

Метод пирометрии с мобильными жаростойкими экранами

Михаил Александрович Денисов

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия, denisov46@mail.ru

Аннотация. Исследованы возможности увеличения точности бесконтактных температурных измерений. Предложен метод пирометрии поверхностей, при котором погрешности, обусловленные фоновым излучением сторонних излучателей, уменьшены с помощью перемещаемых отражающих экранов. Измерения температуры проведены серийным узкоугольным пирометром, визированным на поверхность через отверстие в полости экрана из волокнистого жаростойкого материала. Представлены результаты серии экспериментов, обосновывающих содержание и параметры операций метода измерений. В частности, отмечено понижение реальной температуры измеряемой поверхности приблизительно на 20–25 °С при вводе неохлаждаемых экранов в камеру теплового агрегата перед каждым измерением. Качественные результаты измерения температуры поверхности получены в условиях, когда экраны между измерениями оставались в рабочем пространстве печи, и проводились выравнивающие температуру выдержки экранов в течение 1–2 минут в позициях на поверхности сначала рядом, затем непосредственно над местом измерения температуры. Описаны результаты промышленных испытаний метода измерения. Метод измерения можно применять при технологических измерениях непосредственно на высокотемпературных агрегатах или при периодическом тестировании и определении поправок к показаниям стационарных пирометров.

Ключевые слова: пирометр, отражающие экраны, измерение, температура поверхности, SCADA-система, конструкции экранов

Для цитирования: Денисов М. А. Метод пирометрии с мобильными жаростойкими экранами // Измерительная техника. 2021. № 10. С. 41–45. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-10-41-45>

Pyrometry method with mobile heat-resistant screens

Mikhail A. Denisov

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia, denisov46@mail.ru

Abstract. Possibilities of increasing the accuracy of non-contact temperature measurements are investigated. A method of surface pyrometry is proposed, in which the errors caused by the background radiation of third-party emitters are reduced with the help of reflecting screens. Temperature measurements are carried out with a serial narrow-angle pyrometer, sighted at the surface through a hole in the cavity of the screen made of fibrous heat-resistant material. The results of a series of experiments substantiating the content and parameters of the operations of the measurement method are presented. In particular, a decrease in the actual temperature of the measured surface by approximately 20–25 °C was noted when uncooled screens were introduced into the chamber of the thermal unit before each measurement. Qualitative results of measuring the surface temperature were obtained under conditions when the screens remained in the working space of the furnace between measurements, and the temperature leveling of holding the screens in positions on the surface before and during the measurement was carried out for 1–2 minutes. The results of industrial tests of the measurement method are described. The measurement method can be used for technological measurements directly on high-temperature units or for periodic testing and determination of corrections to the readings of stationary pyrometers.

Keywords: pyrometer, reflective screens, measurement, surface temperature, SCADA-system, screen designs

Введение. Для управления тепловыми технологическими процессами необходим надёжный контроль температуры поверхностей в рабочем пространстве агрегатов. Температура обычно контролируется трудоёмкими контактными методами измерений, имеющими ограниченное применение и плохо подходящими для непрерывных измерений. Использованию бесконтактных методов измерения температуры поверхностей во многих огневых камерах мешает неопределённость оптических свойств измеряемых поверхностей и среды, засветка поверхностей излучением более горячих стенок. Поэтому в отверстия в стенках огневых

камер устройств нагрева металла часто вставляют огнеупорные стаканы. Температуры внутри стаканов измеряются пирометрами или термопарами [1]. Результаты измерений считаются усреднённой температурой в камере печи, и по этой температуре ведётся технологический процесс. Для более надёжного измерения температуры поверхностей используются пирометры в комплекте с вогнутым сферическим рефлектором, который добавляет к собственному излучению поверхности отражённое экраном излучение [2, 3]. При этом уменьшается зависимость результатов измерения от степени черноты поверхности. Вариант такой конструкции

прибора исследован в [4]. В работе [5] показано, что для измерений необязательно применять приборы индивидуальной конструкции. В измерительных устройствах можно использовать отдельные отражающие экраны в комплекте с разнообразными серийными узкоугольными пирометрами. Но для получения стабильных и надёжных результатов внутреннюю поверхность экранов желательно охлаждать. В [6–8] описаны приборы для локальных измерений в труднодоступных местах, отрабатываются методы спектральной пирометрии для объектов с неизвестной излучательной способностью, разрабатываются новые методологические подходы, позволяющие создавать пирометры с улучшенными метрологическими характеристиками.

