

УДК 533.9.082.5

DOI: 10.18384/2310-7251-2018-3-54-64

ТЕРМОМЕТРИЧЕСКАЯ ПИРОМЕТРИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Дубас Л.Г.

*Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский Институт»
123182, г. Москва, пл. Курчатова, д. 1, Российская Федерация*

Аннотация. В статье предлагаются технологические измерения пирометрической температуры для экспериментально исследованных объектов. Для компенсации неопределённости измерения опорной температуры используется диагностический радиометрический фактор, равный произведению коэффициента излучения и коэффициента пропускания и пропорциональный величине экспоненциального типа по отношению к длине волны электромагнитного излучения в оптическом диапазоне. Доказана необходимость учёта некоторого коэффициента тепловой экранировки экспериментально исследованного электромагнитного излучения при регистрации тепловой интенсивности излучения. Измеренная величина температуры конденсированного излучателя для световой газовой лампы, используемой для приемлемого освещения, относится к высокотемпературному диапазону. Подключение термометрической пирометрии может быть направлено на создание тревожной сигнализации и блокировки реальной температуры.

Ключевые слова: термометрическая пирометрия, пирометрическая температура, калибровка, опорная температура.

THERMOMETRIC PYROMETRY FOR MEASURING RADIATOR TEMPERATURE

L. Dubas

*National Research Centre "Kurchatov Institute"
pl. Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russian Federation*

Abstract. Technological measurements of pyrometry temperature are proposed for experimentally investigated objects. To compensate for the uncertainty of measuring the agentive temperature, the diagnostic radiometric factor is used, which is equal to the product of emissivity and transmissivity and is proportional to the magnitude of exponential type with respect to the wavelength of electromagnetic radiation in the optical range. The necessity of taking into account some factor of thermal screening is experimentally investigated for electromagnetic radiation and is proved at registration of thermal radiation. The measured value of the condensed radiator temperature for a light gas lamp used for comprehensible illumination falls into a high-temperature range. Thermometric pyrometry can be used to construct an alarm system and block real temperature.

Key words: thermometric pyrometry, pyrometry temperature, calibration, agentive temperature.

Введение

Рассматривается термометрическая пирометрия с коррекцией для мониторинга температуры по регистрации оптического излучения.

Термометрическая пирометрия предполагает регистрацию тепловой мощности теплового излучения на спектре длин волн. Предлагается для решения этой задачи создать метод пирометрии с определением действительных условий во время измерения.

При наблюдении сигнала, ослабляющегося с изменением длины волны, желательно в спектре длин волн также усиливать чувствительность фотоприёмников.

Цель исследования

Цель исследования заключается в определении необходимости проведения контроля измерений коэффициентов излучения и пропускания при предоставлении пирометрических приближённых результатов.

Для некоторых высокотемпературных исследований нет ясности о значении погрешности и точности измерений, которые необходимы с точки зрения последствий, к которым приводит выход измеренной температуры за пределы заданного отрезка значений. Поэтому для некоторых высокотемпературных измерений будем предполагать, что умеренная относительная погрешность измерения пирометрической температуры достаточна с целью получения некоторого заключительного результата.

При наличии компактных оптических спектрометров с фотоприёмниками предоставляется возможность непосредственно регистрировать в каждом эксперименте форму интенсивности в тепловых спектрах оптического излучения объекта. Эти приборы могут за малое время пронаблюдать спектр излучения светящихся объектов в исследуемой среде. Для определения пирометрической температуры необходимо в каждом опыте регистрировать некоторый спектр излучения исследуемого объекта и сопоставлять его с предполагаемым спектром.

В термометрической пирометрии предполагается калибровка пирометрических температурных измерений по отношению к опорному тепловому источнику излучения.

Метод исследования

Вполне востребованным является становление термометрической пирометрии для измерения реальных действительных температур.

В качестве термометрической пирометрии предполагается термометрия спектрального распределения, и для этого понимания ниже приведены расчётные формулы.

