

«М.А.Гендельманнның 110 жылдығына арналған «Сейфуллин окулары – 19» халықаралық ғылыми-практикалық конференциясының материалдары = Материалы международной научно-практической конференции «Сейфуллинские чтения – 19», посвященной 110 - летию М.А. Гендельмана». - 2023. - Т.1, Ч.1.- С. 366-369.

УДК 21474

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗОН ИНФРАКРАСНОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

*Эркинов Д.Д., магистрант 2 курса  
Самандаров Д.И., PhD.*

*Ташкентский государственный технический университет, г. Ташкент*

В условиях термодинамического равновесия тела обмениваются равновесным тепловым излучением, интенсивность и спектр которого зависит только от температуры [1]. При этом энергия, отдаваемая телом за счет своего теплового излучения, равна энергии, получаемой телом при поглощении излучения, которое приходит от других тел. Спектральная зависимость интенсивности этого равновесного электромагнитного излучения от длины волны  $\lambda$  описывается формулой Планка для объемной плотности энергии равновесного излучения

$$W(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \left[ e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1 \right]^{-1} \quad (1)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура, определяемая законами термодинамики и которую, измеряют контактными датчиками.

Способы бесконтактного измерения температуры (тепловизора) основаны на регистрации теплового излучения тела, испускаемого поверхностью. При его описании пользуются поверхностной плотностью мощности излучения равновесного излучения или спектральной светимостью

$$M(\lambda, T) = \frac{c}{4} W(\lambda, T) = \frac{2\pi hc}{\lambda^5} \left[ e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1 \right]^{-1} = \frac{c_1}{\lambda^5} \left[ e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right]^{-1} \quad (2)$$

где  $c_1 = 2\pi hc^2$  и  $c_2 = hc/k$  – первая и вторая постоянные излучения. Как видно из рис. 1, спектральная светимость быстро возрастает с повышением температуры, а максимум  $M(\lambda)$  смещается в сторону более коротких длин волн.

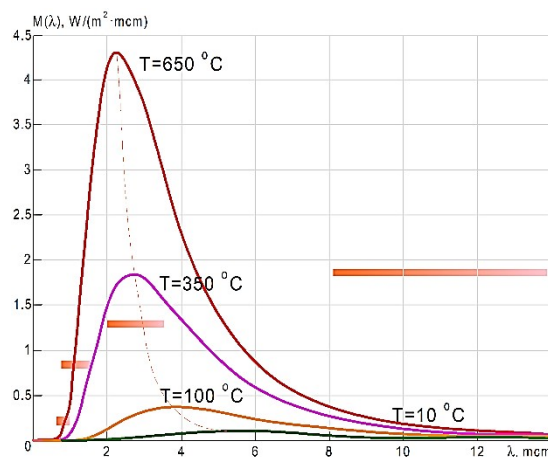


Рис. 1: Зависимости спектральной поверхностной светимости абсолютно черного тела от длины волны при разных температурах

Понятно, что при бесконтактном измерении температуры нагреваемых тел термодинамическое равновесие отсутствует. Тепловое излучение конденсированных сред формируется квантово-механическими явлениями при электронных переходах, колебательных и вращательных движениях атомов или молекул. Вследствие ряда физических причин, спектральная светимость поверхности реальных тел оказывается меньше, чем рассчитанная с помощью выражения (2). Поэтому для стандартизации измерений приходится пользоваться эталонными излучателями (моделями абсолютно черных тел), излучение которых описывается выражением (2), и вводить понятие спектрального коэффициента теплового излучения  $\varepsilon(\lambda, T)$  поверхности, т.е. отношение

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{M_i(\lambda, T)}{M(\lambda, T)} \quad (3)$$

где  $M_i(\lambda, T)$  - спектральная светимость тела.

Величина  $\varepsilon(\lambda, T)$  зависит от физических свойств материала тела, конфигурации и состояния его поверхности [2]. Исходя из определения (3) коэффициент излучения абсолютно черного тела (АЧТ) равен единице, а  $\varepsilon(\lambda, T)$  реальных тел всегда меньше единицы.

Как видно из схем формирования полей зрения тепловизоров (рис. 2), тепловое излучение от тела собирается их объективами на светочувствительную область фотоприемников в определенном телесном угле  $\varphi$ . Причем нормаль к поверхности контролируемого тела может образовывать угол  $\alpha$  с направлением на центр объектива. Экспериментальные измерения показали, что существует зависимость  $\varepsilon(\lambda, T)$  от угла  $\alpha$ , т.е. многие поверхности не являются ламбертовскими излучателями, у которых яркость не зависит от угла наблюдения [3]. Этот факт приводит к большому разнообразию зависимостей  $\varepsilon(\lambda, T, \alpha)$  при измерении температуры в реальных производственных условиях, что затрудняет использование справочных данных, полученных при  $\alpha=0$ .

Кроме влияния на регистрируемые значения интенсивности теплового излучения зависимости  $\varepsilon(\lambda, T, \alpha)$  в ряде случаев появляется добавка,

вызываемая излучением внешней среды, которое отражается поверхностью контролируемого тела. Полусферический коэффициент отражения излучения  $\rho$  для непрозрачных тел может быть найден из соотношения, которое следует из закона сохранения энергии (падающий поток равен сумме поглощенного и отраженного) и эквивалентности (установленной Кирхгофом) коэффициента теплового излучения в коэффициент поглощения.

$$\varepsilon + \rho = 1 \quad (4)$$

В производственных условиях это соотношение использовать очень сложно, поскольку тепловые потоки собираются объективами в достаточно узких телесных углах при разных значениях  $\varepsilon$ . К тому же материал, размеры и конфигурация нагреваемых изделий разнообразная.

