

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ПИРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В статье представлен анализ неопределенностей, связанных с трудностями достоверного учета коэффициента излучения при бесконтактном измерении температуры в производственных условиях. Предлагаются практические рекомендации методического и инструментального характера по уменьшению погрешностей таких измерений. На основе функции Планка и математической модели коэффициента отражения алюминия получена аналитическая зависимость коэффициента излучения алюминия от температуры и длины волны. Произведены расчетные оценки методических погрешностей низкотемпературных пирометров со спектральными диапазонами чувствительности 7–14 мкм и 3–5,5 мкм. Экспериментальные исследования проведены с использованием пирометра Optiris CT LT15 и тепловизора Flir E60.

Ключевые слова: пирометр, коэффициент излучения, методическая погрешность, инструментальная погрешность, калибратор, спектральное отношение.

Введение. Пирометры, присутствующие на рынке, позволяют проводить бесконтактные измерения температуры в широком диапазоне с инструментальными погрешностями менее 0,5 %. Однако заявленная производителями погрешность может быть достигнута только в лабораторных условиях, т.к. в реальных производственных условиях результат измерений зависит не только от температуры контролируемой поверхности, но и от её излучающих свойств, пропускания промежуточной среды, наличия фонового излучения и переотражений, которые заранее неизвестны.

Априорно информация об этих неопределенностях в пирометрии учитывается в виде значений коэффициентов черноты, приведённых в справочной литературе, например, в [1–3]. Однако несоответствие значений этих коэффициентов в реальных условиях промышленных измерений справочным данным, изменение свойств излучающих поверхностей и окружающей среды в натуральных условиях в процессе измерений приводит к погрешностям, превышающим заявленные производителями пирометров инструментальные погрешности на порядок и более раз. В настоящее время проблема оценки и учёта коэффициента излучения в современной пирометрии является одной из основных [4]. Несмотря на появление новых методов [5] и аппаратуры [6] для определения излучательной способности материалов, погрешность таких измерений остается достаточно высокой [7].

Постановка задачи. Наибольшие проблемы в измерительной практике, связанные с учётом та-

ких неопределённости, возникают в следующих случаях:

1. При низкотемпературном тепловом контроле объектов с малым коэффициентом излучения, изменяющемся в температурном и спектральном диапазонах.

2. При измерениях в условиях наличия фонового излучения, сопоставимого с мощностью излучения от объекта контроля.

Учёт погрешностей этого типа не поддается аналитическим расчётам ввиду изменения физического состояния поверхностей контроля и параметров теплообмена во времени в процессе измерений.

Исходя из классической теории теплообмена излучением, необходимо производить расчеты радиационного теплового баланса между пирометром и объектом контроля в соответствии с функцией Планка и спектральными характеристиками источника и приемника излучения.

Теория. Из экспериментальных данных по радиационным характеристикам металлов известно, что металлы имеют малый коэффициент излучения, который увеличивается с ростом температуры металла [3, 8]. Физически на основе электронной теории и известных соотношений из электродинамики, в частности в соответствии с формулой Друде [8], это объясняется тем, что проводимость металлов увеличивается при нагреве, что сопровождается уменьшением коэффициента отражения электромагнитного излучения. При отсутствии поглощения спектральный коэффициент излучения рассчитывается как:

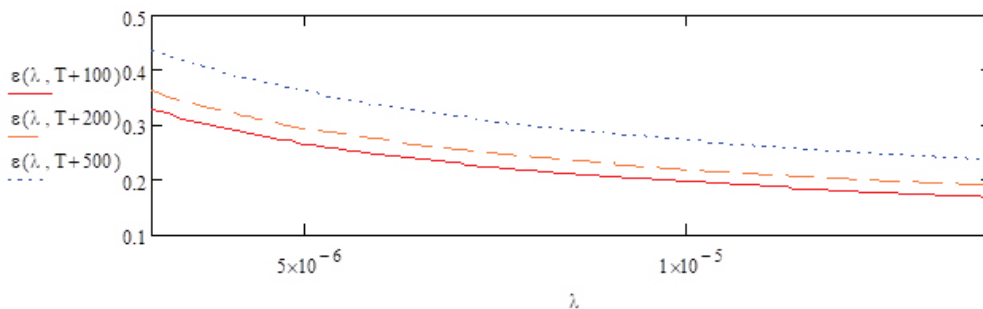


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициента излучения алюминия при температурах 100, 200 и 500 °С в диапазоне λ от 3 до 14 мкм

$$\varepsilon(\lambda) = 1 - R(\lambda), \quad (1)$$

где R — коэффициент отражения.