Метод исследования предполагает теоретическое заключение о возможности измерения пирометрической температуры с применением калиброванных спектрометров, основанное на измерении электромагнитного теплового излучения, наблюдаемого в спектрометре.

Действительные температуры определяются по тепловому излучению с применением свойств теплового излучения, описывающих спектральную тепловую

мощность некоторого плотного тела. Мощность спектрального теплового излучения некоторого плотного тела в некотором спектре волновых чисел определяется формулой Планка для спектральной мощности на единицу волнового числа электромагнитного излучения:

$$I_k = qC_1k^3 / [\exp(Ck/T - 1)]; \quad q(k, T) = \varepsilon(k, T) \cdot \tau(k, T), \quad (1)$$

где I_k – спектральная удельная мощность по отношению к волновому числу ($\text{Вт} \cdot \text{мкм} \cdot \text{см}^{-2}$), $C_1 = 37417,7 \text{ Вт} \cdot \text{мкм}^4/\text{см}^2$, $C = 14387,8 \text{ мкм} \cdot \text{К}$, k – волновое число в обратных микрометрах регистрируемого излучения в спектрометре HR2000+, T – температура, ε – коэффициент излучения (emissivity), τ – коэффициент пропускания (transmissivity) излучения, q – радиометрический фактор (радиоматический фактор) для наблюдаемого излучения.

Радиометрический фактор (градация серости) определяется результатом произведения коэффициента предполагаемого теплового излучения и коэффициента пропускания излучения сквозь среду наблюдения для регистрируемого электромагнитного излучения.

Для реальных объектов тепловые спектры излучения отличаются от чёрнотельного спектра излучения, и эти отличия определяются коэффициентом излучения, который находится в зависимости от температуры и от длины волны в общем подходе и называется коэффициентом излучения (способностью излучения).

Радиометрический фактор $q(L, T)$ экспериментально измеряется, причём для определения этого фактора в общем случае требуется специальный метод [1]. В частном случае возможно измерение радиометрического фактора методом спектрального пирометра [2], например, согласованного с многоволновым подходом, предполагаемым в данной статье, соответствующим сумме полиномов по степеням волнового числа. Также здесь следует отметить, что в способе [2] для пирометра предполагается исследование иного метода измерения температур.

Для калибровки пирометров следует откалибровать спектрометры, которые предполагается использовать для измерения интенсивности. Эта калибровка связана с аппаратным и программным обеспечением спектрометров с целью создания необходимой зависимости выходного результата от регистрируемой входной электромагнитной мощности.

С целью регистрации электромагнитного излучения используется оптический коллиматор 84-UV-25 (Ocean Optics). Средний геометрический угол визирования равен $\approx 0,03$ радиана.

С целью использования спектрометра HR2000+ в оптической системе дистанционного измерения температуры используется стандартная процедура калибровки с применением калибровочной лампы HL-3P-CAL (Ocean Optics).

Для калибровки температуры предполагается сравнение поверяемого температурного измерения с показанием образцового измерения.

Следует отметить, что в регистрируемых экспериментальных результатах в данном диапазоне длин волн обычно используются длины волн [3; 4], а не волновые числа, если речь не идёт о теории. Кроме того, нередко указывается только коэффициент излучения (обобщённый), а коэффициент пропускания в допол-

нении. Однако в начале статьи указана та формула, которая подразумевается для дальнейших теоретических расчётов и входит в совокупный метод измерения температуры, где необходимо преобразование переменной длины волны в волновое число, причём это относится к совокупному радиометрическому фактору.

Рассмотрим преобразование первичной формулы (1) в виновских координатах (P, kC):

$$B = [-P + \ln(C_1)]/(kC); \quad P = -\ln [1/C_1 + qk^3/I_k(k)]; \quad L = 1/k, \quad (2)$$

где B – обратная величина действительной температуры и L – длина волны.

