



УДК 536.52

DOI 10.17073/0368-0797-2023-2-229-235



Оригинальная статья  
Original article

## ПОГРЕШНОСТИ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

А. А. Ким , М. И. Подглазова, К. С. Шатохин

Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

 kim.aleksa26@mail.ru

**Аннотация.** В последнее время наблюдается тенденция улучшения характеристик и действенности всех существующих средств измерения за счет скачка развития технологий. Практически в каждой отрасли промышленности применяются разнообразные технологии, использующие контроль температуры. Температуру нагретого тела можно оценить путем измерения параметров его теплового излучения, которое представляет собой электромагнитные волны различной длины. Замер температуры необходим для комфортного автоматического контроля и управления процессами производства. Использование бесконтактных средств дает возможность осуществлять измерение температуры, во-первых, перемещающихся предметов, во-вторых, предметов, находящихся в малодоступных местах, в-третьих, избежать повреждения измерительных приборов при контроле больших температур. Высокое быстродействие, вероятность измерения температуры без отключения объекта от технологического процесса, обеспечение безопасности персонала, замер температуры до 3000 °С – это достоинства бесконтактного способа измерения температуры. Для получения достоверных значений при определении теплофизических величин необходимо знание процессов, происходящих при взаимодействии измерительного прибора или датчика с объектом измерения. Эти процессы оказывают влияние на величину погрешности замера, т. е. на величину отклонения результата от истинного значения измеряемой величины. В настоящей работе описаны погрешности бесконтактного измерения температуры с помощью пирометров, таких как пирометр суммарного излучения, пирометр частичного излучения, пирометр спектрального отношения, а также показаны результаты сравнительных расчетов между ними. Приведены выражения для оценки методических погрешностей пирометров суммарного излучения, частичного излучения и спектрального отношения, а также показаны результаты сравнительных расчетов погрешностей.

**Ключевые слова:** пирометр суммарного излучения, пирометр частичного излучения, пирометр спектрального отношения, пирометр, бесконтактное измерение температуры, абсолютно черное тело, методическая погрешность

**Для цитирования:** Ким А.А., Подглазова М.И., Шатохин К.С. Погрешности бесконтактного измерения температуры. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2023;66(2):229–235. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-2-229-235>

## ERRORS OF NON-CONTACT TEMPERATURE MEASUREMENT

A. A. Kim , M. I. Podglazova, K. S. Shatokhin

National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

 kim.aleksa26@mail.ru

**Abstract.** In recent years, there is a trend of improving the performance and efficiency of all existing measuring instruments due to a leap in technology. Almost every industry uses a variety of technologies that apply temperature control. Temperature of a heated body can be estimated by measuring the parameters of its thermal radiation, which are electromagnetic waves of different lengths. Temperature measurement is necessary for comfortable automatic control and management of production processes. The use of non-contact means makes it possible to measure the temperature of, firstly, moving objects, secondly, objects in inaccessible places, thirdly, to avoid damage to the measuring instruments when controlling large temperatures. High speed, the possibility of measuring temperature without disconnecting the object from the technological process, ensuring personnel safety, temperature measurement up to 3000 °С – these are the advantages of non-contact temperature measurement method. To obtain reliable values when measuring thermophysical quantities it is necessary to know the processes occurring in interaction of the measuring device or sensor with the object of measurement. These processes affect the magnitude of the measurement error, that is, magnitude of the result deviation from the true value of the measured parameter. This paper describes the errors of non-contact temperature measurement of pyrometers, namely total radiation pyrometer, partial radiation pyrometer, spectral ratio pyrometer, as well as shows the results of comparative calculations between them. Expressions for the evaluation of methodical errors of total radiation, partial radiation and spectral ratio pyrometers are given, as well as the results of comparative calculations of errors are shown.