В ряде работ [9–11] представлены результаты исследований погрешностей при бесконтактных измерениях температуры при априорных заданных численных значений коэффициентов черноты. В работах [10, 11] приведены расчётные результаты, обусловленные такими погрешностями.

В [12] приведено уравнение зависимости спектрального коэффициента излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ справедливое для большинства металлов:

$$\begin{aligned} \varepsilon_\lambda(T) = & 0,365\sqrt{\rho[1 + \alpha(T - 293)](1/\lambda)} \\ & - 0,0667\rho[1 + \alpha(T - 293)(1/\lambda)] + \\ & + 0,006\sqrt{(\rho[1 + \alpha(T - 293)](1/\lambda))^3}, \end{aligned} \quad (2)$$

где ρ — удельное сопротивление металла, Ом·м; α — температурный коэффициент изменения удельного сопротивления металла; λ — длина волны электромагнитного излучения, м.

Нами [13] на основании графического решения уравнения (2) для алюминия при температурах поверхности 100, 200 и 500 °С получены функциональные зависимости спектральных коэффициентов излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ (рис. 1).

Из зависимостей, представленных на рис. 1, видно, что спектральный коэффициент излучения алюминия $\varepsilon(\lambda, T)$ зависит от температуры и длины волны излучающей поверхности. Например, при температуре 100 °С на длине волны 3 мкм он составил 0,33 и 0,175 — на длине волны 14 мкм, а при 500 °С соответственно 0,44 на длине волны 3 мкм и 0,24 на длине волны 14 мкм. В реальных условиях измерений зависимость $\varepsilon_A(\lambda, T)$ изменяется под влиянием технологических процессов обработки материала, шероховатости, окисления и загрязнения поверхности. Следовательно, использование в алгоритме работы пирометрического преобразователя решений уравнений (1) и (2) не является достаточным условием учета реального коэффициента излучения.

В свою очередь, интегральный коэффициент излучения, на основании выражения приведённого в [2], например, для температуры $T = 100$ °С, можно рассчитать как:

$$\varepsilon_A(273 + 100) = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varepsilon_A(\lambda, T) \cdot [r(\lambda, T) - r(\lambda, T_0)] d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [r(\lambda, T) - r(\lambda, T_0)] d\lambda}, \quad (3)$$

где $\varepsilon_A(\lambda, T)$ — спектральный коэффициент излучения алюминия; $\lambda_{\max} - \lambda_{\min} = \Delta\lambda$ — спектральный

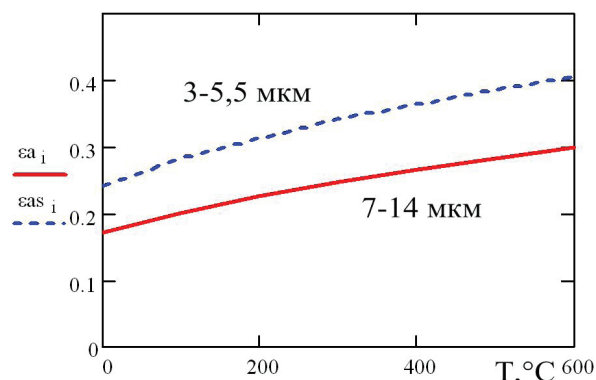


Рис. 2. Зависимости интегрального коэффициента излучения алюминия ε_A

диапазон чувствительности приемника излучения; $r(\lambda, T)$ — спектральная плотность яркости излучения — функция Планка; $r(\lambda, T_0)$ — спектральная плотность яркости излучения приемника.

Рассчитанные нами по формуле (3) зависимости интегрального коэффициента излучения алюминия $\varepsilon_A(\lambda, T)$ в диапазоне температур 0..600 °С для спектральных диапазонов $\Delta\lambda = 7 - 14$ мкм и $3 - 5,5$ мкм представлены на рис. 2.