Спектральные измерения мощности на спектре волновых чисел для спектральных температур соответствуют каждому волновому числу; k_1, k_2 и тому подобное, а средняя величина обратных температур по спектру есть совокупное значение реальной обратной температуры. Однако значение B в виновских координатах является определённой величиной, не зависящей от волнового числа. Это определённое значение равно величине обратной температуры. В действительных измерениях для полихроматической функции $B(k)$ график регистрируется с неопределённостями и погрешностями. Метод наименьших квадратов в качестве метода усреднения систематических и статистических погрешностей может быть использован для определения средней величины используемой обратной температуры [5–8].

В согласии с формулой (2) для определения температуры, приводим простую коротковолновую асимптотику для спектрального отношения.

$$B = -(P - P_0)/\{C(k - k_0)\}; \quad P = \ln [(k^{-3}I_k)];$$

$$B = Bt + [\ln q_q]/[C(k - k_0)]; \quad q_q = q(k, B)/q(k_0, B); \quad (3)$$

$$Bt = \{\ln[(k_0^{-3}I_k(k_0))/(k^{-3}I_k(k))]\}/\{C(k - k_0)\},$$

где Bt – обратная величина для частной пирометрической температуры; q_q – фактор спектрального отношения радиометрических факторов; k_0 – отсчетное волновое число; $|\ln[q_q(k, B)]/[C(k - k_0)]|$ – модуль логарифма спектрального отношения радиометрических факторов, отнесённого к спектру волновых чисел.

Итак, обратная пирометрическая температура усредняется по спектру.

Для построения модели логарифма спектрального отношения радиометрических факторов, например, воспользуемся разложением в ряд по степеням разности волновых чисел ($k - kc$).

$$\ln[q_q(k, B)] = \frac{a_{-1}}{k} + \sum_{n=0}^N a_n \cdot J_n \left(\frac{2(k - kc)}{k_2 - k_1} \right); \quad kc = \frac{k_1 + k_2}{2}; \quad n \geq 0, \quad (4)$$

где a_n – некоторые коэффициенты степенного разложения; n – целые числа, перечисляющие полиномиальные волны; J_n – полиномы Лежандра n -ой степени; k_1, k_2 – граничные значения выбранного расчётного спектрального отрезка; N – предел суммирования, характеризующий степень приближения.

Здесь отмечены $N+1$ цветных полиномиальных волн, плюс «волна» калибровочной диагностики и, если добавить «волну» теплового излучения, то получим $(N+3)$ -е волновое представление.

Для опорного излучателя ограничимся только простейшим нулевым цветовым приближением, в частном представлении $N = 0$; $a_0 = \text{const}$. В простейшем нулевом приближении радиометрический фактор опорного предмета имеет некоторую спектральную зависимость, которую будем аппроксимировать экспоненциальной зависимостью от длины волны.

Результаты исследования измерения температуры нагретой металлической панели

В качестве электромагнитного излучателя от раскалённой панели применяется плитка с листом окисленного оцинкованного железа, покрытого, возможно, оксидом цинка, прогретого с обратной стороны струйной горелкой паяльной лампы «Мотор Сич ЛП-2» с расходом бензина 0,90 л/час.

Коэффициент излучения оксида цинка имеет известную спектральную зависимость, приведённую в справочнике [1]. Форма этого графика примерно однородна в интервале длин волн $544 \div 665$ нм для температур около 950 К. Зарегистрированная пирометрическая температура, измеренная в указанном диапазоне, совпадает в данном специальном случае с пирометрической температурой в сером представлении для однородного коэффициента излучения [2–4].

На рис. 1 приведён зарегистрированный спектр в виновских координатах для панели из оцинкованного железа, покрытой оксидом цинка, в области визирования в регистрируемом диапазоне длин волн $544 - 665$ нм.

Вид спектра таков, что в виновских координатах его можно удовлетворительно аппроксимировать прямой линией, предполагаемой на рис. 1. Температура равна $T = 960$ К.