**Keywords:** total radiation pyrometer, partial radiation pyrometer, spectral ratio pyrometer, pyrometer, non-contact temperature measurement, totally black body, methodical error

**For citation:** Kim A.A., Podglazova M.I., Shatokhin K.S. Errors of non-contact temperature measurement. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2023;66(2):229–235. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2023-2-229-235>

Бесконтактное измерение температуры считается преимущественным способом для мелких, движущихся или недоступных объектов, динамических процессов<sup>1</sup>, требующих быстрого реагирования, и температур более 1000 °С. С целью подбора оптимального бесконтактного устройства измерения температуры для определенного использования следует осознавать основные принципы методологии измерения температуры, а также характерные черты разных концепций измерения, существующих в настоящее время<sup>2,3</sup>.

Пирометры – это средства измерения температуры, регистрирующие тепловое излучение [1; 2]<sup>4</sup>. На основании законов излучения разработаны пирометры следующих типов:

- пирометр суммарного излучения (ПСИ) – измеряет полную энергию излучения (удобен для автоматической записи температуры во времени или для контроля поддержания постоянства температуры источника излучения [3]<sup>5</sup>);

- пирометр частичного излучения (ПЧИ) – измеряет энергию в ограниченном фильтром (или приемником) участке спектра;

- пирометр спектрального отношения (ПСО) – измеряет отношение энергии фиксированных участков спектра [4]<sup>6,7</sup>.

В таблице приведены характеристики пирометров [5]<sup>8,9</sup>.

<sup>1</sup> Noncontact temperature measurement theory and application. *OMEGA Engineering*. URL: <https://www.omega.co.uk/temperature/z/noncontacttm.html> (Дата обращения: 01.03.2023).

<sup>2</sup> HEITRONICS infrared pyrometers and thermometers. *Wintronics*. URL: <https://www.wintron.com/Infrared/Guide-to-Infrared-Thermometers> (Дата обращения 01.03.2023).

<sup>3</sup> Non contact temperature measurement. *TempSens*. URL: <https://tempsens.com/blog/non-contact-temperature-measurement> (Дата обращения 01.03.2023).

<sup>4</sup> Пирометр. *Интернет – энциклопедия «Wikipedia»*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Pyrometer> (Дата обращения 01.03.2023).

<sup>5</sup> Пирометр. *Журналы и книги «ScienceDirect»*. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/pyrometer> (Дата обращения 01.03.2023).

<sup>6</sup> What is pyrometer: Working principle and its types. *ElProCus, an educational website on electronic projects for ECE and EEE students*. URL: <https://www.elprocus.com/what-is-pyrometer-working-principle-and-its-types/> (Дата обращения 01.03.2023).

<sup>7</sup> What is radiation pyrometer? *Electrical Deck, platform for learning all about electrical and electronics engineering*. URL: <https://www.electricaldeck.com/2021/07/what-is-radiation-pyrometer-infrared-and-total-radiation-pyrometer.html> (Дата обращения 01.03.2023).

<sup>8</sup> Пирометры. *Общие технические требования*. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data/61/6104.pdf> (Дата обращения 01.03.2023).

<sup>9</sup> Пирометры – Характеристики. *Энциклопедия по машиностроению XXL*. URL: <https://mash-xxl.info/info/56776/> (Дата обращения 01.03.2023).

Пирометры градуируются по абсолютно черному телу (АЧТ). При применении их в реальных условиях различаются значения действительной температуры объекта измерения и условной температуры, получаемой пирометром [6; 7]. Для перехода от одних значений температуры к другим вводятся поправки в показания пирометров [8]. Пирометры суммарного излучения измеряют радиационную температуру реального тела  $T_p$  – температуру АЧТ, при которой оно излучает во всем интервале длин волн столько же энергии, сколько и реальное тело при действительной температуре  $T_d$ . Пирометры частичного излучения измеряют яркостную температуру реального тела  $T_y$  – температуру АЧТ, которое на определенной длине волны (или в узком интервале спектра) излучает столько же энергии, сколько и реальное тело при  $T_d$ . Пирометры спектрального отношения измеряют цветовую температуру реального тела  $T_{\Pi}$  – температуру АЧТ, при которой отношение плотностей потоков спектрального излучения АЧТ при длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  такое же, как и у реального тела при  $T_d$ . Связь между  $T_p$  и  $T_d$  находят из закона Стефана–Больцмана, а связь между  $T_y$  и  $T_d$ ,  $T_y$  и  $T_{\Pi}$  находят из закона Планка [9; 10].