В справочной литературе [2] для окисленного алюминия приведены значения интегрального коэффициента $\varepsilon_A = 0,2..0,25$ в диапазоне температур 150..500 °С, что с достаточной точностью соответствует полученным расчетным значениям, приведенным на рис. 2. Однако для пирометра со спектральным диапазоном $\Delta\lambda_s = 3 - 5,5$ мкм в том же диапазоне контролируемой температуры коэффициент излучения ε_{AS} будет существенно выше (рис. 2).

На рис. 3 представлены результаты расчётов погрешностей измеренной температуры, вызванных неопределённостью априорной установки численного значения коэффициента излучения алюминия $\varepsilon_A = 0,2$ при температуре 100 °С [2]. При этом расчётная абсолютная погрешность измерений $\Delta T(T_{ист})$ для температуры поверхности алюминия 500 °С, составила 130 °С. Результаты расчётов представлены на рис. 3а. Для диапазона $\Delta\lambda_s = 3 - 5,5$ мкм эта погрешность составила 60 °С.

Представленные на рис. 4 результаты расчётных исследований для пирометра с $\Delta\lambda = 7 - 14$ мкм показывают, что при использовании справочного значения интегрального коэффициента излучения абсолютная погрешность измерений будет составлять 1–2 °С на каждые 10 °С.

Второй составляющей неопределённости при пирометрических измерениях является необходи-

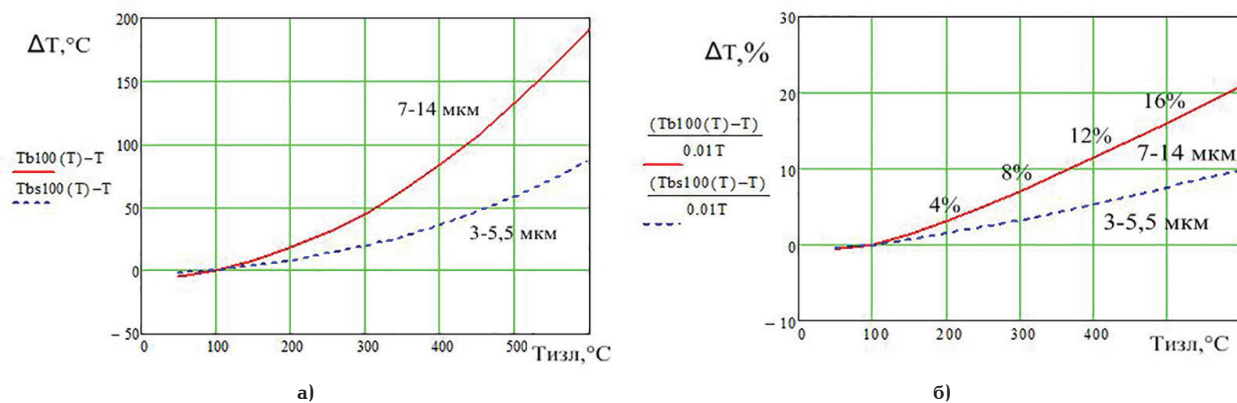


Рис. 3. Расчётные абсолютная а) и относительная б) погрешности в диапазоне измеряемых температур 100–500 $^\circ\text{C}$ при использовании справочного интегрального коэффициента излучения алюминия

