

Оптическая часть пирометра установки для калибровки вольфрам-рениевых термопар

Владимир Ксенофонтович Битюков^{1✉}, Руслан Александрович Горбунов², Денис Сергеевич Симачков³, Анатолий Александрович Улановский⁴, Александр Вилленович Фрунзе⁵

^{1, 3} МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Москва, Россия

¹bitukov@mirea.ru✉, <http://orcid.org/0000-0001-6448-8509>, ³simachkov@mirea.ru

² Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний Калужской области, г. Калуга, Россия, gorbunov@csmkaluga.ru

⁴ Обнинская термоэлектрическая компания, г. Обнинск, Калужская область, Россия, otc-director@otc-obninsk.ru

⁵ Автономная некоммерческая организация по исследованию, разработке и внедрению научно-технических приборов «Термокопт», Москва, Россия, alex.fru@mail.ru

Аннотация. Для решения актуальной проблемы, связанной с обеспечением технологических процессов современными средствами измерений температуры, сформулированы специфические требования к оптической части пирометра, предназначенного для измерения температуры измерительной полости установки для калибровки вольфрам-рениевых термопар до температуры 2200 °С. В соответствии с указанными требованиями доработана и экспериментально исследована оптическая часть серийно выпускаемого пирометра «Термокопт».

Ключевые слова: вольфрам-рениевая термопара, калибровка, измерение температуры, пирометр, поле зрения

Для цитирования: Битюков В. К., Горбунов Р. А., Симачков Д. С., Улановский А. А., Фрунзе А. В. Оптическая часть пирометра установки для калибровки вольфрам-рениевых термопар // Измерительная техника. 2021. № 1. С. 43–47. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-1-43-47>

The modified optical part of a pyrometer used for calibrating tungsten-rhenium thermocouples

Vladimir K. Bitukov^{1✉}, Ruslan A. Gorbunov², Denis S. Simachkov³, Anatoly A. Ulanovsky⁴, Alexandr V. Frunze⁵

^{1, 3} MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

¹bitukov@mirea.ru✉, <http://orcid.org/0000-0001-6448-8509>, ³simachkov@mirea.ru

² The State Regional Centre for Standardization, Metrology and Testing in the Kaluga Region, Kaluga, Russia, gorbunov@csmkaluga.ru

⁴ “Obninsk thermoelectric company”, Obninsk, Kaluga Region, Russia, otc-director@otc-obninsk.ru

⁵ “Termokopt” nonprofit scientific and technical partnership, Moscow, Russia, alex.fru@mail.ru

Abstract. The provision of technological processes with modern techniques for measuring temperature is a challenging issue. For solving this problem there need to be formulated specific requirements for the optical part of the pyrometer, intended for measuring the temperature in the measurement cavity of the installation used for calibrating tungsten-rhenium thermocouples up to a temperature of 2,200 °C. In accordance with these requirements, in mass produced “Termokopt” pyrometer, its optical part has been modified and experimentally investigated.

Keywords: tungsten-rhenium thermocouple, calibration, temperature measurement, pyrometer, field of view

Введение. Температура – основной информационный параметр, характеризующий как технологический процесс изготовления соответствующего объекта, так и его тепловое состояние на всех этапах жизненного цикла [1, 2]. Приборно-методическому обеспечению определения температуры посвящено достаточно много работ [например 3–6].

При практической реализации указанной процедуры необходимо учитывать ряд специфических требований.

Вольфрам-рениевые термопары имеют самый широкий диапазон измеряемых температур среди контактных датчиков, достигающий 2500 °С для термопар типа С. В рамках государственного контракта ООО «Обнинская термоэлектрическая

компания» (ОТК) (Россия) с Российским фондом содействия инновациям была создана установка для калибровки таких термопар [7]. Средством измерений температуры в данной установке является пирометр, оптическая часть которого должна удовлетворять определённым требованиям.