Методическая погрешность измерения температуры пирометром зависит от степени черноты объекта  $\epsilon$ . Величина этого параметра определяется химическим составом источника излучения, температурой и состоянием его поверхности. На значение степени черноты металлической поверхности воздействует уровень ее окисленности: у окисленной поверхности эта величина больше, чем у не окисленной. Необходимо, кроме того, отметить, что у шероховатых поверхностей наблюдается большее значение величины  $\epsilon$  по сравнению с гладкими. Данный параметр экспериментально находится с определенной степенью точности [11]<sup>10, 11, 12</sup>.

Погрешность пирометров, вызванная ошибкой определения (задания) степени черноты, определяется по следующим формулам [12 – 14]:

$$\Delta T_{p_{\Delta\epsilon}} = -\frac{1}{4} T_d \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon}; \quad (1)$$

$$\Delta T_{y_{\Delta\epsilon}} = \frac{\Delta\epsilon_{\lambda}}{\epsilon_{\lambda}} \frac{\lambda T_d^2}{c_2}; \quad (2)$$

<sup>10</sup> Blackbody Radiation. URL: <http://www.physics.rutgers.edu/~gersh/351/Lecture%2026.pdf> (Дата обращения 01.03.2023).

<sup>11</sup> Calibration of Pyrometers using Black Body. *Inst Tools*. URL: <https://instrumentationtools.com/calibration-of-pyrometers-using-black-body/> (Дата обращения 07.11.2022).

<sup>12</sup> Blackbody Radiation. URL: <https://ps.uci.edu/~cyu/p224/LectureNotes/lecture4/lecture4.pdf> (Дата обращения 01.03.2023).

Характеристики пирометров

Characteristics of pyrometers

Наименование	Наименование показателя, размерность	Значение показателя
ПСИ	Диапазон измерения температуры, °С	-50 ... +2500
	Предел допускаемой основной погрешности пирометра для измерения температуры:	
	до 400 °С, °С	±4,0; ±6,0; ±8,0
	свыше 400 °С, %	±0,5; ±1,0; ±1,5; ±2,0
	Предел допускаемой инструментальной погрешности пирометра для измерения температуры:	
	до 400 °С, °С	±2,0; ±3,0; ±4,0
	свыше 400 °С, %	±0,25; ±0,50; ±0,60; ±1,00
	Масса переносных пирометров, кг, не более	1,5
	Потребляемая мощность переносных пирометров, Вт, не более	1,5
	ПЧИ	Диапазон измерения температуры, °С
Предел допускаемой основной погрешности пирометра для измерения температуры:		
до 400 °С, °С		±4,0; ±6,0; ±8,0
свыше 400 °С, %		±0,5; ±1,0; ±1,5; ±2,0
Предел допускаемой инструментальной погрешности пирометра для измерения температуры:		
до 400 °С, °С		±2,0; ±3,0; ±4,0
свыше 400 °С, %		±0,25; ±0,50; ±0,60; ±1,00
Масса переносных пирометров, кг, не более		1,8
Потребляемая мощность переносных пирометров, Вт, не более		1,5
ПСО		Диапазон измерения температуры, °С
	Предел допускаемой основной погрешности пирометра для измерения температуры:	
	до 1000 °С, °С	±16,0; ±20,0
	свыше 1000 °С, до 2000 °С, %	±1,0; ±1,5
	свыше 2000 °С, %	±1,5; ±2,0
	Предел допускаемой инструментальной погрешности пирометра для измерения температуры:	
	до 1000 °С, °С	±8,0; ±10,0
	свыше 1000°С, до 2000 °С, %	±0,5; ±1,0
	свыше 2000 °С, %	±1,0; ±1,5
	Масса переносных пирометров, кг, не более	2,0
Потребляемая мощность переносных пирометров, Вт, не более	1,8	

$$\Delta T_{\text{Цдс}} = \left( \frac{\Delta \varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_1}} - \frac{\Delta \varepsilon_{\lambda_2}}{\varepsilon_{\lambda_2}} \right) \frac{T_d^2}{c_2} \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}. \quad (3)$$

С помощью программы MS Office Excel проанализируем зависимость погрешности измерения ПСИ при действительной температуре 1273 К от ошибки определения степени черноты объекта, выраженной зависимостью (1).