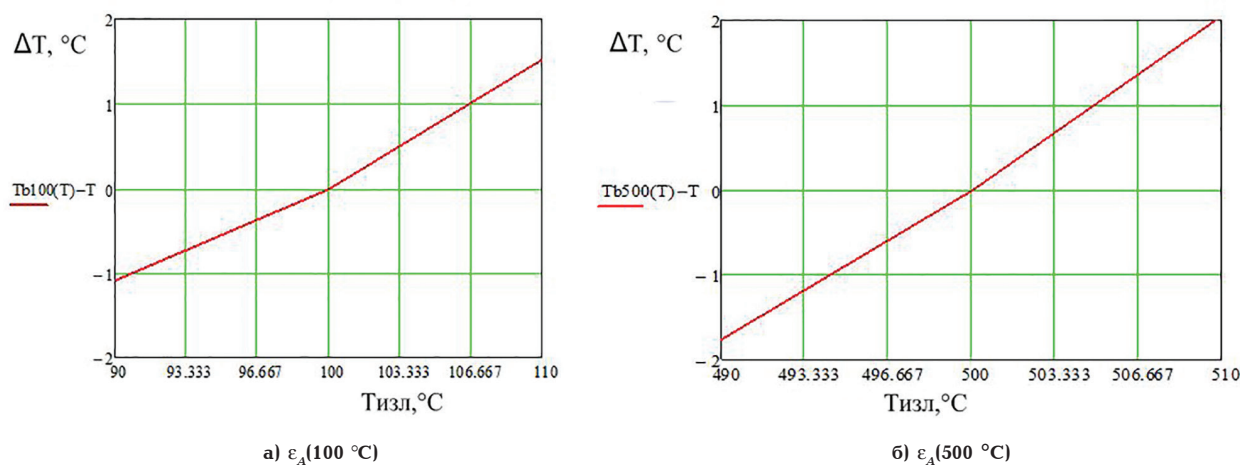


Рис. 4. Погрешность измерений при использовании неизменного интегрального коэффициента излучения

мость учёта отражения фонового излучения от излучающей поверхности объекта контроля. Очевидно, что наличие постороннего источника излучения вне поля зрения пирометра приведёт к завышению его показаний при отражении фонового излучения от поверхности объекта контроля пропорционально его коэффициенту отражения $R = 1 - \epsilon$.

Тогда поток излучения на входе пирометра можно представить как:

$$\begin{aligned} \Phi(T, T_o) &= \Phi_{\text{ок}}(T) + \Phi_o(T_o) = \\ &= A \cdot \epsilon(\lambda, T) \cdot \sigma(T^n - T_{\text{пи}}^n) + \\ &+ K \cdot (1 - \epsilon(\lambda, T)) \cdot \sigma(T_o^n - T_{\text{пи}}^n), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\Phi_{\text{ок}}$ — лучистый поток, пропорциональный температуре поверхности; Φ_o — лучистый поток, отражённый от поверхности; T — истинная температура поверхности; K ; T_o — отражённая температура фона; $T_{\text{пи}}$ — температура приемника излучения; K ; ϵ — интегральный коэффициент излучения; n — коэффициент, определяемый спектральным интервалом чувствительности приемника излучения; A — геометрический параметр визируемой оптической схемой пирометра площади нагретой поверх-

ности; K — геометрический параметр визируемой оптической схемой пирометра площади источника фонового излучения, излучение которого отражено от поверхности объекта контроля. Коэффициент K зависит от геометрии расположения объекта и фона [14].

В практике теплового контроля для учета влияния фонового излучения определяют соответствующую ему условную отражённую радиационную температуру T_o по методам, описанным в [15]. Эти методы предполагают применение дополнительной диффузной отражающей поверхности из фольги. Однако предложенные методы, с применением фольги или измерением температуры в противоположном от объекта контроля направлении, не обладают должной повторяемостью и трудно применимы в производственных условиях. В этом случае используется понятие эффективного коэффициента излучения. Следует отметить, что он имеет нелинейную зависимость от температуры поверхности объекта контроля и не всегда соответствует классическим представлениям $\epsilon = (1 - R)$. Тогда в соответствии с выражением (4) и [15] измеренная температура объекта контроля может быть выражена как:

$$T_{\text{изм}} = \sqrt[n]{\frac{A \cdot \epsilon(\lambda, T) \cdot \sigma(T^n - T_{\text{пи}}^n) + K(1 - \epsilon(\lambda, T)) \cdot \sigma(T_o^n - T_{\text{пи}}^n)}{\epsilon_{\text{эф}}(\lambda, T, T_o) \cdot \sigma}}, \quad (5)$$

