambda_3)} \varepsilon(\lambda) d\lambda = \int_{(\Delta\lambda_1)} \varepsilon(\lambda) d\lambda + \int_{(\Delta\lambda_2)} \varepsilon(\lambda) d\lambda,$$

где длина волны левой границы интервала $\Delta\lambda_2$ совпадает с длиной волны правой границы интервала $\Delta\lambda_1$, а интервал $\Delta\lambda_3 = \Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2$.

Методика и результаты измерений. Для подтверждения достоверности исследований была разработана и собрана экспериментальная установка (рис. 2) для измерений температуры поверхности объектов с использованием макета оптического трехспектрального пирометра.

В состав установки входят: 1 — тепловой излучатель с блоком управления; 2; 3 — объект; 4 — турель с тремя спектральными фильтрами; 5 — механический модулятор; 6 — пирозлектрический приемник МГ-32 со схемой питания; 7; 8 — цифровой вольтметр В7-27А/1; 9 — осциллограф (следует отметить, что элементы 3—8 составляют макет пирометра). Тепловой излучатель 1 был взят из комплекта градуировочной аппаратуры к отечественному тепловизору „Радуга-ЭВМ“ производства ФГУП „Азовский оптико-механический

завод"; зеркальный объектив 3 входит в комплект тепловизора „Радуга-2“, основные параметры объектива: световой диаметр $d = 40$ мм, заднее фокусное расстояние $f' = 64$ мм.

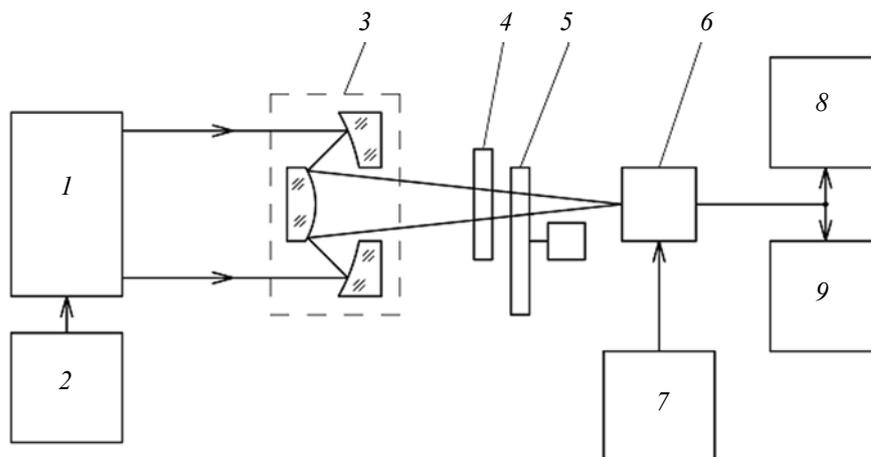


Рис. 2

Методика измерений температуры поверхности объектов заключается в следующем.

1. С помощью блока управления 2 устанавливается начальная температура T_3 поверхности излучателя с известным коэффициентом излучения.

2. Включается двигатель механического модулятора и устанавливается частота модуляции излучения, равная $f_m = 250$ Гц, которая регистрируется осциллографом 9.

3. Поворотом турели 4 со спектральными фильтрами в схему вводятся поочередно 1, 2 и 3-й фильтры.

4. Цифровым вольтметром 8 регистрируются значения выходных сигналов $U_{\Sigma}(\lambda_{эф1})$, $U_{\Sigma}(\lambda_{эф2})$ и $U_{\Sigma}(\lambda_{эф3})$.

5. Измеряются сигналы $U_o(\lambda_{эф1})$, $U_o(\lambda_{эф2})$ и $U_o(\lambda_{эф3})$ при закрытом входном зрачке объектива 3.

6. Измеряются сигналы $U_{фон}(\lambda_{эф1})$, $U_{фон}(\lambda_{эф2})$ и $U_{фон}(\lambda_{эф3})$, эквивалентные тепловому излучению фона.

7. Предварительно в компьютер вводятся значения параметров $\lambda_{эф1}$, $\lambda_{эф2}$, $\lambda_{эф3}$, α_1 , α_2 , K_1 , K_2 , K_3 , η , $T_{фон}$ и $\varepsilon_{фон}$, которые определяются фоновой обстановкой, индикатрисой отражения и свойствами макета пирометра.

8. Полученные в пп. 4—6 значения сигналов подставляются в формулу (3), с использованием которой по разработанному алгоритму определяется температура T поверхности излучателя I .

9. Аналогично с помощью блока управления устанавливаются другие температуры T_3 излучателя, и процедура измерения повторяется согласно пп. 3—8.

Проводились также измерения температуры плоского излучателя, поверхность которого выполнена из дюралюминия, являющегося высокоотражающим материалом. Измерения проводились в лабораторных условиях при температуре фона $T_{фон} = 293$ К; значение интегрального коэффициента излучения покрытия стен было выбрано равным $\varepsilon_{фон} = 0,91$. Результаты экспериментальных исследований, проведенных с помощью различных приборов, представлены в виде графиков корреляции измеренной (T) и устанавливаемой (T_3) температуры поверхности излучателя: см. рис. 3, а, б, где приняты следующие обозначения: — — „идеальный“ пирометр; \circ — макет трехспектрального пирометра; \diamond — радиационный пирометр

ThermoPoint TRT 8 ProPlus (фирмы “FLIR Systems”, США — Швеция); × — термopара ТПХК-(L)-К11.Н.0,5-2000-2 ТУ 4211-011-42187449-2002.