Таким образом, для повышения достоверности бесконтактные способы измерения температуры должны обладать инвариантностью или устойчивостью к изменениям  $\varepsilon(\lambda, T, \alpha)$  и влиянию излучения внешней среды.

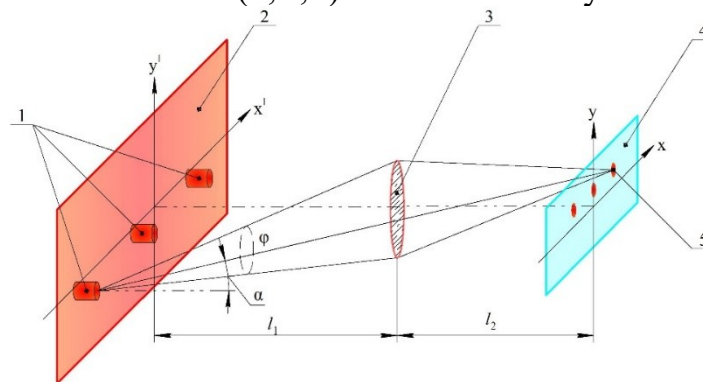


Рис. 2: Упрощенные схемы формирования полей зрения в тепловизорах: 1 – ИК трубки; 2 – поле зрения; 3 – объектив тепловизора с диаметром входного зрачка; 4 – плоскость формирования изображения; 5 – изображение тела.

Пропускание среды  $\tau(\lambda)$ , через которое проходит тепловое излучение (рис. 2), также может снижать регистрируемые тепловые потоки. Для исключения влияния поглощения излучения воздушной средой регистрацию теплового излучения ведут в окнах прозрачности атмосферы (рис. 1) [4]. При наличии пыли и паров воды часть теплового излучения тела будет рассеиваться. Пропускание среды приходится учитывать введением множителя  $\tau(\lambda)$ , который меньше единицы. Тогда спектральный поток теплового излучения, попадающий на объектив, пропорционален выражению

$$\Phi_{ob}(\lambda, T) \tau(\lambda) [\varepsilon(\lambda, T, \alpha) M(\lambda, T) + \rho(\lambda, \alpha, \beta) E_{i_c}(\lambda)] \quad (5)$$

где  $\beta$  - угол между направлением на источник освещения и нормалью к поверхности тела,  $E_{in}(\lambda)$  - спектральная освещенность поверхности тела внешним источником.

В тепловизорах энергия теплового излучения преобразуется в электрические сигналы, которые пропорциональны входному потоку  $\Phi_{ob}(\lambda, T)$ , попадающему на объектив, пропусканию объектива  $\tau_{ob}$ , площади входного зрачка объектива, а также зависят от спектральной чувствительности фотоприемника, пропускания используемых оптических

фильтров и т.д. Температура определяется путем сопоставления величины зарегистрированного сигнала с градуировочной зависимостью тепловизора, полученной при использовании эталонного излучателя - модели АЧТ.

Поле зрения тепловизоров для удобства визуального восприятия формируют достаточно широким и используют фокусировку, необходимую для получения четкого изображения. Это приводит к необходимости учета зависимости величины освещенности теплового изображения, формируемого объективом на фотоприемнике (рис. 2), от расстояния  $l_2$  до тела, температура которого измеряется. Коэффициент, связывающий светимость поверхности тела и освещенность его изображения на светочувствительной поверхности фотоприемника описывается выражением

$$K = \tau_{ob} \left( \frac{D^2}{4l_2^2} \right) \left( \frac{1 - l_2^2}{l_1} \right)^2 \quad (6)$$

В тепловизорах среднего инфракрасного диапазона спектра используют короткофокусные объективы и пренебрегают снижением регистрируемого потока при  $l_1 > 2$  м, когда  $l_2/l_1 < 1/30$ .

Таким образом, наличие трудно контролируемых параметров и характеристик, влияющих на регистрируемые потоки теплового излучения, приводит к тому, что при бесконтактных измерениях в производственных условиях определяется не истинная, а некоторая условная температура.

При контроле технологических процессов с устойчиво повторяющимися параметрами, например, сталепрокатном производстве, где есть возможность усреднения и отбрасывания участков с резкими отклонениями излучательных характеристик от усредненных, часто пользуются одним из видов условной температуры. При стабильных условиях производства ее использование позволяет поддерживать параметры технологического процесса в заданных границах без необходимости установления истинной температуры.

В подавляющей же массе технологических процессов на машиностроительных предприятиях номенклатура изделий обширная с небольшим объемом изготавливаемых деталей, что требует использования способов и приемов измерений, позволяющих максимально ослабить влияние неконтролируемых факторов на получаемые значения температуры. Только ясное понимание пользователем тепловизионной техники вклада каждого из факторов в суммарный сигнал поможет избежать ошибок в трактовке получаемых отсчетов температуры и повысить достоверность бесконтактного контроля температуры.

#### Список использованной литературы

1. Коротаев В.В., Мельников Г.С., Михеев С.В., Самков В.М., Солдатов Ю.И. Основы тепловидения - СПб: НИУ ИТМО, 2012. - 122 с.
2. Snopko V N 1999 *Osnovy metodov pirometrii po spektru teplovogo izlucheniya* (Minsk: NAN Belarusi).
3. Tarawade A., Samandarov D., Safarov J., Sultanova S. Research of Mulberry Fruit Drying in a Convection-Infrared Drying Equipment / Proceedings

of International Conference on Technological Advancements in Computational Sciences, ICTACS 2022, 2022, pp. 825–830.

4. Safarov J.E., Sultanova S.A., Samandarov D.I., Zulpanov S.U., Rakhimov A. Research of temperature zones during primary processing of silkworm cocoons using a modern thermal imaging camera / Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2176(1), 012078.