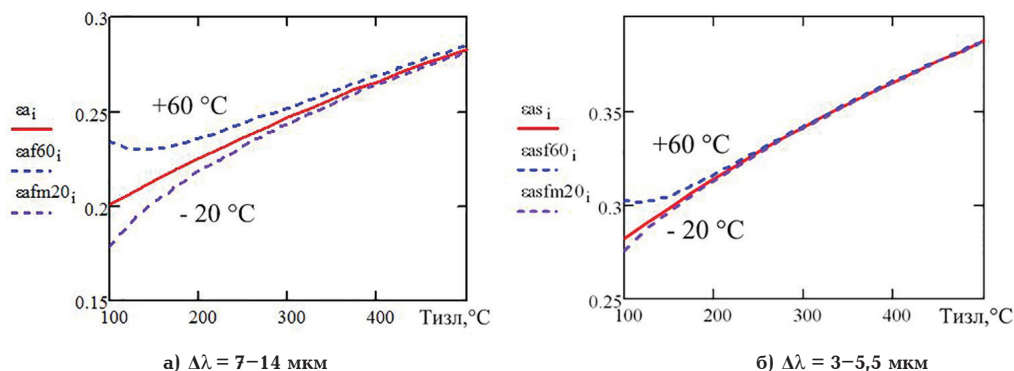


Рис. 5. Зависимости эффективного коэффициента излучения $\varepsilon_{эф}$ алюминия при наличии источника фонового излучения с условной температурой $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

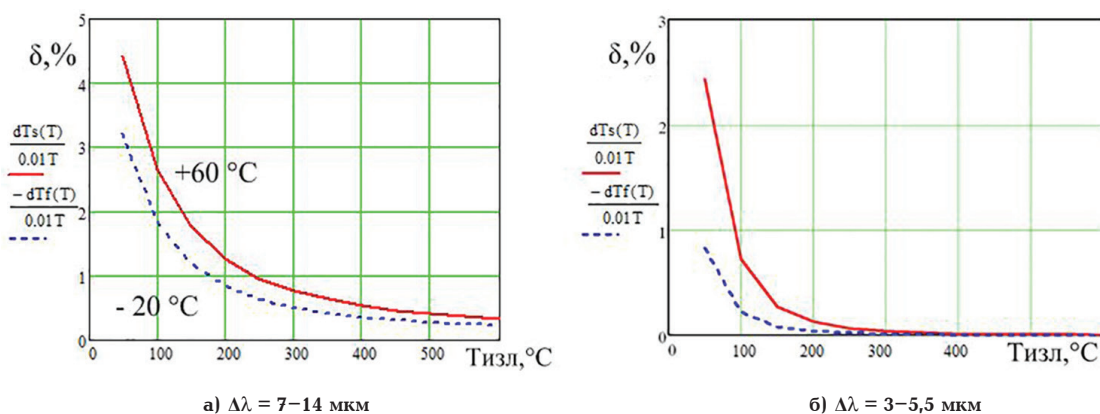


Рис. 6. Значения относительной погрешности $\delta, \%$ определения температуры при отраженной температуре $T_o = 60$ (—) и -20 (- - -) $^{\circ}\text{C}$

где ε — интегральный коэффициент излучения; $\varepsilon_{эф}$ — эффективный коэффициент излучения.

В соответствии с выражениями (3) и (4) нами были проведены расчеты влияния отраженной температуры фона на эффективный коэффициент излучения и увеличение погрешности измерений при соотношении геометрических параметров объекта и фона как 1 к 10.

На рис. 5 пунктирной линией представлены зависимости эффективного $\varepsilon_{эф}(T)$ для алюминия для двух спектральных диапазонов при наличии источника фонового излучения с условной температурой $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 6 представлены относительные погрешности измерений пирометров в условиях фонового отраженного излучения, имеющих коррекцию на излучательную способность алюминия в зависимости от температуры $\varepsilon_A(\lambda, T)$.

Анализ представленных на рис. 5 и 6 расчетных зависимостей показывает, что в промышленных условиях погрешность пирометрических измерений будет превышать заявленную производителем пирометров инструментальную погрешность в 1 % в диапазоне до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты экспериментов. Представленные расчётные результаты качественно были подтверждены пирометрическими измерениями с использованием поверенного пирометра Optris CT LT15 (Германия) со спектральной чувствительностью в диапазоне $\Delta\lambda = 8 - 14\text{ }\mu\text{m}$ и тепловизора Flir E60 (США) с диапазоном спектральной чувствительности $\Delta\lambda = 7 - 14\text{ }\mu\text{m}$.