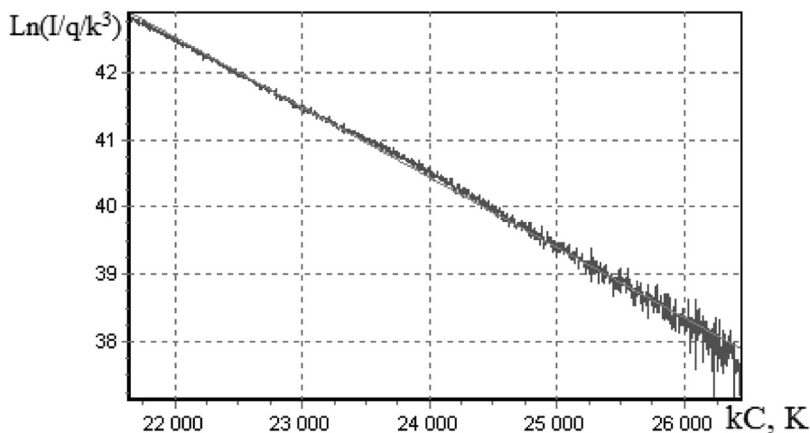


Рис. 1. Спектр в виновских координатах для оксида цинка.

Также следует отметить, что в процессе измерения стационарной температуры проявлялись колебания флуктуаций температуры по времени, ограниченные смещениями $\Delta T = \pm 12$ К.

Для получения величины систематической погрешности необходимо дополнительное измерение температуры, которое производилось термопарой К-типа с непосредственным контактом на раскалённой металлической поверхности. В итоге температура составляет величину $T = 945 \pm 24$ К.

Погрешность наилучших дистанционных измерений температуры в данном специальном случае приближенно равна 2,5% от величины измеряемой абсолютной температуры.

Таким образом, полученные величины температуры для бесконтактного и контактного методов с учётом флуктуаций практически совпадают, и возможное систематическое смещение составляет величину 15 К, которое находится в пределах погрешности измерения.

Измерение температуры панели инфракрасного оптического излучателя

Отметим, что в дальнейших измерениях к погрешности измерения может прибавляться величина, связанная с неопределённостью радиометрического фактора, поэтому необходимо усложнить вышеуказанную процедуру расчёта кинетики температуры с целью учёта радиометрического фактора. При этом следует различать измерение пирометрической температуры опорного излучателя и пирометрической температуры поверхности раскалённой панели с численной коррекцией результата измерения.

Для пирометрических температурных измерений электромагнитного излучателя используется инфракрасная газобаллонная плитка ГИ-1,55 с номинальной тепловой мощностью 1,55 кВт.

В качестве теплового излучателя инфракрасной газовой горелки применяется цельная керамическая излучающая панель со специально разработанной формой отверстий, способствующей максимально эффективному сгоранию баллонного газа.

Сравнительные измерения производились как посредством регистрации электромагнитного спектра в интервале длин волн $576 \div 670$ нм, так и посредством контактного измерения температуры керамической излучающей панели с использованием прибора DT-9208A и стандартной приборной термопары К-типа (хромель-алюмелевой термопары).

Контактное измерение температуры раскалённой панели зарегистрировало температуру, равную (1150 ± 26) К в соответствии с погрешностью, определяемой паспортными данными.

Для использования спектрометра HR2000+ в термометрической системе стандартного дистанционного измерения температуры в диапазоне средних температур использовалась специальная процедура калибровки с применением опорного электромагнитного излучения от раскалённой керамической инфракрасной панели.

Коэффициент излучения керамической панели без учёта пламенного окружения имеет некоторую спектральную зависимость, которую аппроксимировали графиком коэффициента излучения для оксида алюминия в регистрируемом диапазоне длин волн ($576 \div 670$) нм, представленным в справочнике [1] и показанном на рис. 2.