Исследование показывает, что погрешность радиационного пирометра меньше, когда степень черноты объекта больше (рис. 1). Пирометр суммарного излучения обладает наименьшей методической точностью.

Расчет по формуле (2) проведен при эффективной длине волны 0,92 и 1,55 мкм (рис. 2, 3).

Чем выше степень черноты объекта, тем меньше погрешность ПЧИ. При одинаковых радиационных характеристиках объекта ПЧИ, работающие на корот-

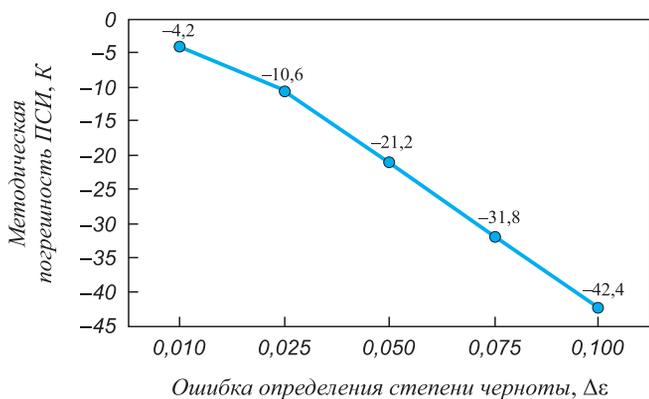


Рис. 1. Зависимость методической погрешности измерения ПСИ от ошибки определения степени черноты объекта

Fig. 1. Dependence of methodological error of PSI measurement on the error of determining blackness degree of the object

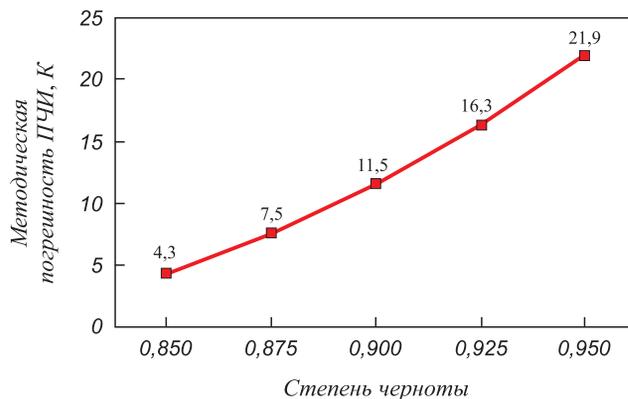


Рис. 2. Методическая погрешность ПЧИ в зависимости от степени черноты при длине волны 0,92 мкм

Fig. 2. Methodological error of PCI as a function of blackness degree at a wavelength of 0.92 μm

кой длине волны, имеют меньшую погрешность, чем работающие на более длинной.

Проанализируем зависимость (3) при действительной температуре 1000 К и спектральной степени черноты 0,36 и 0,39 для волн λ<sub>1</sub> и λ<sub>2</sub> соответственно (рис. 4).

Анализ зависимости демонстрирует, что при большей степени черноты объекта погрешность ПСО меньше. Даже небольшая ошибка в установлении степени спектральной черноты объекта приводит к значительным погрешностям измерения.

В некоторых случаях существенные методические погрешности пирометров возникают вследствие фонового излучения кладки. Подобные случаи свойственны для камер нагрева протяжных печей, методических и сварочных зон нагревательных печей, когда кладка значительно перегрета по отношению к металлу и в пирометр поступает отраженное излучение, более мощное, чем собственное излучение металла.

Обозначим температуру металла T<sub>м</sub>, степень черноты металла ε, а температуру кладки T<sub>кл</sub> и рассмотрим

выражение для радиационной температуры при наличии фонового излучения

$$\Delta T_p = T_m \sqrt[4]{\varepsilon + (1 - \varepsilon) \frac{T_{кл}^4}{T_m^4}} \quad (4)$$

Результат расчета по этой формуле изображен на рис. 5: с увеличением температуры кладки возрастает методическая погрешность ПСИ.