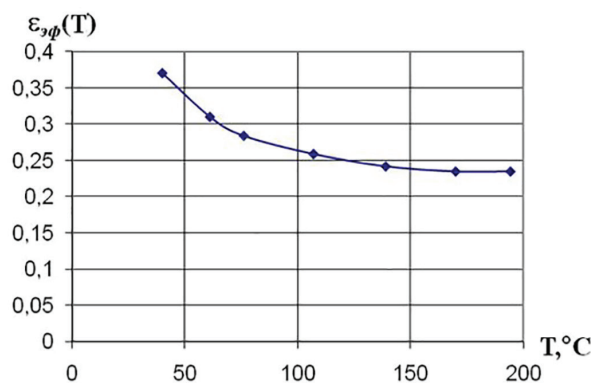


Рис. 7. Экспериментальная зависимость $\varepsilon_{эф}(T)$ поверхности алюминия

На рис. 7 представлена экспериментальная зависимость $\varepsilon_{эф}(T)$ от температуры поверхности алюминия, измеренной контактным способом при помощи термометра. Коэффициент $\varepsilon_{эф}(T)$ определялся опытным путем подбора величины коэффициента коррекции на излучательную способность в настройках пирометра при равенстве показаний пирометра и термометра.

Результаты экспериментальных исследований методической погрешности измерений при недооценке введении поправки на эффективный коэффициент излучения $\varepsilon_{эф}(T)$ с неопределенностью $\Delta\varepsilon$ представлены на рис. 8.

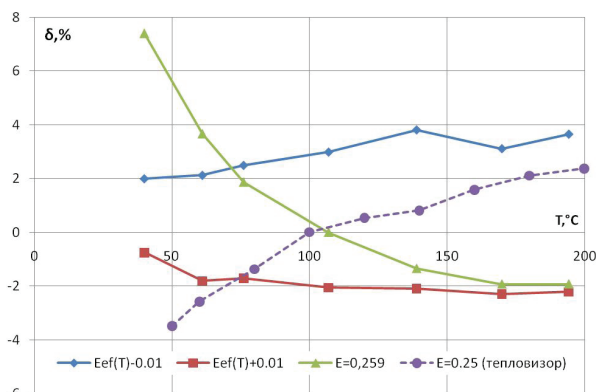


Рис. 8. Относительные погрешности: пирометра Opttris CT LT15 при неопределённости $\Delta \epsilon = -0,01$ (♦), $\Delta \epsilon = +0,01$ (■) и отсутствии поправки на фоновое излучение при $\epsilon = 0,259$ (▲); тепловизора при $\epsilon = 0,25$ (●)

По данным, представленным на рис. 8, относительная методическая погрешность измерений пирометром Opttris CT LT15 составила $\delta_{\text{мет}} = 0,5...4\%$ при неопределённости коэффициента излучения $\Delta \epsilon = \pm 0,01$. Следует отметить, что величина 0,01 является для большинства моделей пирометров минимальным шагом установки параметра коэффициент излучения. При отсутствии введения поправки на фоновое излучение $\epsilon_{\text{эф}}(T)$ показания пирометра оказались завышены в нижнем диапазоне температур на 7,4 % и занижены на 2 % в верхнем диапазоне. По данным поверки инструментальная погрешность прибора составила $\delta_{\text{инс}} = 1\%$.

На рис. 8 также представлены результаты экспериментальных исследований погрешности измерений, связанной с увеличением интегрального коэффициента излучения алюминия от температуры, проведенных с применением тепловизора Flir E60. По методу диффузного отражателя сделана поправка на условную отраженную температуру. Экспериментально определенный коэффициент излучения поверхности алюминия составил $\epsilon = 0,25$ при температуре 100 °C. Как видно из рис. 8, при уменьшении температуры поверхности на 50 °C относительная методическая погрешность измерений составила $\delta(50) = -3,5\%$, а при увеличении температуры на 100 °C соответственно $\delta(200) = +2,4\%$.

Выводы. 1. Проведена оценка погрешности измерений, обусловленной неточной установкой параметра коэффициент излучения в настройках прибора, позволившая сделать вывод о том, что пирометрические измерения в промышленных условиях требуют более корректного учёта коэффициента излучения и влияния отраженного излучения.

2. Пирометрические измерения в спектральном диапазоне $\Delta \lambda_s = 3-5,5$ мкм обладают существенно меньшей погрешностью в случае некорректного ввода оператором величины коэффициента излучения и отсутствия учёта отраженного фонового излучения.

