

40 лет ИТМ НАН Беларуси



Марукович Е. И.



Жуков Л. Ф.



Кочкин Ю. Н.



Романенко А. А.



Станюленис Ю. Л.

Е. И. МАРУКОВИЧ, ИТМ НАН Беларуси,
Л. Ф. ЖУКОВ, ФТИ сталей и сплавов НАН Украины,
Ю. Н. КОЧКИН, А. А. РОМАНЕНКО, Ю. Л. СТАНЮЛЕНИС, ИТМ НАН Беларуси
УДК 536.521.3, 621.039.564.3, 616-073.65, 669.042

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХЦВЕТНОГО ПИРОМЕТРА СО СВЕТОВОДНЫМ ТРАКТОМ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПЕЧЕЙ

Theoretical explanation of creation of two-color pyrometer with light-guiding transmission is given. The example of practical application of such type of pyrometer for the molten metal temperature control in laboratory furnace is given.

Высокотемпературные процессы получения, обработки и разливки жидкого металла являются наиболее ресурсоемкими в металлургии. Высокая ресурсоемкость определяется как физической природой применяемых технологий, так и значительным уровнем технически неоправданных затрат, в том числе затрат, обусловленных плохим метрологическим обеспечением производств. Несовершенство и, тем более, отсутствие технологического мониторинга совершенно недопустимы для современного производства, так как при этом увеличивается брак металлопродукции, энергозатраты в 1,5–2,0 раза превышают расчетные, возрастает вероятность аварийных ситуаций, уменьшается ресурс футеровки металлургических агрегатов.

Непрерывный термоконтроль и оптимальное на его основе управление температурными режимами не имеют сегодня серьезной альтернативы для снижения затрат индукционной плавки, миксерования и разливки металла. Промышленное использование новых контролируемых технологий показало, что за счет термоконтроля и управления энергозатраты в среднем снижаются на 10–30 и 20–40% соответственно [1].

Оптимальными для непрерывного контроля температуры в металлургических и раздаточных печах являются световодные технологии оптической пирометрии.

Оптическая пирометрия – область термометрии, основанная на измерении интенсивности равновесного теплового излучения в видимой области спектра [2]. Она особенно эффективна в диапазоне высоких температур $T > 1000$ К, поскольку позволяет избегать трудностей, связанных с непосредственным контактом с контролируемым объектом.

Отношение испускательной способности тел к их поглощательной способности не зависит от природы излучающего тела, так же как и излучательной способности абсолютно черного тела, и зависит от длины волны излучения и абсолютной температуры (закон Кирхгофа) [2].

Абсолютно черным телом в теории теплового излучения называют тело, полностью поглощающее весь падающий на него поток излучения. Распределение интенсивности в спектре равновесного теплового излучения абсолютно черного тела определяется формулой Планка, которая в обозначениях и терминах, принятых в оптической пирометрии, имеет вид [3]

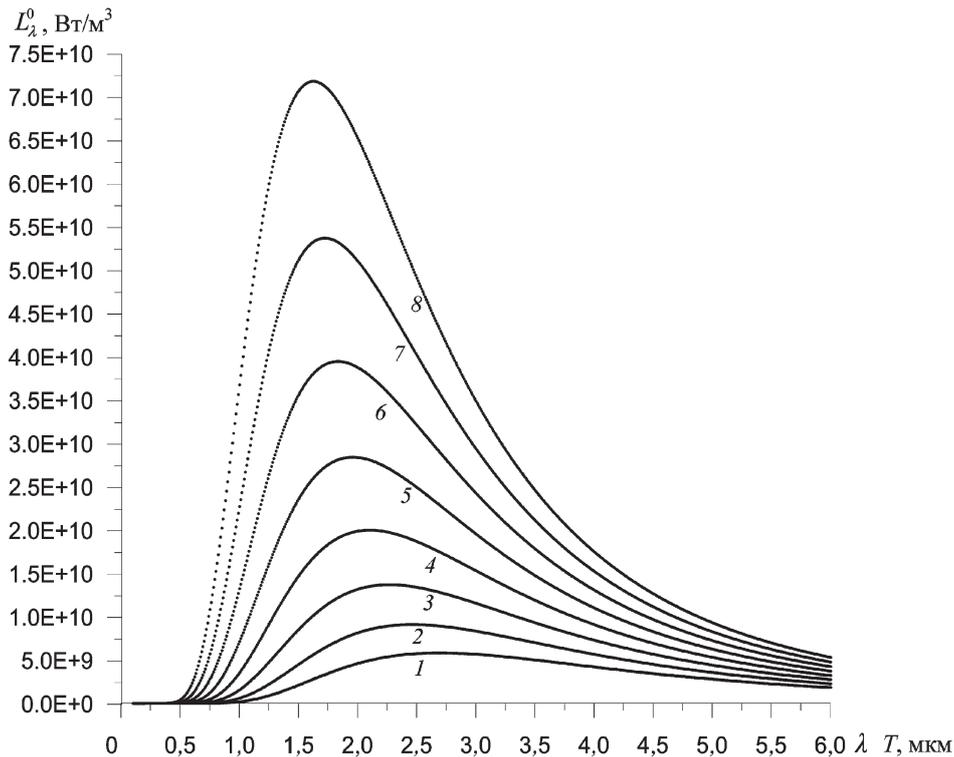


Рис. 1. Зависимость распределения спектральной плотности энергетической яркости излучения абсолютно черного тела от длины волны для разных температур: 1 – 800 °С; 2 – 900; 3 – 1000; 4 – 1100; 5 – 1200; 6 – 1300; 7 – 1400; 8 – 1500 °С

$$L_{\lambda}^0 = C_1 \lambda^{-5} \left(\exp \frac{C_2}{\lambda T} - 1 \right)^{-1}, \quad (1)$$

где $L_{\lambda}^0 = \frac{cU_{\lambda}^0}{4\pi}$ – спектральная энергетическая яркость; U_{λ}^0 – спектральная плотность объемной плотности энергии равновесного излучения; c – скорость света; $C_1 = 2hc^2 = 1,191 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$; $C_2 = \frac{hc}{k} = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$ – общепринятые пирометрические постоянные; h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана; λ – длина волны; T – термодинамическая температура. При значениях произведения λT , когда $\frac{C_2}{\lambda T} \gg 1$, из формулы (1) следует формула Вина:

$$L_{\lambda}^0 = C_1 \lambda^{-5} \exp \left(-\frac{C_2}{\lambda T} \right). \quad (2)$$

Формула (2) дает погрешность расчета L_{λ}^0 , не превышающую 1% для видимой области спектра до $T = 4000 \text{ К}$. Зависимости $L_{\lambda}^0(\lambda, T)$ от λ для температур, соответствующих металлургическим печам, приведены на рис. 1.

