

УЧЕТ ИК-ИЗЛУЧЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ИЗМЕРЕНИИ ТЕМПЕРАТУР С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКИХ ПИРОМЕТРОВ

Машков Ю.А.¹, Жукова Л.А.²

¹Машков Юрий Александрович - кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра физики,

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ);

²Жукова Людмила Александровна - преподаватель,
кафедра математики и инженерной графики,
Военная академия связи им. С.М. Буденного,
г. Санкт-Петербург

Аннотация: в статье рассматривается вопрос повышения точности измерения температур оптическими пирометрами в инфракрасной (ИК) области спектра. Получены формулы и рассчитаны поправки к показаниям пирометра с учетом коэффициента излучения измеряемой поверхности и отраженного от нее излучения окружающей среды. Расчеты выполнены для коэффициента излучения исследуемой поверхности 0,95, коэффициента излучения градуировочного устройства 0,987 и спектрального диапазона пирометра 8...12,6 мкм.

Ключевые слова: дистанционные методы измерения температур, оптические пирометры, инфракрасное (ИК-излучение), радиационная температура, коэффициент излучения, формула Планка, энергетическая яркость, излучение фона, абсолютно черное тело (АЧТ).

Дистанционные методы измерения температур поверхностей различных объектов с помощью инфракрасных (ИК) пирометров находят широкое применение в науке и технике.

ИК-излучение, попадающее на объектив оптического пирометра, искажается слоем атмосферы и зависит от температуры объекта исследования, его коэффициента излучения и от величины отраженного поверхностью объекта излучения окружающей среды - фона.

Часто измерения производятся на небольших дистанциях и влиянием слоя атмосферы между объектом исследования и пирометром можно пренебречь. В этом случае, для повышения точности измерений нужно учитывать как коэффициент излучения поверхности, так и отраженное излучение фона. Например, если объект с фактической температурой 40⁰С и коэффициентом излучения 0,8 находится в среде с окружающей температурой 50⁰С, то измерения дадут неправильные показания, 42⁰С, если не учитывать коэффициент излучения и окружающую температуру (фон). Если учитывать только коэффициент излучения, но не окружающую температуру, то индицируемая температура будет равна 45⁰С. И только при учете обеих переменных будет индицироваться истинная температура 40⁰С.

Для учета отраженного излучения нужно с помощью пирометра или термометра измерить температуру окружающих предметов, создающих фон и рассчитать поправку к показаниям пирометра.

Получим формулы для расчета поправок к показаниям пирометра, работающего в спектральном диапазоне 8...12,6 мкм. Для этого запишем уравнение спектральных энергетических яркостей в виде:

$$\varepsilon_{\lambda} L_{\lambda}^0(T_p) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{\lambda}^0(T_{\phi}) = \varepsilon(\lambda) L_{\lambda}^0(T_0) + (1 - \varepsilon(\lambda)) L_{\lambda}^0(T_{\phi}), \quad (1)$$

где ε_{λ} - спектральный коэффициент градуировочного устройства; $\varepsilon(\lambda)$ - спектральный коэффициент излучения измеряемой поверхности; $L_{\lambda}^0(T_i)$ - спектральная энергетическая яркость АЧТ при температурах, равных радиационной температуре поверхности T_p , радиационной температуре фона при градуировке T_{ϕ} , измерении T_{ϕ} и термодинамической температуре поверхности T_0 . Спектральная энергетическая яркость АЧТ определяется из формулы Планка:

$$L_{\lambda}^0(T) = \pi^{-1} c_1 \lambda^{-5} [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]^{-1}, \quad (2)$$

где λ - длина волны излучения, c_1 и c_2 - константы.

Так как реальная поверхность не является идеальным излучателем, проградуированный пирометр имеет ошибку измерения $\Delta T_p = T_0 - T_p$, которой соответствует разность энергетических яркостей АЧТ $\Delta L(\Delta T_p)$ с температурами T_0 и T_p :

$$L_{\lambda}^0(T) = \pi^{-1} c_1 \lambda^{-5} [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]^{-1}, \quad (3)$$

где $\psi(\lambda) = \tau(\lambda)s(\lambda)$ - спектральный коэффициент пропускания оптического фильтра пирометра с учетом относительной характеристики чувствительности фотоприемника; λ_1 и λ_2 - граничные длины волн спектрального диапазона ИК-пирометра.

Выразим $L_{\lambda}^0(T_0)$ из уравнения (1) и представим (3) в виде:

$$\Delta L(\Delta T_p) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \psi(\lambda) \left\{ \varepsilon^{-1}(\lambda) [\varepsilon_{\lambda_c} L_{\lambda}^0(T_p) - L_{\lambda}^0(T_{\phi})] - [L_{\lambda}^0(T_p) - L_{\lambda}^0(T_{\phi})] + \frac{1 - \varepsilon_{\lambda_c}}{\varepsilon(\lambda)} L_{\lambda}^0(T_{\phi_c}) \right\} d\lambda. \quad (4)$$

С другой стороны, изменение энергетической яркости АЧТ при изменении его температуры на ΔT_p , можно определить как

$$\Delta L(\Delta T_p) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \psi(\lambda) [L_{\lambda}^0(T_p + \Delta T_p) - L_{\lambda}^0(T_p)] d\lambda. \quad (5)$$

Соотношение (5), в котором левая часть определена из (4), позволяет рассчитать поправки на коэффициент излучения поверхности ΔT_p методом итераций.