Цель работы – формулирование требований к оптической части пирометра и расчёт соответствующей оптической части, а также описание доработок серийно выпускаемого пирометра «Термоконт» (АНО НТП «Термоконт», Россия),

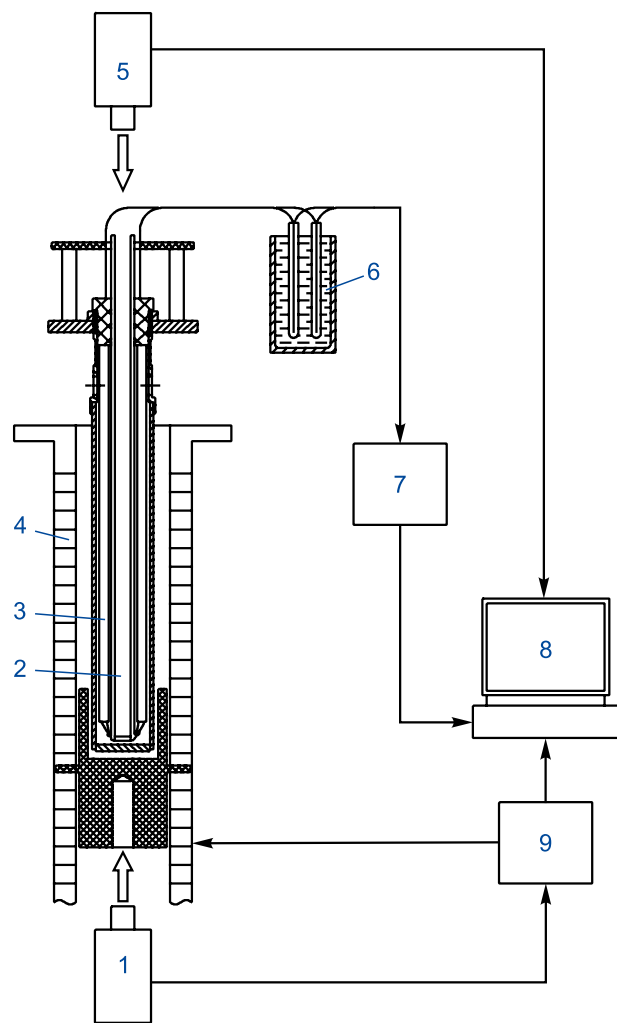


Рис. 1. Схема установки для калибровки вольфрам-рениевых термопар:

- 1 – пирометр – датчик температуры печи; 2 – измерительная полость;
- 3 – нагревательная полость; 4 – графитовая печь; 5 – контрольный пирометр «Термоконт-ТВЗС2»;
- 6 – сосуд Дьюара с тающим льдом; 7 – прецизионный милливольтметр; 8 – персональный компьютер;
- 9 – блок управления нагревом

Fig. 1. Installation for calibration of tungsten-rhenium thermocouples: 1 – pyrometer – temperature sensor of the furnace; 2 – measurement cavity; 3 – heating cavity; 4 – graphite furnace; 5 – control pyrometer “Termokont-TV3C2”; 6 – Dewar vessel containing melting ice; 7 – precision millivoltmeter; 8 – personal computer; 9 – heating control unit

позволяющих получить требуемые оптические характеристики, а также результатов их экспериментального исследования.

Описание установки. Схема установки приведена на рис. 1. В основе ее лежит высокотемпературная графитовая печь 4 типа ВВ3500 (ВНИИОФИ, Россия). Калибруемые термопары располагают в её нагревательной полости 3. Свободные концы калибруемых термопар находятся в сосуде Дьюара 6 с тающим льдом, выходную термоэлектродвижущую силу (ТЭДС) термопар измеряют прецизионным милливольтметром 7. Управление процессом нагрева печи осуществляется блоком 9, в качестве датчика температуры печи используется пирометр 5.

Для измерения температуры нагревательной полости внутри ее помещена измерительная полость 2 из вольфрамовой трубки внутренним диаметром 8 мм, глубиной 400 мм и стенками толщиной 1 мм. Температура измерительной полости контролируется пирометром «Термоконт-ТВЗС2» 5. Ход процесса нагрева, выходные сигналы калибруемых термопар и температура печи, измеряемая пирометром, регистрируется на персональном компьютере 8.

Постановка задачи. Метрологически значимые результаты измерений температуры выше предельно допустимой для платинородий-платинородиевых (типа В) термопар (1700 °С) в настоящее время можно получать только с помощью пирометров. С этой целью обычно используют узкополосные яркостные пирометры с высокими значениями показателя визирования (от 1:200 до 1:300). Измерения обычно проводят в полости, излучательные характеристики которой должны быть приближены к излучательным характеристикам абсолютно чёрного тела (АЧТ).

Предварительные экспериментальные исследования, проведённые в ООО «ОТК», показали, что равномерность температуры стенки нижней части измерительной полости в пределах одного градуса Цельсия возможна лишь на расстоянии 20–25 мм от дна полости. При большем удалении от дна неравномерность температуры стенки полости может достигать 10 °С и даже более. Это означает, что измерительную полость с гладким дном нельзя считать приемлемым приближением АЧТ. С целью компенсации этого недостатка дно полости делают профилированным с цилиндрическими возвышенностями. Согласно приближенным вычислениям излучательная способность полости такой конструкции $\varepsilon \approx 0,93...0,94$ [8, 9].