Из рисунка видно, что с увеличением температуры основная доля энергии излучения смещается в коротковолновую область спектра.

Излучение реальных тел отличается от излучения черного тела при той же температуре. Связь

между ними устанавливается коэффициентом ϵ , который традиционно в физической литературе называют коэффициентом «черноты» (иногда коэффициентом «серости») или, согласно ГОСТ 7601-78, «коэффициентом направленного теплового излучения» $\epsilon = \frac{L}{L^0}$. Для абсолютно черного тела $\epsilon = 1$. С учетом коэффициента «черноты» формула Вина для реальных тел имеет вид

$$L_{\lambda} = C_1 \epsilon_{\lambda} \lambda^{-5} \exp \left(-\frac{C_2}{\lambda T} \right). \quad (3)$$

Величина $I_{\lambda} = \frac{L_{\lambda} \lambda^5}{C_1}$ является безразмерной и характеризует монохроматическую интенсивность. С введением безразмерной интенсивности и математических преобразований формула Вина принимает вид

$$\ln I_{\lambda} = \ln \epsilon_{\lambda} - \frac{C_2}{\lambda T}. \quad (4)$$

Пирометрические методы определения температуры основаны на соотношениях (3), (4), записанных для различных спектральных участков, в которых проводятся измерения, и соответствующих математических операций над этими соотношениями.

При отсутствии достоверной информации об излучательной способности реальных тел определяются некоторые условные температуры. При знании функции $\epsilon_{\lambda} = \epsilon(\lambda)$ условная температура ста-

новится равной термодинамической (температура изолированной системы, находящейся в термодинамическом равновесии, без теплообмена). При отсутствии таких знаний данные об излучательной способности учитываются в виде априорных поправок, эмпирически устанавливаемых по характеристикам собственного или отраженного излучения конкретного исследуемого объекта [4].

Измеряемые методами оптической пирометрии условные температуры подразделяются на три основных класса: яркостные, радиационные и цветковые [2–5]. Яркостная и радиационная температуры определяются по энергетической яркости излучения в узком монохроматическом интервале и требуют измерения абсолютных значений интенсивности. Цветовая температура не требует измерения абсолютных значений интенсивностей и определяется из отношения интенсивностей излучения в двух или более участках спектра. При этом результат не зависит, например, от внесения неселективных неконтролируемых потерь в измерительных каналах, что является существенным достоинством данного метода.

Для цветового метода специалисты рекомендуют строить измерительные схемы пирометров от двух до четырех спектральных каналов, попарно разнесенных в довольно широком спектральном диапазоне [2, 3]. Аналитические зависимости между определяемыми температурами и измеряемыми интенсивностями показывают, что модификации цветового метода фактически отличаются алгоритмами обработки исходных данных. Поэтому определение температуры цветовыми методами можно проводить на одном приборе, изменяя спектральные элементы и осуществляя обработку получаемых данных по соответствующим алгоритмам.

Простейшим из полихроматических является бихроматический метод. Для бихроматического метода под цветовой температурой $T_{ц}$ понимают температуру абсолютно черного тела, при которой отношение значений спектральной плотности энергетической яркости излучения на двух длинах волн λ_1 и λ_2 реального тела равно отношению значений спектральной плотности энергетической яркости излучения абсолютно черного тела при тех же длинах волн [2, 3].

Согласно определению, из (3) легко получается формула для расчета условной цветовой температуры

$$T_{ц} = \frac{C_2}{\Lambda \ln((I_2/I_1)(\lambda_2/\lambda_1)^5)}, \quad (5)$$

где величину $\Lambda = \lambda_1\lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)$ называют эквивалентной длиной волны для измерения цвето-

вой температуры. При получении (5) учтено, что $\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2}$, т. е. принят постулат, для серого тела коэффициент «черноты» постоянен по спектру, а следовательно, цветовая температура равна термодинамической. Из выражения (5) следует, что в рассматриваемом методе не требуется знать абсолютные значения интенсивностей для различных спектральных участков, а только их отношение, которое может быть измерено как отношение некоторых условных величин, характеризующих его.

Как следует из (5), инструментальная погрешность определения цветовой температуры обусловлена погрешностями измерения отношения I_2/I_1 , т. е. $\Delta(I_2/I_1)$, и погрешностями измерения длин волн λ_1, λ_2 , т. е. $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$. Для наглядности и выбора спектральных элементов анализ указанных погрешностей выполним отдельно.

Согласно теории погрешностей, формула относительной погрешности определения цветовой температуры в зависимости от $\Delta(I_2/I_1)$ имеет вид

$$\left(\frac{\Delta T_{ц}}{T_{ц}}\right)_I = \frac{T_{ц}\Lambda}{C_2} \frac{\Delta(I_2/I_1)}{(I_2/I_1)}, \quad (6)$$

или

$$\left(\frac{\Delta T_{ц}}{T_{ц}}\right)_I = \frac{T_{ц}\Lambda}{C_2} \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_1^2 + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)_2^2}, \quad (7)$$

где $\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_1$ и $\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_2$ – относительные погрешности измерения некоторых условных величин I_1 и I_2 (интенсивностей), иначе отношение шум/сигнал, характерное для оптико-фоторегистрирующего тракта. Из (6) видно также, что результат определения температуры не зависит от внесения неселективных неконтролируемых потерь в измерительные каналы. В этом существенное достоинство метода. При выводе (6), (7) учтено, что основной вклад в погрешность определения температуры вносит погрешность измерения отношения $\Delta(I_2/I_1)$, т. е. $\Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2 = 0$.

Относительная инструментальная погрешность определения цветовой температуры на основании формулы (5), обусловленная погрешностями $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$ измерения рабочих длин волн λ_1, λ_2 , равна

$$\left(\frac{\Delta T_{ц}}{T_{ц}}\right)_{\lambda} = \frac{T_{ц}\Lambda}{C_2} \times \sqrt{\left(\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1}\right)^2 \left(\frac{C_2}{\lambda_1 T_{ц}} - 5\right)^2 + \left(\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2}\right)^2 \left(\frac{C_2}{\lambda_2 T_{ц}} + 5\right)^2}. \quad (8)$$