Описанные выше методы измерений и приборы с экранами сложно применять в реальных высокотемпературных агрегатах, поскольку или отсутствует доступ к измеряемой поверхности, или приборы трудно защитить от перегрева во время измерений, или производственные условия создают проблемы для реализации метода. Поэтому на практике пирометры в огневых камерах устанавливают так, чтобы минимизировать неизбежные погрешности измерений. Иногда измерения выполняют двумя пирометрами [9], но и этим методом корректно определить эффективную температуру горячих стенок огневых камер трудно из-за неравномерности их температуры, значительного поглощения газовым неизоотермическим объёмом падающего на измеряемую поверхность излучения, а также из-за трудности определения фактических оптических характеристик стенок и среды.

Цель исследования – разработка бесконтактного метода высокотемпературной пирометрии с применением серийных приборов. Метод обеспечит малые погрешности от

фонового излучения сторонних источников и зависимость от неточного определения оптических характеристик.

Метод бесконтактного измерения температуры поверхностей. Для разработки нового метода бесконтактного измерения температуры поверхностей использованы данные [5] о возможности конструктивного разделения отражающего экрана и пирометра. За основу для испытаний принята система измерения, состоящая из узкоугольного пирометра и огнеупорных экранов разной конструкции, которые имитируют искусственную полость абсолютно чёрного тела на измеряемой поверхности. В лаборатории Уральского федерального университета проведена серия экспериментов, обосновывающих содержание операций метода измерений, параметры, при которых операции выполняются и некоторые конструктивные особенности отражающих экранов.

Эксперименты проводили на установке, представлявшей собой муфельную электропечь СНОЛ-162008/9-М1 (СНОЛ, Литва), в которую помещали пластину из малоуглеродистой стали размером 10×75×170 мм с хромель-алюмелевыми термопарами, имеющими диаметр электродов 0,1 мм. Пластины нагревали при разных режимах до температуры 1050 °С. В процессе нагрева на участок пластины с поверхностной термопарой периодически помещали экраны из волокнистых огнеупорных материалов. Малый размер волокон снижает тепловую инерцию материала и позволяет экранам быстро менять температуру поверхности. В экранах полусферической формы внутренним радиусом 16 мм имелись отверстия для визирования пирометра на участок поверхности под экраном. Измерительные устройства установки подключали к компьютерной системе, отслеживавшей динамику изменения температуры. Схема расположения экранов в рабочей камере установки во время опытов показана на рис. 1.

Установка состоит из пирометра «Термоскоп-004» (ТС-004, отградуированный пирометр предоставлен ООО «Инфратест», Россия) и экрана из уплотнённого мулитокремнезёмистого волокнистого огнеупора на проволоочном каркасе. Волокнистый огнеупорный материал, широко распространённый на отечественных предприятиях, обладает малой тепловой инерцией и отражательной способностью волокнистой структуры. Характеристики пирометра ТС-004: диапазон измерений 700–1300 °С; максимум спектральной чувствительности 0,85 мкм; показатель визирования 1:500. Диаметр пятна визирования на расстоянии 3 м составляет 6 мм, что позволило сделать в экране отверстие диаметром 8 мм для визирования пирометра на относительно тёмную поверхность пластины. Стабильность измерения достигнута фиксацией пирометра с помощью дополнительных опор.