Методическая погрешность ПЧИ в зависимости от фонового излучения рассчитывается по формуле [15; 16]

$$\frac{1}{T_я} = \frac{1}{T_m} - \frac{\lambda}{c_2} \ln \left\{ \varepsilon_\lambda + (1 - \varepsilon_\lambda) \exp \left[ -\frac{c_2}{\lambda} \left( \frac{1}{T_{кл}} - \frac{1}{T_m} \right) \right] \right\} \quad (5)$$

Результат расчета при эффективной длине волны 0,92 мкм показан на рис. 6: методическая погрешность также увеличивается с ростом температуры кладки.

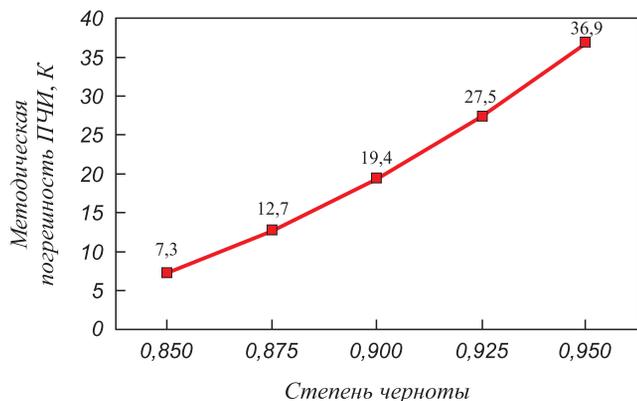


Рис. 3. Методическая погрешность ПЧИ в зависимости от степени черноты при длине волны 1,55 мкм

Fig. 3. Methodological error of PCI as a function of blackness degree at a wavelength of 1.55 μm

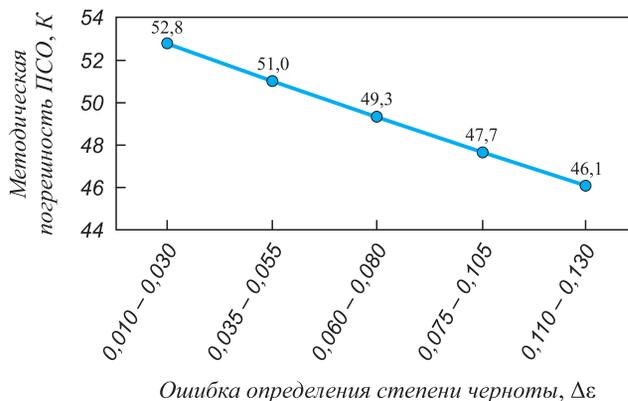


Рис. 4. Зависимость методической погрешности измерения ПСО от спектральной степени черноты объекта

Fig. 4. Dependence of methodological error of SOA measurement on spectral blackness degree of the object

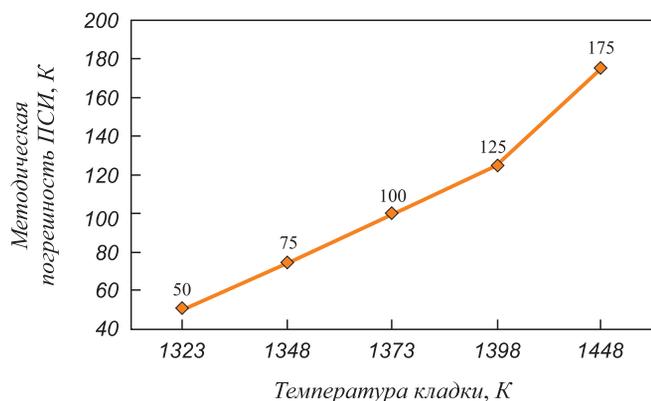


Рис. 5. Зависимость методической погрешности измерения ПСИ от фонового излучения

Fig. 5. Dependence of methodological error of PSI measurement on background radiation