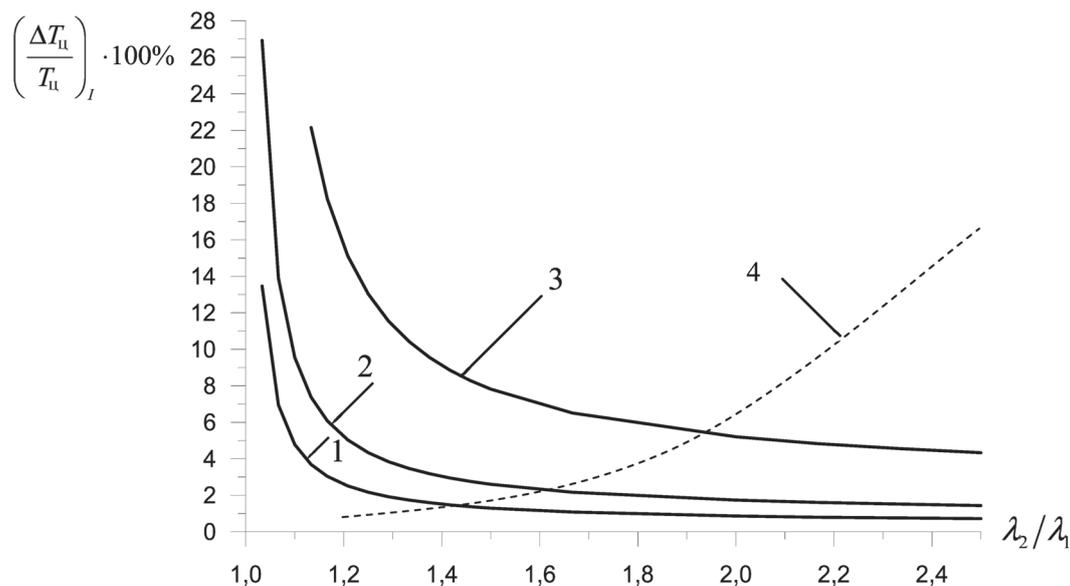


Рис. 2. Расчетные зависимости для оценки и сопоставления инструментальной и методической погрешностей бихроматического метода от отношения λ_2/λ_1 при различных значениях $\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_i$ и $\Delta\lambda_i = 0$ ($i = 1, 2$): $1 - \left(\frac{\Delta I}{I}\right)_1 = \left(\frac{\Delta I}{I}\right)_2 = 0,05$;

$2 - \left(\frac{\Delta I}{I}\right)_1 = \left(\frac{\Delta I}{I}\right)_2 = 0,1$; $3 - \left(\frac{\Delta I}{I}\right)_1 = \left(\frac{\Delta I}{I}\right)_2 = 0,3$; 4 – относительная методическая погрешность

При выводе (6) предполагалось, что $\Delta(I_2/I_1) = 0$.

Формула для относительной методической погрешности определения цветовой температуры имеет вид [3]

$$\delta_{ц} = \frac{\Lambda}{C_2} \ln \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}. \quad (9)$$

Из (9) видно, что при равенстве $\varepsilon_{\lambda_1} = \varepsilon_{\lambda_2}$ на выбранных длинах волн методическая погрешность цветового метода равна нулю.

При стремлении $\lambda_1 \rightarrow \lambda_2$ отношение $\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2}$ приближается к единице, что уменьшает погрешность метода, однако в пределе при $\lambda_1 - \lambda_2 \rightarrow 0$ величины $\delta_{ц} \rightarrow \left(\frac{0}{0}\right)$ и $T_{ц} \rightarrow \left(\frac{0}{0}\right)$ становятся неопределенными, а относительные инструментальные погрешности $\left(\frac{\Delta T_{ц}}{T_{ц}}\right)_{I, \lambda} \rightarrow \infty$, т. е. сам метод

теряет смысл. При увеличении разности $\lambda_1 - \lambda_2$ растет методическая погрешность, поскольку в (9) требуется учет отношения $\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2}$ для далеко отстоящих длин волн. В частности, в [6, 7] приведены некоторые данные о степени «черноты» нагретых тел. В работах [3–5] указывается, что для бихроматического метода оптимум между методической и инструментальной погрешностями наблюдается, когда $1,5 \leq \lambda_2/\lambda_1 \leq 2$. Как следует из теории переноса погрешностей, результирующая относительная погрешность определения цветовой темпера-

туры $T_{ц}$ по формуле (5) представляет собой сумму инструментальной и методической погрешностей.

На рис. 2 приведены расчетные относительные погрешности определения температуры (кривые 1 и 2), полученные по формуле (7) для различных значений отношения $\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_i$ и $\Delta\lambda_i = 0$ ($i = 1, 2$), построенные в зависимости от λ_2/λ_1 . Для сопоставления схематически кривой 4 представлена методическая погрешность бихроматического метода [4].

Из рисунка видно, что с ростом отношения $\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_i$ ($i = 1, 2$) растет относительная ошибка определения температуры $T_{ц}$, а оптимальное соотношение инструментальной и методической погрешностей бихроматического метода находится в диапазоне $1,5 \leq \lambda_2/\lambda_1 \leq 2,0$.

На рис. 3 приведены расчетные относительные погрешности определения температуры для различных значений $\Delta\lambda_i$ и $\Delta I_i = 0$ ($i = 1, 2$) в зависимости от отношения λ_2/λ_1 . Из рисунка видно, что с увеличением значений $\Delta\lambda_1$ и $\Delta\lambda_2$ относительная ошибка определения температуры $T_{ц}$ возрастает, т.е. для обеспечения минимальной погрешности определения температуры необходимо добиваться высокой монохроматичности спектральных элементов.

Выбор фоточувствительных элементов для регистрации интенсивностей и соответствующих им фильтров для выделения спектральных участков зависит от диапазона определяемых температур,

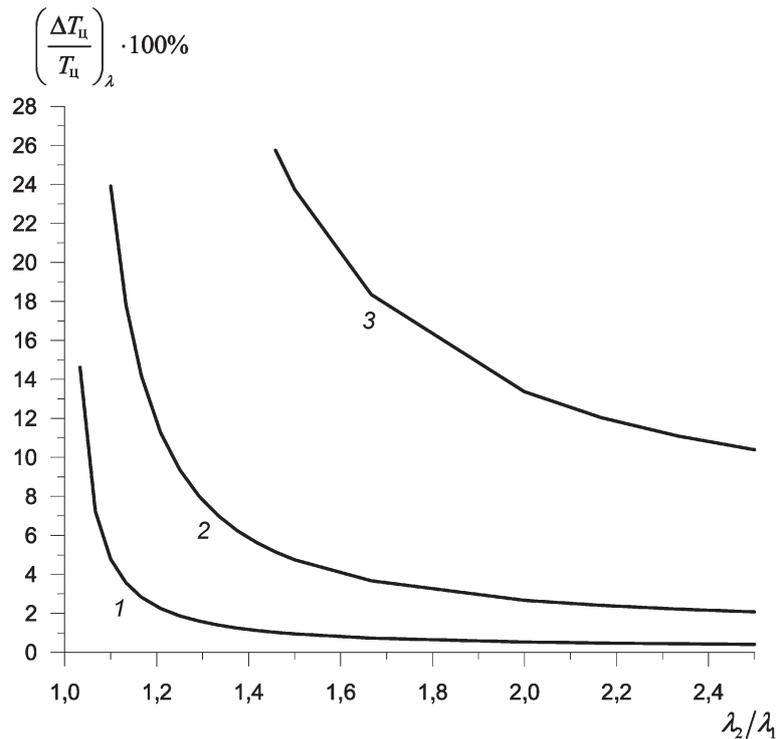


Рис. 3. Расчетные зависимости для оценки инструментальной погрешности определения цветовой температуры от отношения λ_2/λ_1 при различных значениях $\Delta\lambda_i$ и $\Delta I_i = 0$ ($i = 1, 2$): 1 – $\Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2 = 2$ нм; 2 – $\Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2 = 10$; 3 – $\Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2 = 50$ нм