На установке провели три опыта, результаты приведены на рис. 2 и в таблице. В опыте 1 проверяли оборудование и уточняли

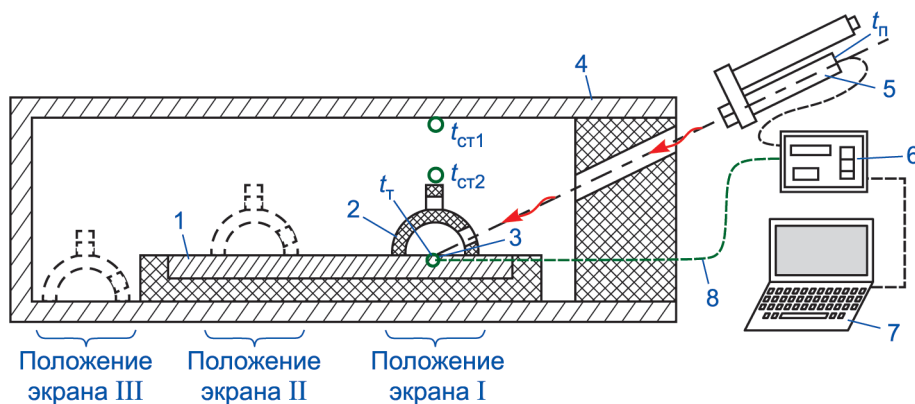


Рис. 1. Схема расположения экранов в опытах:

1 – нагреваемая пластина; 2 – мобильный жаростойкий экран; 3 – термопара, измеряющая t_p на верхней поверхности пластины; 4 – камера печи; 5 – измеряющий t_p пирометр с осью оптической системы, визированной на отверстие в экране; 6 – измерительный прибор; 7 – компьютер с измерительной системой; 8 – связь между измерительным прибором 6, датчиками 3, 5 и компьютером 7

Fig. 1. Layout of screens in experiments:

1 – heated plate with thermocouples; 2 – mobile heat-resistant screen; 3 – thermocouple on the top t_p , lower and center surface of the plate; 4 – furnace chamber; 5 – measuring t_p pyrometer with the axis of the optical system, sighted at the hole in the screen; 6 – measuring device; 7 – computer with SCADA-system; 8 – connection between measuring device 6, sensors 3, 5 and computer 7

методику измерений. В опыте 2 изменяли конструкцию экрана. Измерения в опытах 1, 2 проводили после ввода холодного экрана в камеру установки в положение I над термопарой, определяющей температуру t_r . Пирометр во время измерений визировали на участок поверхности пластины рядом с термопарой. Измеренные пирометром значения температуры t_n получены с предустановленной степенью черноты поверхности $\varepsilon_m = 1$.

На рис. 2 приведены характерные кривые изменения температуры металла под холодным экраном, полученные в опыте 2 при средней температуре поверхности 915 °С. Температурные кривые показали, что сразу после начала измерения температура t_r понижалась на 20–25 °С в тени экрана и оставалась такой в течение 80–120 с. Приблизительно через 60–80 с после начала измерения разность показаний пирометра и стационарной термопары стабилизировалась. Практически это означает, что измерять температуру поверхностей нагреваемого металла рассмотренным методом с использованием охлажденного экрана можно только после градуировки измерителя.

Результаты динамических измерений температуры в опыте 1 повлияли на методику дальнейших экспериментов. В опытах дополнительно стали фиксировать значения температуры поверхности металла t_r , t_n через 2 мин после установки экрана над стационарной термопарой (см. таблицу). Значения температуры $t_{ст1}$, $t_{ст2}$ в разных точках внутренней поверхности муфеля характеризуют степень неравномерности распределений температуры в камере печи.

Согласно таблице характер изменения температуры во время опытов косвенно подтверждает достоверность результатов измерения: самыми горячими были стенки муфеля – температура t_n поверхности заготовки на 33–41 °С превышала показания t_r стационарной термопары, расположенной приблизительно на расстоянии 0,5–1 мм от верхней поверхности заготовки. Также по данным таблицы можно определить зависимость результатов измерений от размера экрана: меньший по размерам экран вносит меньшие искажения в распределение температуры поверхности металла, но может изменить излучательную способность части поверхности металла, которая находится в поле зрения пирометра (через отверстие в экране).