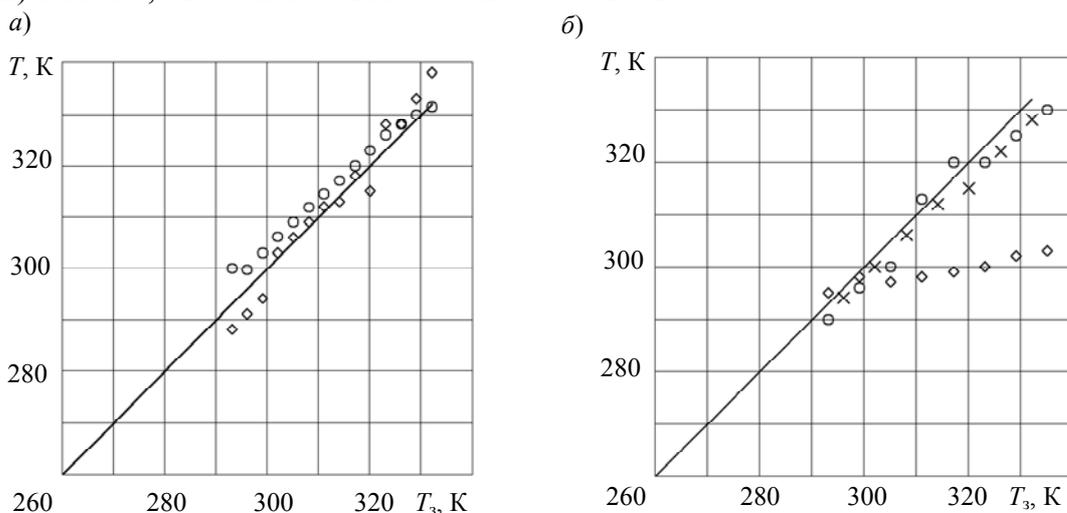


Рис. 3

Анализ результатов измерения температуры поверхности излучателей с использованием лабораторного макета трехспектрального пирометра показал, что в диапазоне температур объекта 293—333 К средняя квадратическая погрешность измерения составляет $\Delta \approx 1,9\%$; ее оценка осуществлялась по статистике Гаусса при числе измерений $N = 30$ для каждого значения устанавливаемой температуры излучателя. При измерении радиационным пирометром температуры поверхности с высоким коэффициентом отражения наблюдается отклонение измеряемой температуры T от действительной: $\Delta T = 33$ К при $T_3 = 333$ К и $T_{\text{фон}} = 293$ К. Такое увеличение погрешности $\Delta T/T_3 \approx 10\%$ при измерениях радиационным пирометром в практике тепловизионных исследований классифицируется как проявление температуры „отражения“.

Заключение. Предложенная методика работы оптического трехспектрального пирометра позволяет дистанционно достаточно точно измерить в условиях воздействия теплового излучения фона термодинамическую температуру объектов как с низким, так и с высоким коэффициентом излучения их поверхностей; при этом абсолютные значения коэффициентов излучения могут быть неизвестными величинами.

Влияние теплового излучения фона на суммарное излучение объекта рассматривалось с учетом формул Кирхгофа и Вина, оценки геометрии „освещение—наблюдение“ и вида индикатрисы отражения поверхности объекта.

Авторы выражают благодарность д-ру техн. наук, проф. И. С. Гибину, д-ру техн. наук, проф. Е. С. Нежевенко и д-ру техн. наук, проф. А. Н. Серьёзову за участие в обсуждении материалов статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982. 296 с.
2. Гордов А. Н. Основы пирометрии. М.: Металлургия, 1971. 445 с.
3. Снопко В. Н. Спектральные методы оптической пирометрии нагретой поверхности. Минск: Наука и техника, 1988. 152 с.
4. Киренков И. И. Метрологические основы оптической пирометрии. М.: Изд-во стандартов, 1976. 140 с.
5. Поскачей А. А., Свенчанский А. Д. Пирометры излучения в установках нагрева. М.: Энергия, 1978. 96 с.

6. *Поскачей А. А., Чубаров Е. П.* Оптико-электронные системы измерения температуры. М.: Энергоатомиздат, 1988. 248 с.
7. *Тымкул В. М., Шелковой Д. С.* Оптический трехспектральный пирометр // Сб. материалов. V Междунар. науч. конгресса „ГЕО — Сибирь — 2009“, 20—24 апр. 2009 г., Новосибирск. Новосибирск: СГГА, 2009. Т. 5, ч. 1. С. 53—57.
8. Пат. 2219504 РФ, МКИ G 01 J 5/00. Пирометр истинной температуры / *В. М. Тымкул, Н. С. Лебедев, Д. С. Шелковой, С. А. Воронин.* // Оpubл. 20.12.2003. Бюл. № 35.
9. *Шелковой Д. С.* Разработка и исследование принципов построения и схемы оптического трехспектрального пирометра. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2010.
10. Пат. 2410654 РФ, МПК G01J 5/52. Способ измерения температуры / *В. М. Тымкул, Л. В. Тымкул, Ю. А. Фесько, Д. С. Шелковой.* // Оpubл. 27.01.2011. Бюл. № 3.

Сведения об авторах

- Василий Михайлович Тымкул** — канд. техн. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра наносистем и оптотехники, Новосибирск;
E-mail: kaf.oep@ssga.ru
- Денис Сергеевич Шелковой** — канд. техн. наук; ПО „Уральский оптико-механический завод“ „Урал-СибНИИОС“, Новосибирск; инженер; E-mail: shelden@ngs.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов СГГА

Поступила в редакцию
13.02.12 г.