поскольку необходимо согласовывать спектральные кривые для излучательных способностей исследуемого объекта со спектральными кривыми чувствительностей существующих фоторегистрирующих элементов и спектральными характеристиками приборов, обеспечивающих прохождение интенсивности выбранной длины волны.

Сформулированную выше задачу необходимо решить выбором и комбинациями существующих фоточувствительных элементов и спектральных приборов, каковыми являются призмы, решетки, светофильтры.

Применение призм (монохроматоров) в качестве фильтрующих спектральных элементов приведет к усложнению и громоздкости измерительной схемы. Дифракционная решетка сильно ослабит сигнал, требует тонкой угловой настройки. Наиболее приемлемым вариантом по простоте конструкции являются светофильтры. Существуют два образца светофильтров: абсорбционный и интерференционный.

Необходимой селективности и высокой монохроматичности проще всего добиться с использованием интерференционных светофильтров. На рис. 4 приведены кривые пропускания использованных нами интерференционных светофильтров.

Наиболее распространенными и дешевыми на сегодняшний день, чувствительными в широком диапазоне длин волн, являются кремниевые и германиевые фотодиоды. Для примера на рис. 5 при-

ведены кривые чувствительности для кремниевого фотодиода марки BPW24R.

Имеются также фотодиоды, чувствительные в узком спектральном диапазоне. Соответствующие кривые чувствительности приведены на рис. 6.

Как показывает анализ спектральных характеристик и чувствительностей фотодиодов, наиболее оптимальной и недорогой в исполнении измерительная схема должна состоять из кремниевого или германиевого фотодиода в комбинации с интерференционными светофильтрами. Лучше использовать германиевые фотодиоды, имеющие более широкую полосу чувствительности в длинноволновую область спектра 0,4–1,5 мкм. При этом фотодиоды должны иметь минимально необходимую фоточувствительную площадку, чтобы избежать лишних шумов, и индивидуально измеренную спектральную чувствительность, т.е. должны пройти индивидуальную калибровку.

Как видно из рис. 1, для температур, соответствующих понятию «жидкий» металл, основная доля энергии излучения приходится на длинноволновую область спектра 1–3 мкм. В области спектра от 0,5–1,0 мкм уже первоначально получаемый оптический сигнал будет слабым. Вследствие ожидаемых многократных потерь при стыковке оптических элементов, потерь при передаче сигнала на расстояние трудно ожидать уверенную регистрацию оптического сигнала. Для уверенной регистрации слабых сигналов, как хорошо извест-

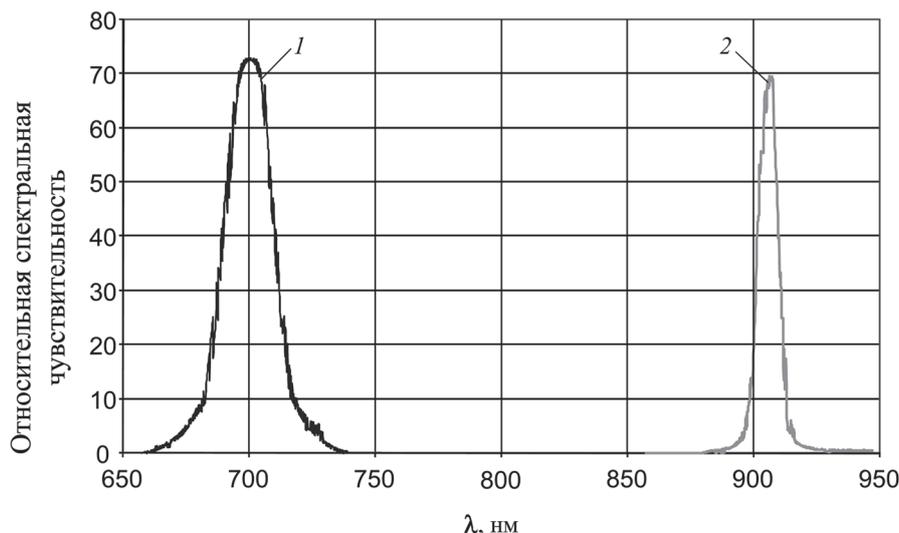


Рис. 4. Кривые пропускания интерференционных фильтров: 1 – $\lambda_{cp} = 702$ нм; 2 – $\lambda_{cp} = 912$ нм

но, применяется его модуляция с последующей, хорошо освоенной техникой регистрации методами синхронного детектирования. При этом, как также хорошо известно, частота модуляции должна быть несколько сотен герц, чтобы уйти от паразитных промышленных частот.

Функциональная схема пирометра зависит от условий эксплуатации прибора и алгоритма измерения, который в нем применяется. Наиболее подходящим для данной цели является так называемый двухканальный алгоритм измерения, который обладает рядом преимуществ в сравнении с одноканальным.

При таком алгоритме измерения температуры поверхности нагретого тела результат измерения не зависит ни от того, какую часть поля зрения пирометра заполняет поверхность нагретого тела, ни от того, попали ли в поле зрения прибора, кроме нагретого тела, еще какие-либо «холодные» тела. Необходимо только, чтобы доля энергии, падающей в объектив пирометра, была достаточной относительно чувствительности пирометрических сенсоров.

При односпектральном алгоритме измерения в случае, если проекция нагретого тела не занимает все поле зрения пирометра, а только какую-то его часть, результаты измерения температуры будут искажены. То же самое произойдет, если в поле зрения пирометра, кроме нагретого тела, попадут и другие предметы или конструктивные элементы.