Часть измерений в опыте 3 повторили с малым экраном с внутренней полусферической поверхностью радиусом 8 мм. Уменьшение размеров экрана на результаты измерений практически не повлияло, но пользоваться экраном стало труднее.

При измерениях в опыте 3 экран из камеры не извлекали. До начала измерения экран не контактировал с плитой в положении III (см. рис. 1) и не охлаждался. Перед измерением экран перекладывали на участок поверхности рядом с точкой измерения температуры t_r поверхностной термопарой (в положение II). В этом положении температура внутренней поверхности экрана уравнивалась с температурой поверхности пластины в течение 2 мин. Затем экран перекладывали в положение I. На пластину через отверстие в экране визировали пирометр ТС-004, и измерительная система фиксировала одновременное изменение температур t_r и t_n . Результаты двух измерений зависимости температуры от времени в опыте 3 приведены на рис. 3. Показания термопары при установке над ней экрана практически не уменьшались: в течение всего времени измерения значения

t_n превышали значения t_r приблизительно на 34 и 28 °С (см. соответственно рис. 3, а, б).

Для определения причины, создающей перепад значений t_r , t_n , в опыте 3 измерения продолжали после выключения электропечи: камера печи медленно остывала, а разность температур внутренней поверхности муфеля и поверхности пластины сначала уменьшилась, а затем практически исчезла (рис. 4). Кривые охлаждения на рис. 4, а показывают, как при выравнивании температуры в камере печи уменьшается перепад температуры в слое окалины на пластине. На рис. 4, б перепада температуры уже нет, показания пирометра и контрольной термопары совпадают. Таким образом, измеряемый перепад значений t_r , t_n формируется тепловым потоком от муфеля печи через экран и слой металла между поверхностью пластины и термопарой. Перепад приближенно соответствует оценочным (расчетным) значениям перепада температуры в слоях металла около поверхности пластины.

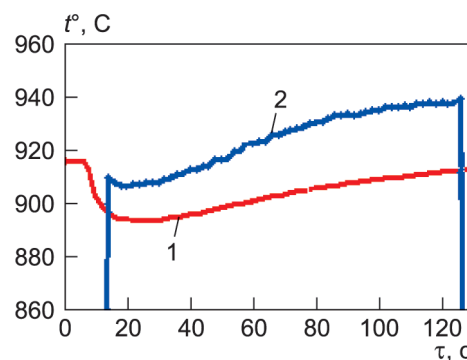


Рис. 2. Изменение во времени температуры поверхности стальной пластины после установки на неё холодного экрана: 1 – t_r ; 2 – t_n

Fig. 2. The time variation of the surface temperature of the steel plate after you install on it a cold screen: 1 – t_r ; 2 – t_p

Результаты измерения температуры поверхности металла

$t_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{г}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ст1}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{ст2}}, ^\circ\text{C}$	Режим	$R_{\text{вн}}^*$, мм
Опыт 1 (материал экрана – каолиновая вата)					
747	714	797	812	Нагрев	16
749	716	—	—		
755	718	—	—		
801	763	859	877		
851	817	905	923		
896	863	964	968		
952	915	1002	1019		
982	941	1030	1052		
Опыт 2 (волокнистая плита)					
802	751	851	867	Нагрев	16
923	889	1025	981		
987	952	1046	1052		
1066	1019	1120	1127		
956	923	964	1013	Охлаждение	16
Опыт 3 (волокнистая плита)					
794	749	850	873	Нагрев	16
916	880	991	976		8
888	854	950	939	Охлаждение	16
867	828	870	920		8
883	843	944	948	Нагрев	16