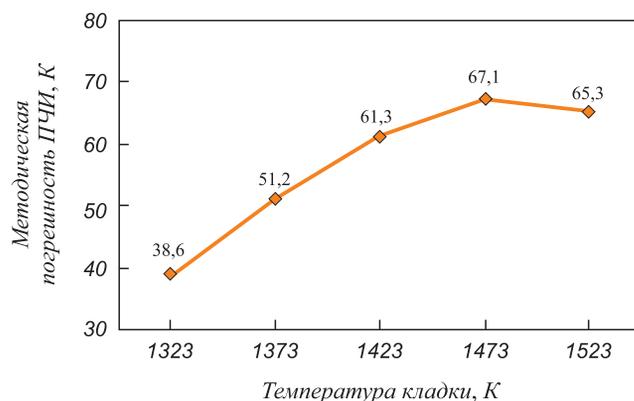


Рис. 6. Методическая погрешность ПЧИ в зависимости от фонового излучения при длине волны 0,92 мкм

Fig. 6. Methodological error of PCI as a function of background radiation at a wavelength of 0.92 μm

Методическая погрешность ПСО в зависимости от фонового излучения находится из формулы

$$\frac{1}{T_{\text{Ц}}} = \frac{1}{T_{\text{М}}} + \frac{2\lambda_1}{(\lambda_1 - \lambda_2)c_2} \times \ln \left\{ \frac{\varepsilon_{\lambda_1} + (1 - \varepsilon_{\lambda_1}) \exp \left[ -\frac{c_2}{\lambda_1} \left( \frac{1}{T_{\text{кл}}} - \frac{1}{T_{\text{М}}} \right) \right]}{\varepsilon_{\lambda_2} + (1 - \varepsilon_{\lambda_2}) \exp \left[ -\frac{c_2}{\lambda_2} \left( \frac{1}{T_{\text{кл}}} - \frac{1}{T_{\text{М}}} \right) \right]} \right\}. \quad (6)$$

Графически эта зависимость представлена на рис. 7 для ПСО с эффективными длинами волн 0,65 и 0,45 мкм при  $T_{\text{М}} = 1000$  К. Методическая погрешность достигает существенных значений при высокой температуре кладки.

Выполненные расчеты позволяют выбрать надлежащий тип пирометра, спектральный диапазон его измерения (для ПЧИ и ПСО), оценить величину возможных

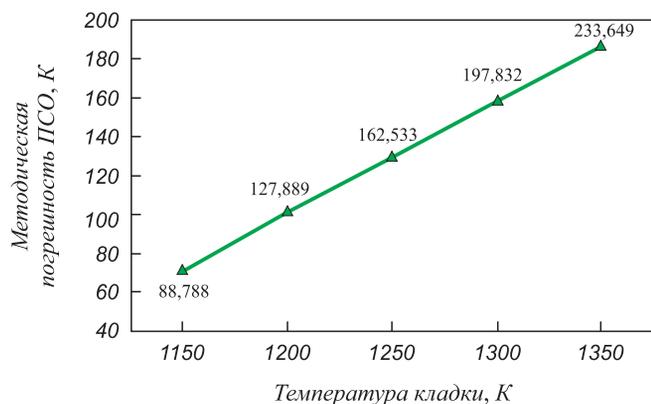


Рис. 7. Зависимость методической погрешности измерения ПСО от фонового излучения

Fig. 7. Dependence of methodological error of SOA measurement on background radiation

погрешностей в зависимости от вида применяемого пирометра, а также принять решение о целесообразности использования ряда мер, направленных на уменьшение влияния фонового излучения (экранирование постороннего источника, чернение контролируемого объекта и др.).

Так, уменьшить влияние фонового излучения кладки и промежуточной среды можно путем визирования радиационного пирометра через водоохлаждаемую фурму, расположенную в печи над металлом, и подачи в нее лучепрозрачного газа (воздуха или азота). Однако использование таких фурм требует больших эксплуатационных затрат и оказывает значительное охлаждающее воздействие на тепловое состояние зоны. Поэтому оно не получило широкого распространения.

Знание методической погрешности, которая возникает при бесконтактном измерении температуры, даже если не представляется возможности уменьшить ее, позволяет учесть эту погрешность как систематическую, т. е. адекватно оценить действительную температуру объекта излучения.