Пирометры спектрального отношения в отличие от пирометров измерения полной энергии излучения обладают и другими преимуществами. В них результаты измерения температуры не зависят от температуры окружающего воздуха в пределах рабочего диапазона температур. Кроме того, мультипликативная составляющая долговремен-

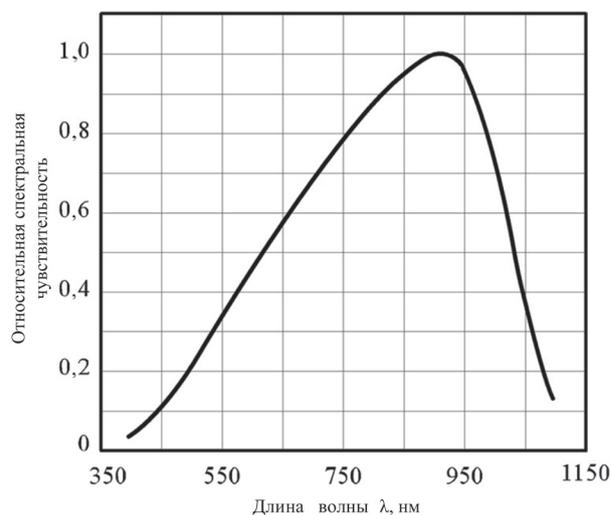


Рис. 5. Зависимость относительной спектральной чувствительности кремниевого светодиода марки BPW24R

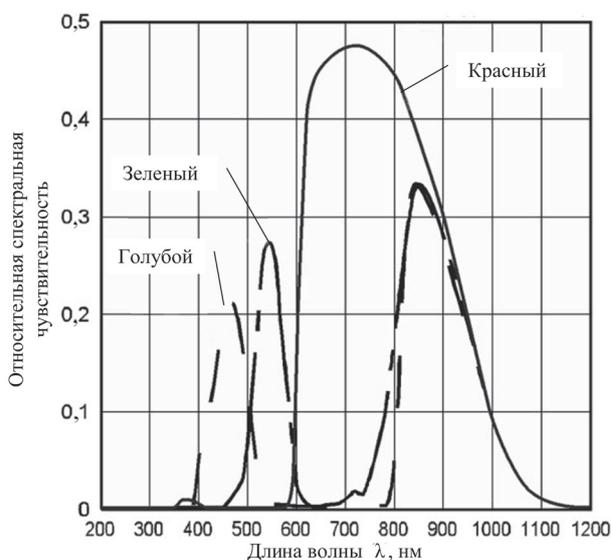


Рис. 6. Зависимость относительной спектральной чувствительности селективно чувствительного кремниевого светодиода марки RGB

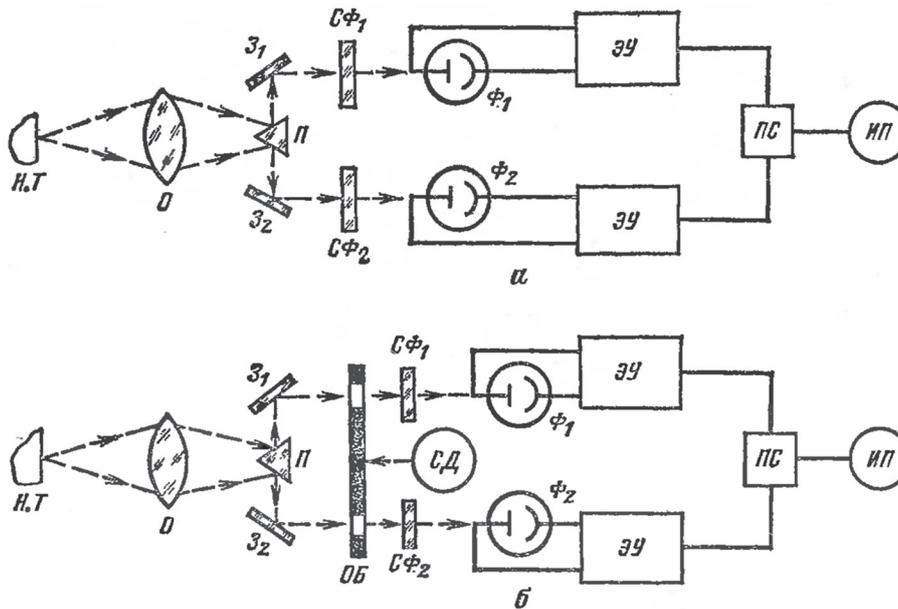


Рис. 7. Классические функциональные схемы двухканальных пирометров

ной погрешности (как следствие, деградации элементов прибора) в пирометрах спектрального отношения пренебрежимо мала, вследствие чего при его периодических калибровках компенсируется только аддитивная часть составляющей долговременной погрешности.

В последнее время этот класс пирометров получает все большее распространение благодаря свойствам цветовой температуры, которую они измеряют. Показания пирометра, измеряющего цветовую температуру, зависят не от абсолютного значения коэффициента излучения измеряемого объекта, а только от характера изменения его значения [8]. При этом для «серого» тела (с любым значением $\epsilon_\lambda = \text{const}$) цветовая температура равна действительной температуре тела. На показание такого пирометра не оказывает влияние неселективное поглощение промежуточной среды (пыль, дым, смотровые окна и т. д.). Во всяком случае часто (но не всегда) это влияние так же, как и влияние ϵ_λ , может быть меньше, чем в случае использования какого-либо энергетического пирометра [3, 9]. Показания пирометров спектрального отношения меньше зависят от размеров объекта измерения, чем показания пирометров энергетического типа.

На рис. 7 показаны классические функциональные схемы двухканальных пирометров спектрального отношения [10]. На рис. 7, а излучение от нагретого тела (Н.Т) после объектива (О) с помощью призмы (П) раздваивается и направляется через светофильтры (СФ1 и СФ2) (например, красный и синий) на два фотоэлемента (Ф1 и Ф2). Сигналы фотоэлементов, преобразованные усилителя-

ми (ЭУ), подаются на пересчетную схему (ПС), выполняющую функции делительного звена.

Недостатком рассмотренной схемы пирометра является зависимость характеристик от стабильности преобразующих элементов каждого канала.

Схема двухканального пирометра спектрального отношения (рис. 7, б) имеет дисковый обтюратор (ОБ), служащий для модуляции потока лучистой энергии. Наличие в схеме прибора модулятора света позволяет использовать более стабильные усилители переменного тока, однако нестабильность фотоэлементов здесь может служить источником погрешностей.

Поскольку при измерениях требуется как можно более узкая полоса спектра, термин «пирометр спектрального отношения» все чаще заменяется на термины «бихроматический» или «двухцветный». Это необходимо учитывать при выборе пирометров из проспектов фирм-изготовителей.