* $R_{вн}$ – внутренний радиус экрана

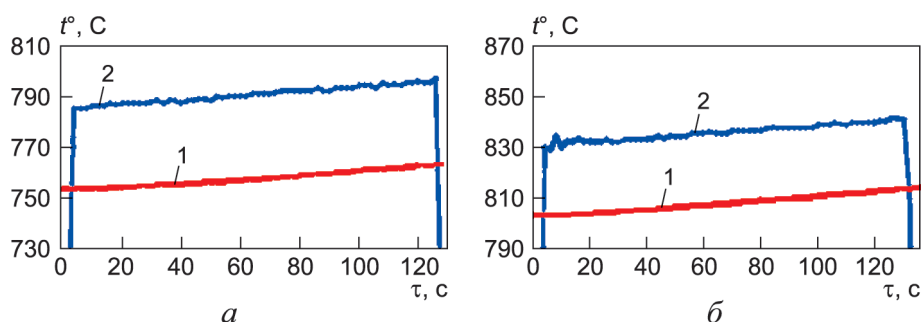


Рис. 3. Изменение во времени температуры в опыте 3 при средней температуре поверхности 770 °C (а) и 820 °C (б): 1 – t_i ; 2 – t_n

Fig. 3. Temperature change over time in experiment 3 at medium temperature surfaces 770 °C (a) and 820 °C (b): 1 – t_i ; 2 – t_p

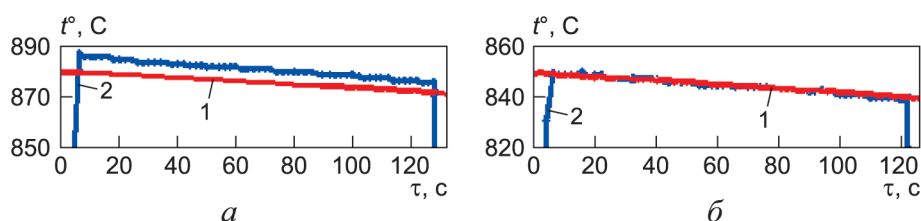


Рис. 4. Изменение во времени температуры поверхности при охлаждении стальной пластины в опыте 3 в начале процесса (а) и через 10 мин (б): 1 – t_i ; 2 – t_n

Fig. 4. Time variation of the surface temperature during cooling of the steel plate in experiment 3 at the beginning of the process (a) and after 10 minutes (b): 1 – t_i ; 2 – t_p

При нагреве металлической пластины с термопарами на поверхности пластины происходит окисление металла с образованием слоя окалины с низкой теплопроводностью. Толщину слоя окалины в экспериментах желательно контролировать в динамике по методикам, описанным в [11]. Но процедура определения толщины слоя окалины трудоёмкая, поэтому оценивали надёжность результатов измерения температуры металла и отработывали метод измерения на другом объекте при промышленных исследованиях.

Промышленные испытания метода измерений. Опыты проводили в печи с шагающим подом № 3 стана 150 Нижне-Сергинского метизно-металлургического завода [10]. В ходе опытов определяли изменение распределений температуры в объёме нагреваемого металла и рабочем пространстве печи, а также изменение параметров теплового режима. Описанный выше в опыте 3 метод пирометрии с мобильными экранами использовали для измерения температуры поверхностей нагреваемых заготовок в балансовых опытах и для предварительного поиска характерных точек пирометрии. Характерными считали точки измерения, в которых обычные промышленные пирометры определяют реальные температуры поверхностей без значительных погрешностей от засветки излучением горячих стенок. Точки измерения выбирали путём сравнения температуры верхней поверхности заготовок, определённой пирометром с мобильным экраном, и температур разных поверхностей, измеренных обычным промышленным пирометром. Невысокая точность измерений связана с большим (14 К) пределом основной допускаемой

погрешности использованного оптического пирометра «Промінь» (СССР). Тем не менее, по итогам сравнения данных для пирометрии температуры металла через боковое окно печи можно рекомендовать визирующие пирометры на верхнюю часть боковой поверхности заготовок, которую от фонового излучения кладки заслоняют соседние заготовки. При измерениях температуры через отверстия в торцевой стенке со стороны выдачи металла пирометр визируют на те участки боковых поверхностей, которые видны в оптической системе пирометра как относительно тёмные узкие полосы между участками более широких и светлых полос – верхних поверхностей заготовок. Эти участки боковых поверхностей не отражают излучение более удалённых от пирометра горячих поверхностей свода и боковых стенок, так как повернуты к внутренней поверхности кладки торцевой стены, температура которой обычно близка к температуре нагретых заготовок.