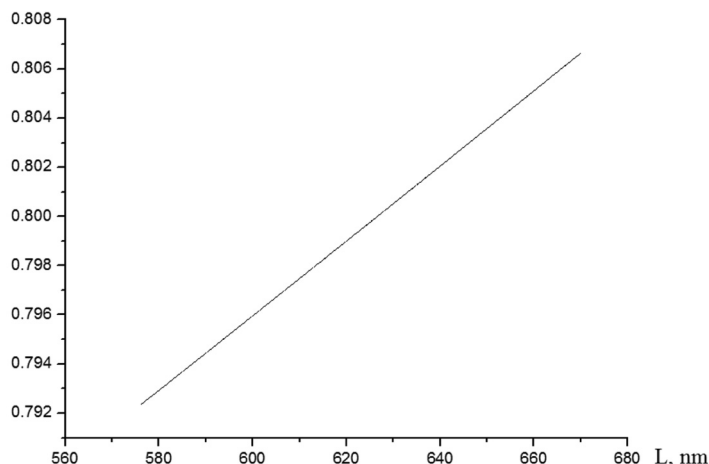


Рис. 2. Коэффициент излучения оксида алюминия [1].

Дополнительный множитель для радиометрического фактора пламенного окружения керамической панели имеет некоторую спектральную зависимость, которую будем аппроксимировать экспоненциальной зависимостью от длины волны $\exp(-L/0,35 \text{ мкм})$ в интервале длин волн (576 ÷ 670) нм для температур в диапазоне $\approx 1150 \text{ К}$.

Выбор вышеуказанной зависимости для радиометрического фактора подбирается из условия, что зарегистрированная пирометрическая температура, измеренная в указанном диапазоне, совпадает с температурой, контактно измеренной термометрическим методом.

На рис. 3 приведён зарегистрированный спектр в виновских координатах для керамической панели из специальной керамики, покрытой, возможно, оксидом алюминия, в регистрируемом диапазоне длин волн (576 ÷ 670) нм в области визирования.

Вид спектра таков, что в виновских координатах его можно хорошо аппроксимировать прямой линией. Температура равна $T = 1150 \text{ К}$.

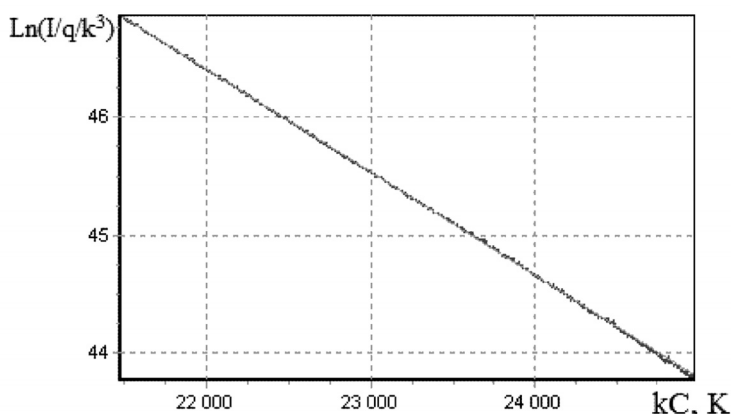


Рис. 3. Спектр в виновских координатах для оксида алюминия.

Здесь следует отметить, что дополнительное измерение температуры термпарой с непосредственным контактом на раскалённой керамической поверхности даёт величину $T = 1150 \pm 26$ К. Здесь приводится величина погрешности сравнительного измерения. Также следует заметить, что в процессе измерения стационарной температуры проявлялись колебания флуктуаций температуры по времени, измеренные и ограниченные смещениями $\Delta T = \pm 0,6$ К.

Таким образом, сравнение полученных величин для контактного и бесконтактного методов в пределах погрешности измерений позволяет использовать приближенно работающую экспоненциальную аппроксимацию для радиометрического фактора с целью температурной калибровки пирометрической системы.

Доказана возможность учёта для радиометрического фактора некоторого множителя с экспоненциальной зависимостью от длины волны, определяемой тепловой экранировкой экспериментально исследованного электромагнитного излучения при регистрации тепловой интенсивности излучения.

Погрешность наилучших дистанционных измерений в данном случае приближенно равна 2,3 % от значения измеряемой абсолютной температуры.

Измерение температуры светового оптического излучателя

Для температурных измерений электромагнитного излучателя, покрытого оксидами редкоземельных элементов, используется световая газовая лампа (мини) KL-103 "KOVEA" OBSERVER // GAS LANTERN.