В сложных производственных условиях, таких, как сталеплавильное производство, термообработка, плавка руды, формовка катанки и прута, индукционный нагрев, вращающиеся печи, где затруднен непосредственный оптический контакт, применяют пирометры с оптоволоконным кабелем, передающим сигнал яркости от нагретого объекта к фотоприемникам. На рынке многими фирмами предлагаются самые разные пирометры данного типа. В таблице для примера приведены характеристики пирометров двух фирм-изготовителей.

Светопроводящий стержень является одной из основных деталей световодного пирометра, от его работы зависит функционирование всей системы

Оптоволоконные двухцветные пирометры

Параметр	Пирометр ТЕРМОКОП 600-2С-ВТО	Пирометр FR 1В
Температурный диапазон, °С	700–1500	700–1500
Точность от измеряемой температуры, %	0,75	0,3
Разрешение, °С	1,0	1,0
Выход цифровой	RS-485	RS-485
Температура окружающей среды, °С:		
оптическая головка	от –30 до 200	от 0 до 200
оптоволоконный кабель	от –30 до 200	до 200
контроллер	от –10 до 60	от 0 до 60
Длина оптоволоконного кабеля, м	2, 5, 10, 15, 20 или более по согласованию	1, 3, 6, 10
Масса не более, кг:		
оптическая головка	0,3	0,1
контроллер	1,5	0,71
Спектральный диапазон, мкм	0,9–1,0 (Si/Si фотоприемники)	1,0 (Si/Si фотоприемники)
Производитель	ИНФРАТЕСТ, Екатеринбург	Raytek, транснациональная корпорация

в целом: надежность, точность получаемых измерений, защищенность от воздействий внешней (измеряемой) агрессивной среды. Он должен работать при температурах выше 1500 °С в контакте с жидким металлом, обладать требуемыми оптическими и механическими свойствами, срок службы материала стержня должен превышать срок службы футеровки печи.

В различных оптических системах, работающих при большой температуре, широко применяются кварц и сапфир [1, 6, 7, 8–12]. Кварц обладает следующими недостатками: при высокой температуре происходит диффузия ионов металлов в поверхностный слой светопровода, приводящая к уменьшению интенсивности проходящего света; рабочая температура не превышает 1400 °С; срок службы светопровода ограничен процессами кристаллизации, проходящими в материале при высокой температуре.

В связи с этим для изготовления световодного стержня решено применять сапфир.

Сапфир (кристалл корунда) обладает исключительным комплексом полезных свойств: высокой температурой плавления, химической стойкостью, большой твердостью, малым коэффициентом трения, оптической прозрачностью в широком диапазоне длин волн [19].

Нами была выбрана функциональная схема световодного пирометра (рис. 8), которая состоит из фокусирующей системы, включающей светопроводящий стержень 1, фокусирующую линзу или систему линз 2. Энергия излучения жидкого металла, прошедшая через фокусирующую систему пирометра и оптоволокно 3, попадает на светоделительную призму 4, после чего разделяется на два потока, проходящих через различные фильтры б и попадающих каждый на соответствующий ему

фотоприемник 7. Далее каждый из сигналов фотоприемника проходит через свою цепочку усилитель 8, АЦП 9 и попадает на два различных входа контроллера 10, вычисляющего цветовую температуру и осуществляющего вывод информации о ней на табло или компьютер.

Изготовлен экспериментальный образец световодного пирометра, включающий в себя фокусирующий, детектирующий узлы и вторичный преобразователь. Кроме того, в состав пирометра входит портативный компьютер, служащий для регистрации показаний фотоприемников пирометра и калибровочной термопары, а также анализа получаемых данных в реальном режиме времени.

Общий вид стенда для испытания изготовленного световодного пирометра показан на рис. 9.

Световодный стержень установлен в отверстие графитового тигля и непосредственно контактирует с расплавленным металлом, напротив него в углублении установлена эталонная термопара (рис. 10).

Вся конструкция, состоящая из тигля, фокусирующего узла пирометра и термопары, помещается в шахтную печь и нагревается до 1200 °С. В тигель загружалась шихта сплава BrO10Ф1 с температурой плавления 840 °С.

Тепловое излучение, проходя через сапфировый световод и систему линз фокусирующего узла, попадает в оптоволокно 3, связывающее фокусирующий 2 и детектирующий узлы 4. В детектирующем узле излучение разделяется на два луча, которые, проходя через интерференционные фильтры, попадают на фотодиоды со встроенными операционными усилителями, питающиеся от блока питания 5. Таким образом, излучение разделяется на спектральные составляющие, соответствующие полосе пропускания светофильтра, и преобразуется в аналоговый электрический сигнал. Аналого-

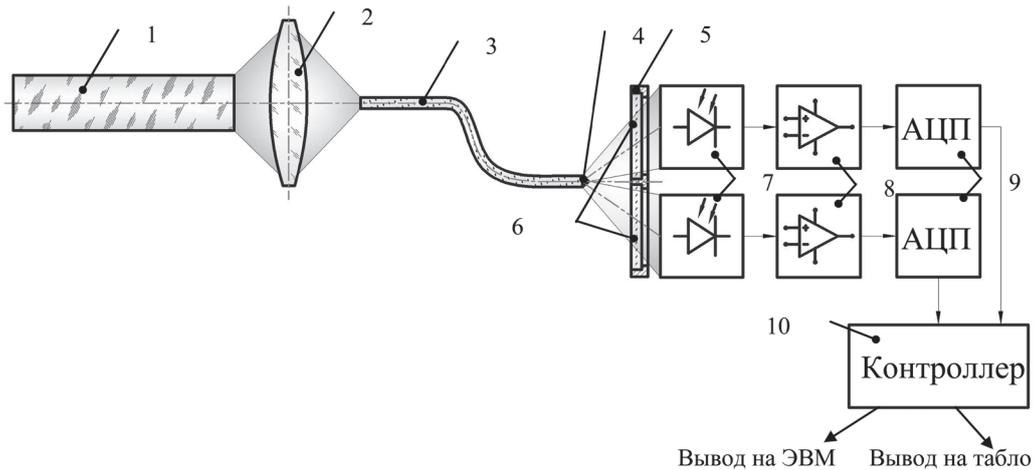


Рис. 8. Функциональная схема системы непрерывного контроля температуры расплава со светоделительной призмой

вый сигнал подается на вход модуля аналоговых входов контроллера 6. Контроллер служит для предварительной обработки полученного сигнала (в том числе для преобразования его в значение цветовой температуры) и передачи его в компьютер 7 для контроля, регистрации и постобработки.

Аппаратно-программный комплекс позволяет измерять и регистрировать температуру в печи, измеряемую термопарой; измерять и регистрировать излучение жидкого металла; преобразовывать значение излучения в цветовую температуру; управлять выносным индикаторным устройством; осуществлять калибровку пирометра по эталонной термопаре; осуществлять мониторинг работы пирометра в реальном режиме времени.