Однако небольшой придонный участок измерительной полости, характеризуемый равномерным распределением температуры, можно считать приближением АЧТ для пирометра только в том случае, если в поле зрения пирометра попадают лишь области с одинаковой температурой. Это означает, что оптическая часть пирометра 5 должна быть спроектирована таким образом, чтобы его поле зрения захватывало только дно измерительной полости 2 и не более 20 мм её придонной стенки (см. рис. 1). Рассмотрим удовлетворяющую этому условию диаграмму поля зрения пирометра и методику её расчёта.

Расчётные соотношения. В приближении геометрической оптики поле зрения пирометра, у которого расстояние

между приёмником и объективом больше фокусного расстояния объектива, представляет собой два соосных конуса, направленных вершинами друг на друга. Сопряжение конусов происходит в плоскости формирования изображения приёмника пирометра (рис. 2).

На приёмник излучения пирометра попадает тепловой поток от любого объекта внутри поля зрения, а излучение объектов вне поля зрения не вносит вклад в сигнал, вырабатываемый приёмником. Следовательно, поле зрения должно захватывать дно измерительной плоскости и, в крайнем случае, её внутренние стенки до высоты 20 мм от дна. Только в этом случае излучение, попадающее на приёмник пирометра, будет близким к излучению АЧТ, и результаты измерений калиброванного по АЧТ пирометра будут достоверными (естественно, с учётом излучательной способности полости, о которой упомянуто выше).

Рассмотрим построение поля зрения линзового пирометра в зависимости от диаметра L и фокусного расстояния f входного объектива, диаметра d чувствительной площадки приёмника излучения или установленной перед ним полевой диафрагмы, а также расстояния f_1 от главной плоскости входного объектива до плоскости приёмника или полевой диафрагмы [10].

Согласно законам оптики плоскости f_1 с приёмником диаметром d соответствует сопряжённая плоскость f_2 , в которой расположено изображение приёмника диаметром D . Указанные параметры связаны соотношениями

$$f^{-1} = f_1^{-1} + f_2^{-1}; \quad d/f_1 = D/f_2.$$

Поле зрения пирометра в диапазоне $0 < x < f_2$ ограничено отрезками MM_1, NN_1 , а в диапазоне $x > f_2$ – лучами NM_1, MN_1 . Диаметры $D_{1,2}^{n,3}$ поля зрения пирометра в диапазонах $0 < x < f_2$ и $x > f_2$ соответственно определяются соотношениями

$$D_1^{n,3} = (L - D)(f_2 - x)/f_2 + D;$$

$$D_2^{n,3} = D(x - a)/(f_2 - a),$$

где $a = f_2 L / (D + L)$.

Расчёт диаграммы поля зрения пирометра. На рис. 3 схематически показано желательное расположение конусов диаграммы поля зрения внутри измерительной полости. Чтобы исключить влияние на результат измерений стенок полости, температура которых заметно отличается от температуры её дна, образующие конусы не должны

касаться стенок полости. Для этого диаметры D_1, D_2 сечений диаграммы поля зрения в плоскостях M_1N_1 и M_2N_2 должны быть меньше внутреннего диаметра полости, равного 8 мм. Выберем $D_1 = D_2 = 6$ мм, такой запас необходим с учётом идеализированности рассматриваемой модели диаграммы поля зрения, в реальности конусы диаграммы поля зрения на 10–20 % объёмнее, чем в идеализированной модели.

У пирометра «Термоконт-ТВЗС2» фокусное расстояние $f = 110$ мм, оно определяется объективом Индустар-23У (ОАО «ЛЗОС», Россия). Зададим диаметр полевой диафрагмы $d = 0,3$ мм. Обозначим x_1, x_2 – расстояние от главной плоскости объектива до плоскостей M_1N_1 и M_2N_2 соответственно. Зададим $x_1 = 0,4$ м, $x_2 = 1$ м. Требуется найти такие значения f_1, L , при которых $D_1 = D_2 = 6$ мм.