## Выводы

С помощью законов Планка и Стефана–Больцмана можно проследить связь между действительной температурой объекта и условной температурой пирометров, которая позволяет рассчитать их инструментальную погрешность.

Проведенные расчеты показывают, что разность между действительной температурой объекта и результатами измерения пирометра возрастает с повышением температуры. Для малых значений степени черноты она может достигать нескольких десятков градусов, что оказывает существенное влияние на измерение температуры.

При выборе того или иного пирометра надо ориентироваться на специфические особенности прибора и окружающей среды, которые сделают его использова-

ние оптимальным для каждой конкретной задачи и сведут погрешности измерения к минимуму.

Знание величины методической погрешности, даже если не представляется возможным полностью исключить или уменьшить ее, позволит учесть данную погрешность в виде систематической ошибки и получить оценку действительной температуры объекта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Софья Усупова. Цели и задачи автоматизации производственного процесса. Понятие об автоматическом контроле, регулировании и управлении. *Интернет-издание «Pandia.ru»*. URL: <https://pandia.ru/text/80/623/36735-9.php> (Дата обращения 01.03.2023)  
Usupova S. Goals and objectives of production process automation. The concept of automatic control, regulation and management. *Pandia.ru, Online edition*. Available at URL: <https://pandia.ru/text/80/623/36735-9> (Accessed 01.03.2023). (In Russ.).
2. Дивин А.Г., Пономарев С.В. *Управление качеством*. Тамбов: ТГТУ; 2013:116.  
Divin A.G., Ponomarev S.V. *Quality Control*. Tambov: TSTU; 2013:116. (In Russ.).
3. Шейндлин А.Е. *Излучательные свойства твердых материалов*. Москва: Энергия; 1974:471.  
Sheindlin A.E. *Radiative Properties of Solid Materials*. Moscow: Energiya; 1974:471. (In Russ.).
4. Chrzanowski K. *Non-Contact Thermometry. Measurement Errors*. Warsaw: SPIE Polish Chapter; 2001.
5. Гарелина С.А., Латышенко К.П., Фрунзе А.В. Сравнительный анализ энергетических пирометров и пирометров спектрального отношения. *Научная электронная библиотека «Cyberleninka»*. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-energeticheskikh-pirometrov-i-pirometrov-spektralnogo-otnosheniya/viewer> (Дата обращения 01.03.2023)  
Garelina S.A., Latyshenko K.P., Frunze A.V. Comparative analysis of energy pyrometers and spectral ratio pyrometers. *Cyberleninka, Scientific Electronic Library*. Available at URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnyy-analiz-energeticheskikh-pirometrov-i-pirometrov-spektralnogo-otnosheniya/viewer> (Accessed 01.03.2023). (In Russ.).
6. Прохоров А.М. *Физика. Большой энциклопедический словарь*. Москва: Большая Российская энциклопедия; 1998: 538.  
Prokhorov A.M. *Physics. Large Encyclopedic Dictionary*. Moscow: Bol'shaya Rossiiskaya entsiklopediya; 1998:538. (In Russ.).
7. Battuello M., Ricolfi T. The effect of temperature gradients in blackbody cavities to be used for comparing radiation pyrometers. *Measurement*. 1987;5(4):189–191.  
[https://doi.org/10.1016/0263-2241\(87\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0263-2241(87)90041-8)
8. Беленький А.М., Бурсин А.Н., Курносое В.В., Чибизова С.И., Шатохин К.С. *Метрология и теплотехнические измерения*. Москва: ИД МИСиС; 2019:396.  
Belen'kii A.M., Bursin A.N., Kurnosov V.V., Chibizova S.I., Shatokhin K.S. *Metrology and Thermal Measurements*. Moscow: ID MISiS, 2019:396. (In Russ.).
9. Соев С.С. Формула Планка. *Справочник от Автор 24*. URL: [https://spravochnik.ru/fizika/termodinamika/formula\\_planka/](https://spravochnik.ru/fizika/termodinamika/formula_planka/) (Дата обращения 01.03.2023)  
Soev S.S. Planck's formula. *Reference Book Author 24*. Available at URL: [https://spravochnik.ru/fizika/termodinamika/formula\\_planka/](https://spravochnik.ru/fizika/termodinamika/formula_planka/) (Accessed 01.03.2023). (In Russ.).
10. Sreeja Loho Choudhury, Paul R.K. A new approach to the generalization of Planck's law of black-body radiation. *Annals of Physics*. 2018;395:317–325.  
<https://doi.org/10.1016/j.aop.2018.06.004>
11. Kostkowski H.J., Lee R.D. Theory and methods of optical pyrometry. *National Bureau of Standards Monograph*; 1962.
12. Беленький А.М. *Измерение температуры: теория, практика, эксперимент: Справочное издание в 3-х томах. Т. 2. Измерение температуры в промышленности и энергетике*. Москва: Теплотехник; 2007:736.  
Belen'kii A.M. *Temperature Measurement: Theory, Practice, Experiment: Reference Edition in 3 Vols. Vol. 2. Temperature Measurement in Industry and Energy*. Moscow: Teplotekhnika; 2007:736. (In Russ.).
13. Фрунзе А.В. Влияние методических погрешностей пирометра на выбор прибора. *Фотоника*. 2012;(4):46–51.  
Frunze A.V. Influence of methodological errors of pyrometer on choice of device. *Fotonika*. 2012;(4):46–51. (In Russ.).
14. Dong Lia, Chi Feng, Shan Gao, Ketui Daniel, Liwei Chen. Effect of pyrometer type and wavelength selection on temperature measurement errors for turbine blades. *Infrared Physics & Technology*. 2018;94:255–262.  
<https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.09.004>
15. Бердышев В.Ф., Найденов Р.Э., Шатохин К.С., Герасименко С.А. *Методы теплотехнических исследований*. Москва: МИСИС; 2001:106.  
Berdyshev V.F., Naidenov R.E., Shatokhin K.S., Gerasimenko S.A. *Methods of Thermal Engineering Research*. Moscow: MISiS; 2001:106. (In Russ.).
16. Беленький А.М., Бердышев В.Ф., Герасименко С.А., Найденов Р.Э., Семянников С.В., Шатохин К.С. *Метрология, стандартизация и технические измерения: Лабораторный практикум*. Москва: МИСиС; 2001:89.  
Belen'kii A.M., Berdyshev V.F., Gerasimenko S.A., Naidenov R.E., Semyannikov S.V., Shatokhin K.S. *Metrology, Standardization and Technical Measurements: Laboratory Course*. Moscow: MISiS; 2001:89. (In Russ.).