Были проведены измерения изменения интенсивности излучения жидкого металла на разных

длинах волн в зависимости от температуры. По рекомендациям данных при анализе теоретических расчетов были подобраны светофильтры с максимумом спектра излучения 912 и 702 нм (см. рис. 4). Экспериментальная зависимость отношения интенсивностей излучения жидкого металла от температуры 800–1150 °С приведена на рис. 11.

С помощью формул (1) и (5) несложно рассчитать теоретическую зависимость отношения интенсивностей серого тела от температуры. Как видно из рис. 11, характер зависимости сохраняется, но измерительный тракт вносит определенную поправку (ΔK), постоянную для пирометра с неизменными параметрами и конструкцией измерительного тракта. К элементам, вносящим данную погрешность, относятся фокусирующий узел

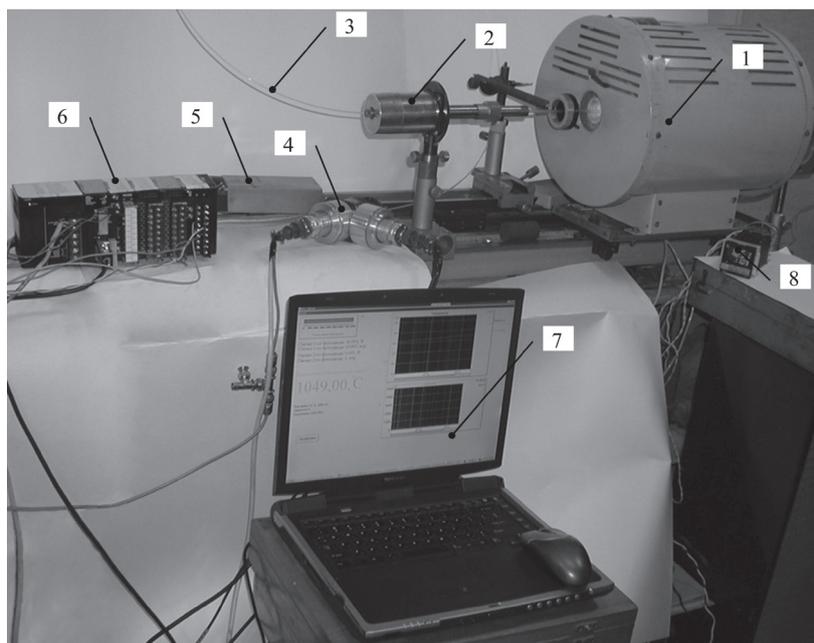


Рис. 9. Общий вид испытательного стенда: 1 – трубчатая печь; 2 – фокусирующий узел; 3 – оптоволокно; 4 – детектирующий узел; 5 – блок питания фотодиодов; 6 – вторичный преобразователь; 7 – портативный компьютер с запущенной программой для анализа и записи показаний пирометра; 8 – терморегулятор для управления печью

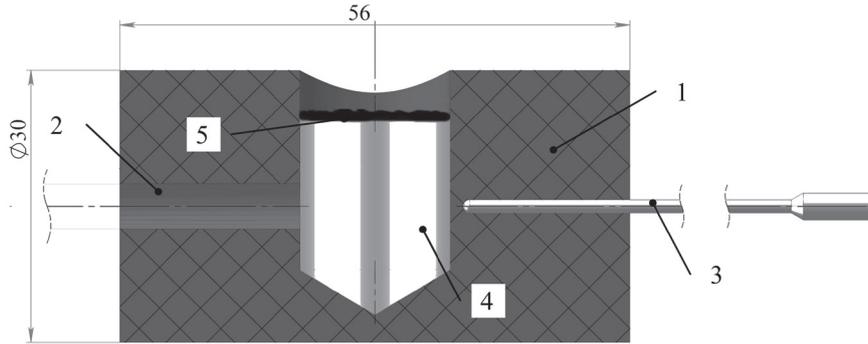


Рис. 10. Схема установки световода и термопары в тигель: 1 – графитовый тигель; 2 – сапфировый стержень; 3 – термопара; 4 – металл; 5 – слой флюса

(потери при передаче сигнала через сапфировый стержень и систему линз, зависящие от длины волны излучения), оптоволоконно (разность коэффициентов поглощения для различных длин волн), делительный кубик (не пропорциональное деление луча на две составляющие), интерференционные светофильтры (различия в частотных характеристиках светофильтров), фотодиоды (два фотодиода будут иметь небольшие различия во вносимых ими шумах и зависимостях выходного аналогового электрического сигнала от интенсивности попадающего на него излучения), усилители фотодиодов (различные коэффициенты усиления для каждого из фотодиодов), модуль аналоговых входов контроллера (различные диапазоны измеряемого аналогового сигнала). При этом не учитывается изменение отношения $\epsilon_{\lambda_1}/\epsilon_{\lambda_2}$, так как в нашем случае длины волн λ_1 и λ_2 находятся рядом и это изменение будет минимальным. Исходя из сказанного выше и уравнений (1) и (5), экспериментальное значение цветовой температуры будет равно:

$$T_{ц} = \frac{C_2}{\Lambda \ln(\Delta K (I_{2\lambda} / I_{1\lambda}) (\lambda_{2\lambda} / \lambda_{1\lambda})^5)}, \quad (10)$$

где $I_{1\lambda}$ и $I_{2\lambda}$ – некоторые условные величины, характеризующие абсолютное значение световых интенсивностей для разных участков спектра (абсолютное значение аналогового электрического сигнала на входе модуля контроллера); $\lambda_{1\lambda}$ и $\lambda_{2\lambda}$ – максимумы спектров излучения применимых интерференционных фильтров.

Согласно проведенным расчетам, $\Delta K \approx 5,44$. Анализ полученных данных показывает, что показания изготовленного световодного пирометра соотносятся с теоретическими расчетами, проведенными ранее и, как следствие, могут с достаточной точностью быть откалиброваны с помощью эталонной термопары; зависимость между отношением интенсивностей и температурой может быть найдена с помощью полиномиальной регрессии (коэффициент регрессии более 0,9997).

Выводы

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено.