Коэффициент излучения раскалённого микросистемного излучателя без учёта пламенного окружения имеет некоторую спектральную зависимость, которую аппроксимируем формулой (4). Для этого коэффициента излучения форма графика во втором цветном приближении (4) подбирается в экспоненциальном виде в интервале длин волн (576 ÷ 670) нм для измеряемой температуры.

Пирометрическая температура, которая должна быть измерена в указанном диапазоне, предположительно совпадает в данном специальном случае с температурой, полученной с учётом экранного множителя пропускательной способности пламенного окружения. Совокупный множитель для радиометрического фактора раскалённого микросистемного излучателя с учётом пламенного окружения имеет некоторую спектральную зависимость, которую, согласно формуле (4) во втором цветном приближении, будем аппроксимировать экспоненциальной зависимостью от длины волны на отрезке длин волн (0,57616 ÷ 0,67012) мкм для температуры 2348 К. Например, предполагается, что:

$$q = \exp[-1/(k \cdot 0,35) + \text{const} + b_1 \cdot (k - k_c) + b_2 \cdot (k - k_c)^2]$$
$$b_1 = 0,18365; \quad b_2 = -1,89338; \quad k_c = 1,61395. \quad (5)$$

Выбор вышеуказанной зависимости для радиометрического фактора подбирается из условия аналогии с предшествующим измерением для инфракрасного излучателя и коэффициентом излучения для оксида иттрия, возможно используемого для стабилизации покрытия светового излучателя, в регистрируемом диапазоне длин волн (576 ÷ 670) нм, представленным в справочнике [1] и рас-

считанным для температуры ~ 2348 К. Этот выбор обусловлен тем, что значение радиометрического фактора определяется произведением излучательной способности и коэффициента пропускания среды, получаемого из аналогии с диагностикой предшествующих результатов исследований для панели инфракрасного оптического излучателя.

На рис. 4 приведён зарегистрированный спектр в виновских координатах для излучателя световой лампы, в регистрируемом диапазоне длин волн 576 нм – 670 нм в области визирования.

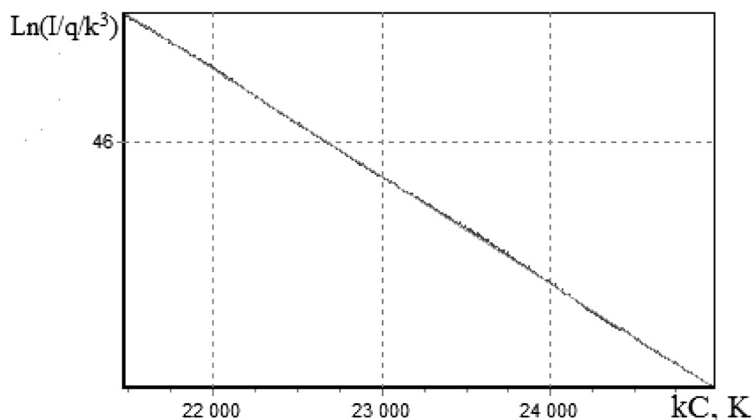


Рис. 4. Спектр в виновских координатах для излучателя лампы.

Вид спектра таков, что в виновских координатах его можно хорошо аппроксимировать прямой линией, предполагаемой на рисунке. Температура равна $T = 2348$ К.

Следует заметить, что в процессе измерения стационарной температуры проявлялись колебания флуктуаций температуры, по времени ограниченные смещениями $\Delta T = \pm 6$ К.

Отметим, что в этих измерениях погрешность измерения, связанная с неопределённостью радиометрического коэффициента, в наилучших дистанционных измерениях в данном случае приближенно равна 2,5 % от значения измеряемой абсолютной температуры.

В отличие от предшествующего варианта излучателя с инфракрасной газовой горелкой с цельной керамической излучающей панелью, этот вариант измерений относится к дистанционному измерению температуры в диапазоне высоких температур для раскалённого микросистемного светового излучателя с газовой горелкой.

Заключение

На основании опытов, указанных в данной статье, можно сделать вывод о возможности использования оптических спектрометров для регистрации кинетики пирометрической температуры наблюдаемых излучателей.