## Сведения об авторах

## Information about the Authors

**Александра Алексеевна Ким**, аспирант кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

**E-mail:** kim.aleksa26@mail.ru

**Aleksandra A. Kim**, Postgraduate of the Chair "Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies", National University of Science and Technology "MISIS"

**E-mail:** kim.aleksa26@mail.ru

**Маргарита Игоревна Подглазова**, магистр кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

**E-mail:** m.podglazova@mail.ru

**Константин Станиславович Шатохин**, к.т.н., доцент кафедры энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

**E-mail:** shatokhin\_ks@mail.ru

**Margarita I. Podglazova**, Master Student of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

**E-mail:** m.podglazova@mail.ru

**Konstantin S. Shatokhin**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”, National University of Science and Technology “MISIS”

**E-mail:** shatokhin\_ks@mail.ru

## Вклад авторов

## Contribution of the Authors

**А. А. Ким** – сбор и обработка материала, получение данных, написание текста, редактирование.

**М. И. Подглазова** – статистическая обработка, интерпретация данных.

**К. С. Шатохин** – концепция и дизайн исследования, редактирование и утверждение.

**A. A. Kim** – collecting and processing data, obtaining data, writing and editing the text.

**M. I. Podglazova** – statistical processing, data interpretation.

**K. S. Shatokhin** – research concept and design, approval and editing the text.

Поступила в редакцию 27.12.2022

После доработки 19.01.2023

Принята к публикации 28.02.2023

Received 27.12.2022

Revised 19.01.2023

Accepted 28.02.2023