Обсуждение результатов промышленных экспериментов. В балансовых опытах [10] определены распределение температур нагреваемого металла по длине печи и перепад температуры поверхностного слоя окалины. При этом измерены температуры, рассчитаны поля температуры в программе ANSYS Multiphysics (США), сравнены расчётные и экспериментальные данные. Показано, что в начале опытов металл в печи нагревался в условиях, близких к условиям опытов на установке. Расчётные перепады температуры по толщине окалины в диапазоне температуры 750–1100 °C изменялись в пределах 35–45 °C, что практически совпало с результатами непосредственных измерений температуры по методике, описанной в [10]. В настоящей работе получены перепады между температурами t_r , t_n в диапазоне 33–51 °C (см. таблицу). Между поверхностью пластины, на которую визируется пирометр, и рабочим спаем термопары расположен слой окалины и, возможно, очень тонкий слой неокисленного металла. Теплопроводность окалины много меньше теплопроводности металла, поэтому разность значений t_r , t_n приближённо можно считать перепадом температуры по толщине окалины. Это означает, что расчётные и экспериментальные результаты работы [10] приближённо подтверждают достоверность результатов измерений настоящей работы предлагаемым методом пирометрии с мобильными жаростойкими экранами.

Закключение. Предложенный метод измерения позволяет увеличить точность бесконтактного измерения температуры поверхностей в камерах высокотемпературных агрегатов. Работоспособность метода проверена при проведении стендовых и промышленных экспериментов, поэтому метод можно применять для измерений в промышленных тепловых агрегатах и для периодической проверки показаний существующих приборов контроля температуры.

Список источников

1. Беленький А. М., Дубинский М. Ю., Ладыгичев М. Г., Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М. Температура: теория, практика, эксперимент. Справочное издание в 3-х т. Т. 2. Измерение температуры в промышленности и энергетике / Под ред. А. М. Беленького, В. Г. Лисиенко. М.: Теплотехник, 2007. 731 с.

2. Drury M. D., Percy K. P., Land T., Pyrometer for surface temperature measurement, *J. Iron Steel Inst.*, 1951, vol. 169, pp. 245–250.

3. Che X., Xie Z., Notice of Removal: Surface Temperature Measurement with Unknown Emissivity Using a Two-Color Pyrometer Placed with a Reflector, *2017 5th International Conference on Mechanical, Automotive and Materials Engineering (CMAME)*, Guangzhou, China, August 1–3, 2017, IEEE, 2017, pp. 214–217. <https://doi.org/10.1109/CMAME.2017.8540158>

4. Булгак Л. И., Вольфман И. Б., Ефроймович С. Ю., Захаров Г. К. и др. Автоматизация методических печей / Под ред. М. Д. Климовицкого. М.: Metallurgiya, 1981. 195 с.

5. Денисов М. А. Отражающие экраны для пирометрии металлургических процессов // Теория и технология металлургического производства. 2001. № 1. С. 182–186.

6. Müller B., Renz U., *Review of Scientific Instruments*, 2001, vol. 72, 3366. <https://doi.org/10.1063/1.1384448>

7. Магунов А. Н., Лапшинов Б. А., Суворин А. В. Разработка приборов для измерения температуры объектов с неизвестной излучательной способностью. // Инновации. 2015. № 4 (198). С. 13–16.

8. Фрунзе А. В. Методология повышения точности бесконтактных приборов теплового контроля веществ, материалов и изделий: автореф. дис. докт. техн. наук (ТГТУ, Тамбов, 2017).

9. Епишин А. В., Кузнецов В. В., Бегинин Р. С. Измерение температуры металла в печах станов горячей прокатки // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов I Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (TIM'2012). Екатеринбург, Россия, 29–30 марта 2012. Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 46–50.