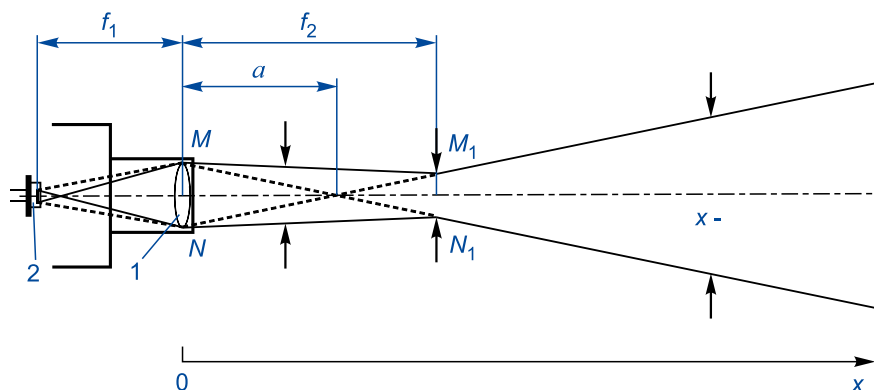


Рис. 2. Поле зрения линзового пирометра: 1 – объектив пирометра; 2 – приёмник излучения

Fig. 2. Field of view of a lens pyrometer: 1 – pyrometer objective lens; 2 – radiation detector

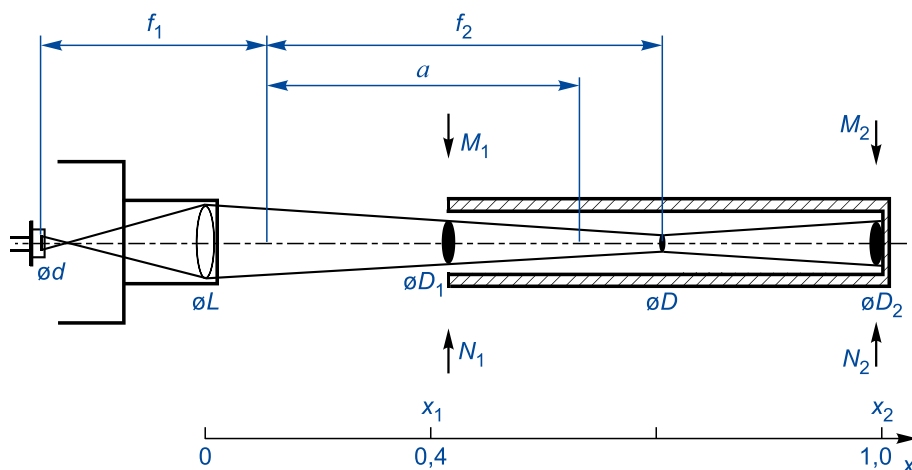


Рис. 3. Расположение конусов диаграммы поля зрения объектива пирометра внутри измерительной полости установки для калибровки термопар

Fig. 3. Arrangement of the cones of the diagram of the field of view of the pyrometer lens inside the measurement cavity of the installation for calibrating thermocouples

Для расчёта характеристик диаграммы поля зрения запишем систему из пяти уравнений:

$$f_1 = f_2 f / (f_2 - f); \quad (1)$$

$$D = df_2 / f_1; \quad (2)$$

$$L = (D_1 - Dx_1 / f_2) / (1 - x_1 / f_2); \quad (3)$$

$$a = f_2 L / (D + L); \quad (4)$$

$$f_2 = D(x_2 - a) / D_2 + a. \quad (5)$$

Здесь f_1 , D , L , a , f_2 – неизвестные, подлежащие определению. Поскольку их также пять, то система уравнений (1)–(5) имеет решение. Стандартное решение системы сводится к последовательному выражению одного из неизвестных через другое с исключением используемых для этого уравнений, и процедура повторяется до тех пор, пока не останется одно уравнение с одной неизвестной величиной. Однако в данном случае получаемое финальное уравнение оказывается чрезвычайно громоздким, крайне неудобным

для практических вычислений. Поэтому было решено использовать вариационный метод решения с применением для текущих вычислений электронных таблиц.

Практически варьируемым параметром удобнее взять f_1 , так как для пирометра «Термоконт-ТВ3С2» известно расстояние от главной плоскости объектива до приёмника, и это расстояние может быть использовано как начальное при расчёте. Зададим значение f_1 , затем из уравнения (1) найдём f_2 и из уравнений (2)–(4) – параметры D , L , a . Затем подставим указанные величины в (5) и найдём диаметр D_2 , соответствующий этой комбинации параметров. Варьируем значение f_1 до тех пор, пока в результате вычислений не получим $D_2 = 6$ мм.