Калибровка пирометрической температуры производилась в представлении экспоненциальной зависимости от длины волны $\sim \exp(-L/350 \text{ нм})$ для диагностического радиометрического фактора на длинах волн (576 ÷ 670) нм.

Регистрация коллекции спектров возможна с максимальной частотой до ≈ 400 Гц при условии использования быстрой техники, предназначенной для сбора информации о спектральных коллекциях.

Характерные величины измеренной температуры для раскалённого микросистемного светового излучателя с газовой горелкой относятся к высокотемпературной области ~ 2348 К.

Статья поступила в редакцию 01.08.2018 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Излучательные свойства твердых материалов: справочник / под общ. ред. А.Е. Шейндлина. М.: Энергия. 1974. 472 с.
2. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука. 1982. 296 с.
3. Магунов А.Н. Спектральная пирометрия. М.: Физматлит. 2012. 248 с.
4. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М: ИД Спектр. 2009. 544 с.
5. Radiometric Temperature Measurements: I. Fundamentals / ed. by Z.M. Zhang, B.K. Tsai, G. Mashin // *Experimental Methods in the Physical Sciences*. Amsterdam: Elsevier, 2009. Vol. 42. 343 p.
6. Radiometric Temperature Measurements: II. Applications / ed. by Z.M. Zhang, B.K. Tsai, G. Mashin // *Experimental Methods in the Physical Sciences*. Amsterdam: Elsevier, 2010. Vol. 43. 458 p.
7. Dubas L.G. Pyrometry technique of measuring radiometric temperature // *European Journal of Natural History*. 2013. No. 1. P. 27–28.
8. Dubas L.G. Noncontact Thermal Pyrometry for Condensed Materials // *Technical Physics*. 2013. Vol. 58. Iss. 1. P. 127–131.

REFERENCES

1. Sheindlin A.E., ed. *Izluchatel'nye svoistva tverdykh materialov: spravochnik* [Radiative properties of solid materials: Handbook]. Moscow, Energiya Publ., 1974. 472 p.
2. Svet D.Ya. *Opticheskie metody izmereniya istinnykh temperatur* [Optical methods of measuring true temperatures]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 296 p.
3. Magunov A.N. *Spektral'naya pirometriya* [Spectral pyrometry]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 248 p.
4. Vavilov V.P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoi kontrol'* [Infrared thermography and thermal control]. Moscow, Spektr Publ., 2009. 544 p.
5. Zhang Z.M., Tsai B.K., Mashin G., ed. Radiometric Temperature Measurements: I. Fundamentals. In: *Experimental Methods in the Physical Sciences*. Amsterdam, Elsevier Publ., 2009. Vol. 42. 343 p.
6. Zhang Z.M., Tsai B.K., Mashin G., ed. Radiometric Temperature Measurements: II. Applications. In: *Experimental Methods in the Physical Sciences*. Amsterdam, Elsevier Publ., 2010. Vol. 43. 458 p.

7. Dubas L.G. Pyrometry technique of measuring radiometric temperature. In: *European Journal of Natural History*, 2013, no. 1, pp. 27–28.
8. Dubas L.G. Noncontact Thermal Pyrometry for Condensed Materials. In: *Technical Physics*, 2013, vol. 58, iss. 1, pp. 127–131.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дубас Леонид Григорьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального Исследовательского Центра «Курчатовский Институт»;
e-mail: top1@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Leonid G. Dubas – PhD in Physical and Mathematical Sciences, senior researcher, National Research Centre “Kurchatov Institute”;
e-mail: top1@bk.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Дубас Л.Г. Термометрическая пирометрия для измерений температуры излучателей // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2018. № 3. С. 54–64.
DOI: 10.18384/2310-7251-2018-3-54-64

FOR CITATION

Dubas L.G. Thermometric pyrometry for measuring radiator temperature. In: *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Physics and Mathematics*, 2018, no. 3, pp. 54–64.
DOI: 10.18384/2310-7251-2018-3-54-64