Как следует из приведенных выражений, исходными данными для расчета являются следующие параметры: рабочий спектральный диапазон ИК-пирометра $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, спектральный коэффициент излучения поверхности $\varepsilon(\lambda)$ и ее радиационная температура T_p , спектральный коэффициент излучения градуировочного устройства ε_{λ_c} , а также радиационные температуры фона T_{ϕ} при проведении измерений и градуировке прибора T_{ϕ_c} .

Значения коэффициента излучения исследуемой поверхности можно взять из таблиц [1, 2, 3], а градуировочного устройства определить экспериментально или рассчитать.

Радиационные температуры фона при градуировке и измерениях могут быть измерены тем же пирометром, которым исследуют поверхность или контактным термометром.

Для реализации итеративного метода решения уравнения (5) удобно представить зависимость энергетической яркости от температуры в рабочем спектральном диапазоне прибора полиномом $m = 3 \dots 4$ степени [4]

$$L_{\Delta\lambda T} = b_0 + b_1 T + b_2 T^2 + \dots + b_m T^m, \quad (6)$$

коэффициенты b_i которого определяются по методу наименьших квадратов для таблично заданной N парами значений T_i , $L_{\Delta\lambda}^0(T_i)$ функции

$$L_{\Delta\lambda}^0(T_i) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \psi(\lambda) L_{\lambda}^0(T_i) d\lambda, \quad (7)$$

где значения $L_{\lambda}^0(T_i)$ рассчитываются по формуле (2).

Если величина поправки не превышает $5 \dots 10^{\circ}\text{C}$, когда зависимость $L = f(T)$ практически линейная, формулы для ее расчета записываются в явном виде.

Действительно, вариацию энергетической яркости АЧТ при изменении его температуры на ΔT можно приближенно определить как

$$\Delta L = \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \psi(\lambda) \left(\frac{\partial L_{\lambda}^0(T)}{\partial T} \right)_{T=T_p} d\lambda \right) \Delta T. \quad (8)$$

Совмещая (4) и (8) и заменяя коэффициент пропускания оптического фильтра его средним значением, получим формулу

$$\Delta T_p = \frac{\varepsilon_{\Delta\lambda}^{-1} [\varepsilon_{\lambda_c} L_{\Delta\lambda}^0(T_p) - L_{\Delta\lambda}^0(T_{\phi})] - [L_{\Delta\lambda}^0(T_p) - L_{\Delta\lambda}^0(T_{\phi})] + \frac{1 - \varepsilon_{\Delta\lambda_c}}{\varepsilon_{\Delta\lambda}} L_{\Delta\lambda}^0(T_{\phi_c})}{\left(\frac{\partial L_{\Delta\lambda}^0(T)}{\partial T} \right)_{T=T_p}}, \quad (9)$$

где $\varepsilon_{\Delta\lambda}$, $\varepsilon_{\Delta\lambda_2}$ - эффективные значения коэффициентов излучения поверхности и градуировочного устройства соответственно, $L_{\Delta\lambda}^0(T_p)$, $L_{\Delta\lambda}^0(T_\phi)$, $L_{\Delta\lambda}^0(T_{\phi_2})$ - энергетические яркости АЧТ в спектральном диапазоне прибора при соответствующих температурах.

Величины энергетических яркостей можно рассчитать по формуле (7) с помощью аппроксимации (6), или по таблицам ИК-излучения. В последнем случае формулу (9) удобно представить в виде

$$\Delta T_p = \frac{\varepsilon_{\Delta\lambda}^{-1} [\varepsilon_{\Delta\lambda_2} F_p T_p^4 - F_\phi T_\phi^4] - [F_p T_p^4 - F_\phi T_\phi^4] + \frac{1 - \varepsilon_{\Delta\lambda_2}}{\varepsilon_{\Delta\lambda}} F_{\phi_2} T_{\phi_2}^4}{4 F_p T_p^3}. \quad (10)$$

Индексация F в выражении (10) аналогична индексации T , значения F берутся из таблиц [1, 3].

Величины поправок, рассчитанные по (5) для спектрального диапазона 8...12,6 мкм, приведены в таблице. Коэффициент излучения поверхности составлял 0,950, градуировочного устройства – 0,987. Радиационная температура фона при градуировке прибора принималась равной 20⁰С.

Таблица 1. Поправки к показаниям пирометра

Радиационная температура фона, 0С	Радиационная температура поверхности, 0С								
	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
-20	0,1	0,4	0,7	1,0	1,2	1,5	1,7	1,0	2,1
-10	-0,7	-0,2	0,1	0,5	0,8	1,1	1,3	1,6	1,8
0	-1,6	-1,0	-0,5	-0,1	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
10	-2,7	-1,9	-1,2	-0,7	-0,3	0,1	0,5	0,8	1,1

Список литературы

1. Брамсон М.А. ИК-излучение нагретых тел. М.: Наука, 1964. 223 с.
2. Брамсон М.А. Справочные таблицы по ИК-излучению нагретых тел. М.: Наука, 1988. 318 с.
3. Криксунов Л.З. Справочник по основам ИК-техники. М.: Сов. радио, 1978. 400 с.
4. Машков Ю.А. Полиномиальная аппроксимация зависимости энергии ИК-излучения от температуры в ограниченных участках спектра // Деп.ВИНИТИ, 16.12.94. Рег. № 2899 – В 94.