10. Денисов М. А., Черных В. Н. Метод исследования нагрева окисляющегося металла в программных пакетах инженерного анализа // Изв. вуз. Черная металлургия. 2019. № 1. С. 73–78. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-1-73-78>

11. Темлянтцев М. В., Михайленко Ю. Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. М.: Теплотехник, 2006. 200 с.

Reference

1. Belen'kii A. M., Dubinskii M. Yu., Ladygichev M. G., Lisienko V. G., Shchelokov Ya. M. *Temperatura: teoriya, praktika, eksperiment*,

Spravochnoe izdanie, T. 2, Izmerenie temperatury v promyshlennosti i energetike [Temperature: theory, practice, experiment, Reference edition in 3 volumes, vol. 2, Temperature measurement in industry and power engineering], ed. A. M. Belen'kii, V. G. Lisienko, Moscow, Teplotekhnika Publ., 2007, 731 p. (In Russ.)

2. Drury M. D., Percy K. P., Land T., Pyrometer for surface temperature measurement, *J. Iron Steel Inst.*, 1951, vol. 169, pp. 245–250.

3. Che X., Xie Z., Notice of Removal: Surface Temperature Measurement with Unknown Emissivity Using a Two-Color Pyrometer Placed with a Reflector, *2017 5th International Conference on Mechanical, Automotive and Materials Engineering (CMAME)*, Guangzhou, China, August 1–3, 2017, IEEE, 2017, pp. 214–217. <https://doi.org/10.1109/CMAME.2017.8540158>

4. Bulgak L. I., Vol'fman I. B., Efroyimovich S. Yu., Zakharov G. K. et al., *Avtomatizatsiya metodicheskikh pechei* [Automation of reheating furnaces], ed. M. D. Klimovitskij, Moscow, Metallurgiya Publ., 1981, 195 p. (In Russ.)

5. Denisov M. A., Otrazhajushhie jekrany dlja pirometrii metallurgicheskikh processov [Reflecting screens for pyrometry of metallurgical processes], *Theory and Technology of Metallurgical Production*, 2001, vol. 1, pp. 182–186. (In Russ.)

6. Müller B., Renz U., *Review of Scientific Instruments*, 2001, vol. 72, 3366. <https://doi.org/10.1063/1.1384448>

7. Magunov A. N., Lapshinov B. A., Suvorinov A. V., Razrabotka priborov dlya izmereniya temperatury ob'ektov s neizvestnoi izluchatel'noi sposobnost'yu [Development of devices for measuring the temperature of objects with unknown emissivity], *Innovations*, 2015, no. 4 (198), pp. 13–16. (In Russ.)

8. Frunze A. V., Extended abstract of doctoral dissertation in Technical Sciences (TGTU, Tambov, 2017). (In Russ.)

9. Epishin A. V., Kuznetsov V. V., Beginin R. S., Izmerenie temperatury metalla v pechakh stanov goryachei prokatki [Measurement of metal temperature in furnaces of hot rolling mills], *Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve: sbornik dokladov I Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (TIM'2012)* [Heat engineering and informatics in education, science and production: a collection of reports of the I All-Russian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists], Ekaterinburg, Russia, March 29–30, 2012. Ekaterinburg, Ural Federal University Publ., 2012, pp. 46–50. (In Russ.)

10. Denisov M. A., Chernykh V. N., *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2019, no. 1, pp. 73–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-1-73-78>

11. Temlyantsev M. V., Mikhailenko Yu. E., *Okislenie i obezугlerozhivanie stali v protsessakh nagreva pod obrabotku davleniem* [Oxidation and decarburization of steel in high-pressure heating processes]. Moscow, Teplotekhnika Publ., 2006, 200 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 14.12.2020; одобрена после рецензирования 24.05.2021; принята к публикации 31.05.2021.
The article was submitted 14.12.2020; approved after reviewing 24.05.2021; accepted for publication 31.05.2021.