В результате расчёта получены следующие значения параметров требуемой диаграммы поля зрения: $f_1 = 128,9689$ мм; $f_2 = 747,8879$ мм; $D = 1,739694$ мм; $L = 10,89848$ мм; $a = 644,9382$ мм; $D_2 = 6,000008$ мм. Искомый диаметр D_2 нецелочисленный, однако для идеализированной модели полученный результат вполне приемлем.

Доработка пирометра. Объектив Индустар-23У серийного пирометра «Термоконт-ТВ3С2» имеет встроенную регулируемую диафрагму. При установке диафрагменного кольца в положение между значениями 5,6 и 8 диаметр отверстия диафрагмы примерно равен 11 мм. Устанавливаем его.

Расстояние f_1 пирометра «Термоконт-ТВ3С2» составляет 120,4 мм, согласно расчёту оно должно быть 129 мм, т. е. f_1 необходимо увеличить на 8,6 мм. С этой целью между тубусом объектива и держателем приёмника вставлено специально изготовленное удлинительное кольцо высотой 8,6 мм (рис. 4). Проведённая доработка пирометра обеспечивает соответствие поля зрения пирометра диаграмме, показанной на рис. 3.

Экспериментальное исследование диаграммы поля зрения пирометра. Для экспериментального исследования диаграммы поля зрения, полученной в результате вышеописанной доработки, был создан стенд, схема которого приведена на рис. 5. Пирометр 1 расположен на расстоянии 120 мм от выходного отверстия излучателя 2 (АЧТ), диаметр выходного отверстия 28 мм. Пирометр и АЧТ закреплены на оптической скамье 4, по которой может перемещаться рейтер (держатель) с ирисовой диафрагмой 3. Держатель диафрагмы допускает плавное перемещение вправо-влево и вверх-вниз.

Установим диафрагму последовательно на расстояниях $x = 0,10; 0,25; 0,40; 0,65; 1,00$ м от среза объектива пирометра

Расчётные и экспериментальные значения сечений диаграммы поля зрения

x , м	$D_p^{п.3}$, мм	$D_э^{п.3}$, мм
0,10	11,0	10,9±0,5
0,25	8,2	8,2±0,5
0,40	5,2	5,4±0,4
0,65	2,2	2,7±0,2
1,00	6,0	7,6±0,5

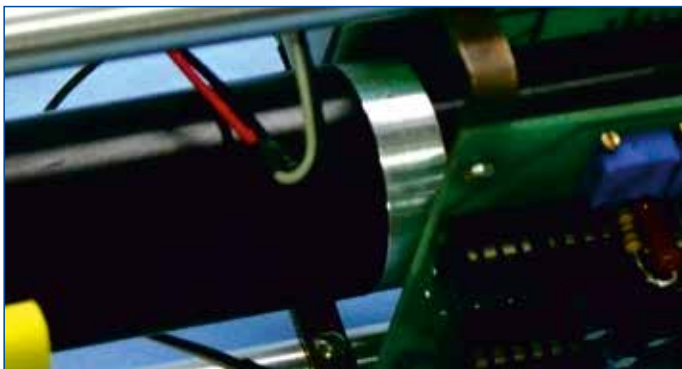


Рис. 4. Удлинительное кольцо для увеличения расстояния f_1

Fig. 4. Extension ring to increase distance f_1

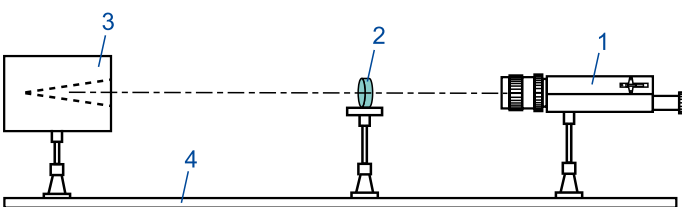


Рис. 5. Стенд для экспериментального исследования диаграммы поля зрения пирометра:

1 – исследуемый пирометр; 2 – излучатель – абсолютно чёрное тело; 3 – ирисовая диафрагма; 4 – оптическая скамья

Fig. 5. Test bench for experimental study of the diagram of the pyrometer field of view:

1 – investigated pyrometer; 2 – emitter – an absolutely black body; 3 – iris diaphragm; 4 – optical bench

и при каждом расстоянии найдём минимальный диаметр отверстия ирисовой диафрагмы, при котором показания пирометра уменьшаются на значение не более основной погрешности пирометра по сравнению с показаниями при полностью открытой диафрагме. При этом в каждом случае положение диафрагмы должно быть таким, чтобы её центр находился на оптической оси пирометра (по максимуму измеряемого сигнала). При каждом расстоянии выполним по пять измерений с вычислением среднего значения и случайной погрешности измерений.