3. В условиях неопределённости значений $\epsilon(\lambda, T)$ градуировку пирометров предлагается проводить не по излучателю типа модели АЧТ, а по модели пирометрического калибратора, предложенного в [13], представляющего собой термостатированный образец излучающей поверхности из материала идентичного поверхности объекта контроля.

Заключение. Представленные результаты исследований позволили получить численные значе-

ния погрешностей, вызванных неопределённостью установок коэффициентов излучения и влиянием отраженного излучения. Расчётные зависимости подтверждены экспериментально. Сделан вывод о необходимости и целесообразности разработки методических рекомендаций и инструментальных реализаций, направленных на уменьшение погрешностей при пирометрическом контроле в производственных условиях.

Библиографический список

1. Брамсон М. А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. В 2 т. М.: Наука, 1964. Т. 1. 318 с.
2. Криксунов Л. З. Справочник по основам ИК-техники. М.: Советское радио, 1978. 400 с.
3. Излучательные свойства твёрдых материалов / Под общ. ред. А. Е. Шейндина. М.: Энергия, 1974. 360 с.
4. Захаренко В. А., Веприкова Я. Р., Кропачев Д. Ю. Пирометр для измерения температуры расплавов // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 114–118.
5. Chen H, Chen C. Determining the emissivity and temperature of building materials by infrared thermometer // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 126. P. 130–137. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.027.
6. Zhang F., Yu K., Zhang K. [et al.]. An emissivity measurement apparatus for near infrared spectrum // Infrared Physics & Technology. 2015. Vol. 73. P. 275–280. DOI: 10.1016/j.infrared.2015.10.001.
7. Perez-Saez R. B., del Campo L., Tello M. J. Analysis of the Accuracy of Methods for the Direct Measurement of Emissivity // International Journal of Thermophysics. 2008. Vol. 29. P. 1141–1155. DOI: 10.1007/s10765-008-0402-4.
8. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982. 296 с.
9. Левин Е. В., Окунев А. Ю. Влияние погрешностей задания рабочих параметров на точность измерения температуры инфракрасными приборами // Измерительная техника. 2016. № 1. С. 60–64.
10. 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.
11. Фрунзе А. А., Фрунзе А. В. О погрешностях измерений температуры реальных объектов энергетическими пирометрами // Датчики и системы. 2014. № 3. С. 41–43.
12. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение / пер. с фр. Васильченко Н. В. М.: Мир, 1988. 416 с.
13. Захаренко В. А., Веприкова Я. Р., Пономарёв Д. Б. Уменьшение неопределённости при бесконтактном измерении температуры // Динамика систем, механализмов и машин. 2018. № 2. С. 16–21. DOI: 10.25206/2310-9793-2018-6-4-25-32.
14. Ковалева В. В., Аверьянова Д. Е. Анализ влияния излучения фона на работу радиационного пирометра // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2011. Т. 5, № 1. С. 176–178.
15. Вавилов В. П., Александров А. Н. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике. М.: НТФ Энергопресс, 2003. 76 с.

ПОНОМАРЕВ Дмитрий Борисович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электроника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ).

SPIN-код: 3054-6265

AuthorID (SCOPUS): 5519010850

ResearcherID: E-5169-2014

ORCID: 0000-0002-5206-0756

Адрес для переписки: dimi3i@mail.ru

ЗАХАРЕНКО Владимир Андреевич, доктор технических наук, доцент (Россия), заведующий кафедрой «Электроника» ОмГТУ.

SPIN-код: 2501-4655

AuthorID (SCOPUS): 7006028243

ResearcherID: E-5359-2014

Адрес для переписки: zaha_vl@mail.ru

АБРАМОВА Елена Вячеславовна, доктор технических наук, ведущий специалист Научно-учебного центра «Сварка и контроль» Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана.

SPIN-код: 8294-1631

Адрес для переписки: e.v.abramova11@yandex.ru

Для цитирования

Пономарев Д. Б., Захаренко В. А., Абрамова Е. В. Анализ погрешностей при пирометрических измерениях в производственных условиях // Омский научный вестник. 2019. № 5 (167). С. 94–99. DOI: 10.25206/1813-8225-2019-167-94-99.

Статья поступила в редакцию 24.09.2019 г.

© Д. Б. Пономарев, В. А. Захаренко, Е. В. Абрамова