1. В качестве пирометрического метода использовать метод, основанный на определении цветовой температуры, измерительные каналы необходимо разнести в широком спектральном диапа-

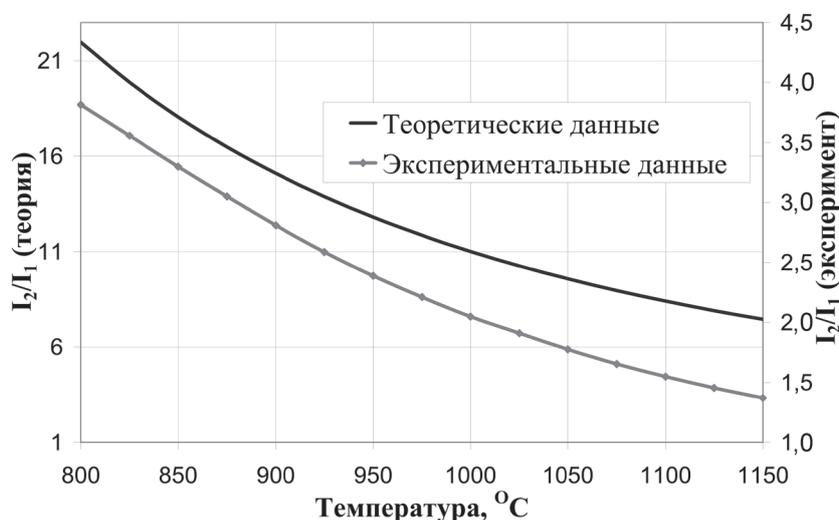


Рис. 11. Зависимость отношения интенсивностей излучения жидкого металла от температуры

зоне с целью оптимизации использовать длины волн, удовлетворяющие отношению $1,5 \leq \lambda_1 / \lambda_2 \leq 2,0$, в качестве фотоприемников следует использовать надежные, малошумящие, высокоскоростные и дешевые кремниевые фотодиоды, в качестве спектральных элементов – высокомонохроматичные интерференционные светофильтры. При невысоких температурах (до 800 °С) для уверенной регистрации сигнал необходимо модулировать на частоте нескольких сотен герц и воспользоваться методами синхронного детектирования.

2. Экспериментально подтверждено, что механические и оптические свойства сапфира позволяют применять его в качестве материала для изготовления светопроводящего стержня пирометра, контактирующего с расплавами цветных и черных металлов с температурой плавления от 800 до 1600 °С, устанавливаемого в футеровку плавильной или раздаточной печи.

3. Изготовлен экспериментальный образец пирометра, проведены стендовые испытания пирометра в лабораторной трубчатой печи. Анализ полученных данных показывает, что:

- показания изготовленного световодного пирометра соотносятся с теоретическими расчетами,

проведенными ранее и, как следствие, могут с достаточной точностью быть откалиброваны с помощью эталонной термопары;

- зависимость между отношением интенсивностей и температурой может быть найдена с помощью полиномиальной регрессии (коэффициент регрессии более 0,9997);

- применение эталонной термопары избавляет от использования стенда абсолютно черного тела (стоимость порядка 120 млн. бел. руб.) и может быть реализовано в заводской лаборатории;

- применение данного световодного тракта позволяет измерять температуру жидкого металла в наиболее информативной части печи, для печей большой емкости, вероятно, потребуется несколько точек для съема показаний температуры;

- наличие на рынке большого ассортимента двухцветных пирометров позволяет предполагать их использование с предлагаемым световодным трактом.

4. Элементарные ориентировочные расчеты показывают экономическую эффективность использования рассмотренной схемы измерения температуры расплава, когда температура соответствует таковой технологического процесса без какого-либо перегрева.

Литература

1. Жуков Л. Ф. Новые технологии температурного и экспрессного теплофизического контроля для металлургии и металлургии машиностроения // *Литье и металлургия*. 2006. №3. С. 50–57.
2. Физический энциклопедический словарь / Под. ред. А.М. Прохорова. М.: Советская энциклопедия, 1983.
3. Снопко В. Н. Спектральные методы оптической пирометрии нагретой поверхности. Мн.: Наука и техника, 1988.
4. Свет Д. Я. Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982.
5. Снопко В. Н. Основы методов пирометрии по спектру теплового излучения. Мн.: Наука и техника, 1999.
6. Малышев В. И. Введение в экспериментальную спектроскопию. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.
7. Петров В. А. Излучательная способность высокотемпературных материалов. М.: Наука, 1969.
8. Олейник Б. Н., Лаздина С. И., Лаздин В. П., Жагулло О. М. Приборы и методы температурных экспериментов: Учеб. пособ. для учащихся средних специальных учебных заведений по специальности «Электротеплотехнические измерения». М.: Изд-во стандартов, 1987.
9. Герашенко О. А., Федоров В. Г. Тепловые и температурные измерения. Киев: Наукова думка, 1965.
10. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения. 3-е изд. М.: Энергия. 1978.
11. А. с. 1365870 СССР: МКИ G01J5/08: Устройство для определения температурного поля сопловых лопаток турбины газотурбинного двигателя / В. Н. Блатов, А. В. Игнатов, М. В. Мартянов и др.
12. Пат. 2015827 Россия: МКИ B22D11/16. Способ контроля технологического процесса непрерывной разливки металла и устройство для его осуществления / Г. А. Ляхов, А. И. Минченко, А. Е. Резников.
13. Пат. 2029259 Россия: МКИ G01J5/08. Устройство для измерения температуры расплава в тигле и способ измерения температуры расплава в тигле / В. Д. Сергеев, Б. Е. Карасев, Л. И. Шалагин.
14. Пат. 2267751 Россия: МКИ G01J5/08, G01K11/00. Способ непрерывного измерения температуры расплавленной стали и применяемая для этого труба / Се Чжи, Чэнь Жужюнь, Мэн Хунци.
15. Пат. 2290614 Россия: МКИ G01J 5/60 Двухканальный пирометр спектрального отношения. С. С. Сергеев.
16. Пат. 2426331 Великобритания: МКИ8 G01K11/12; G01K11/32; G01D5/353. Method for measuring using optical fibre distributed sensor / Yamate Tsutomu (Яония); Schroeder Robert J (США).
17. Пат. 4468771 США: НКИ 374/131, 356/44, 374/139: МКИ G01J5/04. Light-guide unit for transmitting thermal radiation from molten metal to pyrometer / L. F. Zhukov, E. G. Chugunny, V. S. Shumikhin. СССР.
18. Пат. 4533243 США: НКИ 356/44, 374/139, 385/12: МКИ G01J5/04. Light guide for transmitting thermal radiation from melt to pyrometer and method of measuring temperature of molten metal in metallurgical vessel with the aid of said light guide / L. F. Zhukov, E. G. Chugunny, G. P. Samchenko и др.
19. Рубин и сапфир / Под. ред. Л. М. Беляева. М.: Наука, 1974.
20. Петренко В., Цубин А., Ковальчук Л. Пирометрический комплекс для дистанционного измерения температуры поверхностей нагретых объектов // *Датчики и системы*. 2007. № 8. С. 26–29.