Расчётные $D_p^{п.3}$ и экспериментальные $D_э^{п.3}$ сечения диаграммы поля зрения объектива пирометра при различных расстояниях x приведены в таблице.

Заключение. Проведённая доработка оптической системы пирометра обеспечила соответствие поля зрения объектива пирометра расчётной диаграмме. Получены близкие расчётные и экспериментальные сечения диаграммы поля зрения объектива пирометра при различных расстояниях от среза объектива пирометра в пределах 0,1–0,4 м. На расстояниях 0,65 и 1 м экспериментально измеренный диаметр диаграммы поля зрения больше расчётного примерно на 25 %, что не может быть объяснено погрешностью измерений. Причина заключается в описанном в работе [11] уширении диаграммы поля зрения в области сопряжения конусов (см. рис. 3) по сравнению с расчётом по простой геометрической модели.

Список литературы

1. Битюков В. К., Неведов В. И., Симачков Д. С. Бесконтактный метод измерения температуры поверхности объекта // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 2. С. 5–17. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-2-5-17>
2. Ионов А. Б. Метрологические проблемы пирометрии: анализ и перспективы преодоления // Измерительная техника. 2013. № 6. С. 42–45.
3. Магунов А. Н. Спектральная пирометрия (Обзор) // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 4. С. 5–28.
4. Магунов А. Н. Спектральная пирометрия объектов с неоднородной температурой // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. Вып. 7. С. 78–82.
5. Русин С. П. Определение температуры непрозрачного материала по спектральному распределению интенсивности собственного излучения при неизвестной излучательной способности // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56. № 2. С. 203–210.
6. Левин Е. В., Окунев А. Ю. Исследование точности измерения температуры на основе анализа энергетического баланса на приемнике излучения ИК-прибора // Измерительная техника. 2015. № 5. С. 48–52.
7. Улановский А. А., Малецкий Р. Р., Хлевной Б. Б., Отрыаскин Д. А. Установка для калибровки высокотемпературных термпар // Приборы. 2019. № 6. С. 7–14.
8. Латыев Л. Н., Петров В. А., Чеховской В. Я., Шестаков Е. Н. Излучательные свойства твёрдых материалов. Справочник / Под ред. А. Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974. 472 с.
9. Хадсон Р. Инфракрасные системы: Пер. с англ. Я. Б. Герчикова, Ю. Е. Голубчика, С. Г. Кина. М.: Мир, 1972. 536 с.
10. Гаррисон Т. Р. Радиационная пирометрия: Пер. с англ. М.: Мир, 1964. 249 с.
11. Фрунзе А. В. О методической погрешности энергетических пирометров, обусловленной влиянием на результат измерения расстояния между пирометром и объектом // Измерительная техника. 2012. № 11. С. 41–52.

References

1. Bityukov V. K., Nefedov V. I., Simachkov D. S., *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal*, 2019, vol. 7 (2), pp. 5–17 (in Russian). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-2-5-17>
2. Ionov A. B., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 658–663. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0262-6>
3. Magunov A. N., *Pribory i tekhnika eksperimenta*, 2009, no. 4, pp. 5–28 (in Russian).
4. Magunov A. N., *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 55, no. 7, pp. 991–995.
5. Rusin S. P., *High Temperature*, 2018, vol. 56, no. 2, pp. 193–200.
6. Levin E. V., Okunev A. Y., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, no. 5, pp. 544–549. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0751-x>
7. Ulanovsky A. A., Maletsky R. R., Khlevnoi B. B., Otryaskin D. A., *Pribory*, 2019, no. 6, pp. 7–14 (in Russian).
8. Latyev L. N., Petrov V. A., Chekhovskoi V. Ya., Shestakov E. N., *Radiation properties of solids. Handbook*, ed. A. Ye. Sheindlin, Moscow, Energia Publ., 1974. 472 p. (in Russian).
9. Khadson R., *Infrared systems*, Wiley, 2006, 642 p.
10. Harrison T. R., *Radiation pyrometry*, New York, London, Wiley & Sons, 1960, 234 p.
11. Frunze A. V., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 55, no. 10, pp. 1172–1177. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-0104-y>

Статья поступила в редакцию 26.08.2020;
принята к публикации 02.09.2020.