

УДК 526.521.3

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МНОГОЦВЕТОВОЙ ТЕРМОМЕТРИИ

© Жуков Леонид, Корниенко Андрей, Богдан Александр, Крупник Виталий, Крупник Людмила,
Писаренко Валерий, Костановский Валерий, 2012

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,
*Институт кибернетики НАН Украины, **ДП “НИИ “КВАНТ””

За результатами досліджень обґрунтовано напрями та розроблено фізичні основи, методи і засоби багатокольорової безконтактної і світловодної пірометрії випромінювання. Порівняно з класичною енергетичною та спектрального відношення пірометрією випромінювання багатокольорова технологія знижує похибки безконтактної і світловодної оптичної термометрії в 2–15 разів.

В результате представленных исследований обоснованы направления и разработаны физические основы, методы и средства многоцветовой бесконтактной и световодной пирометрии излучения. По сравнению с классической энергетической и спектрального отношения пирометрией излучения многоцветовые технологии снижают погрешности бесконтактной и световодной оптической термометрии в 2–15 раз.

As a result of represented researches they have based directions and developed physical foundations, methods and means of multicolor contactless and light-guide thermometry. In comparison with the classical energy and twocolor thermometry, developed multicolor thermometry technologies reduces errors of the contactless and light-guide temperature measurements in 2-15 times.

1. Вступление. Классические технологии бесконтактной оптической термометрии могут быть использованы на открытых контролируемых объектах, без калибровки, в случае черного тела для энергетической, а также черного и серого тел – для двухцветовой пирометрии излучения. В других условиях возможности классической оптической термометрии ограничены известными проблемами – нестабильностью излучательной способности объекта и пропускания промежуточных сред. Кроме того, эти технологии также не обеспечивают термоконтроль закрытых объектов, например, покрытых шлаком металлических расплавов в металлургических агрегатах. Современные материалы, а также оптические и электронные технологии стимулируют интенсивное развитие многоцветовых бесконтактных и световодных технологий. Эти технологии направлены на решение указанных двух проблем современной оптической термометрии.

2. Изложение основного материала. Физические основы термодинамически равновесной классической энергетической и спектрального отношения оптической термометрии были разработаны к 1930 г. В основы прежде всего были заложены законы Кирхгофа, Релея-Джинса, Вина, Планка, Стефана-Больцмана и Ламберта. В последующие годы эти законы получили дальнейшее развитие. В настоящее время

насчитывается более 60 их формулировок, описывающих различные параметры взаимодействия теплового электромагнитного излучения с веществом в условиях термодинамического равновесия [1].

Яркость – основная физическая величина, регистрируемая любой пирометрической системой. По упрощенному закону Вина яркость описывается таким уравнением

$$b_{1T} = 2hc^2 I^{-5} e^{\left(\frac{hc}{k \cdot I \cdot T}\right)},$$

и определяется температурой T , общей в состоянии равновесия для двух материальных субстанций – вещества и поля, где $c_1=2hc^2$ – первая постоянная Планка, Вт·м²; $c_2=hc/k$ – вторая постоянная Планка, К·м; h – постоянная Планка, Дж·с; c – скорость света, м/с; k – постоянная Больцмана, Дж/К; I – длина волны, м; T – температура, К.

Термодинамически равновесная оптическая термометрия базируется на прямом использовании фундаментальных физических законов теплового излучения и обеспечивает максимально возможную безальтернативную на сегодня точность при метрологических измерениях температуры. Поэтому ее используют для построения термодинамической и международной практической температурных шкал, а также для градуировки температурных эталонов, образцовых и рабочих пирометров.

В производственных условиях равновесие встречается редко и всё взаимодействие сводится к испусканию открытой поверхностью с температурой T теплового излучения с температурой S , которые можно связать таким обобщающим пирометрическим уравнением

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{S} = \frac{[OXПС]}{c_2} \ln[OXТO],$$

где ОХТО – оптические характеристики термометрируемого объекта; ОХПС – оптические характеристики пирометрической системы.

Из этого уравнения можно вывести пирометрические уравнения для классической, в том числе для наиболее метрологически совершенной энергетической одноцветовой и спектрального отношения двухцветовой оптической термометрии

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{S_{1\lambda}} = \frac{I_{\lambda\phi}}{c_2} \ln[e_{I\lambda\phi} \cdot t_{I\lambda\phi}] \text{ и}$$

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{S_{2\lambda}} = \frac{\left(\frac{I_1 \cdot I_2}{I_2 - I_1}\right)}{c_2} \ln\left[\frac{e_1 \cdot t_1}{e_2 \cdot t_2}\right],$$

где T – температура термометрируемой поверхности, К; $S_{1\lambda}$ – одноцветовая температура излучения термометрируемой поверхности, К; $I_{\lambda\phi}$ – эффективная длина волны пирометрической системы, м; $e_{I\lambda\phi}$ – спектральная излучательная способность термометрируемой поверхности; $t_{I\lambda\phi}$ – спектральное пропускание промежуточной среды; $S_{2\lambda}$ – двухцветовая температура излучения термометрируемой поверхности, К; $I_{\lambda} = I_1 \times I_2 / (I_2 - I_1)$ – эквивалентная длина волны пирометрической системы, м; $e_{\lambda} = e_1 / e_2$ – эквивалентная излучательная способность термометрируемой поверхности; $t_{\lambda} = t_1 / t_2$ – эквивалентное пропускание промежуточной среды.

Анализ приведенных пирометрических уравнений определяет возможности классической одноцветовой и двухцветовой пирометрии излучения. Без введения температурных поправок измеряемая одноцветовая температура излучения $S_{1\lambda}$ равна искомой температуре поверхности T только в случае термодинамического равновесия, для которого $e_{I\lambda\phi} = 1$ и $\ln I = 0$. При технических и тем более метрологических измерениях температур проблема пропускания не является самой сложной и решается известными приёмами, в том числе использованием продуваемых фурм, смотровых окон с определёнными $t_{\lambda\phi}$ и т.д. Поэтому при оценке

возможностей мы принимаем $t_{\lambda\phi} = 1$ и не рассматриваем его. При переходе к двухцветовой пирометрии излучения возможности оптической термометрии значительно расширяются. Здесь $S_{2\lambda} = T$, как для термодинамически равновесного излучения, когда $e_1 = e_2 = 1$ и $\ln e_1 / e_2 = 0$, так и для серого излучения, для которого $e_1 = e_2 < 1$ и также $\ln e_1 / e_2 = 0$. На практике серые излучатели встречаются значительно чаще, чем термодинамические равновесные. Например, таковыми являются многие металлы и их сплавы в коротковолновой части видимого спектра, а также непрозрачные оксидные плёны на поверхности металлических расплавов на некоторых участках видимого и инфракрасного диапазонов.

Следуя этой логике, естественно предположить, что увеличивая количество длин волн, т.е. переходя от классической к многоцветовой пирометрии излучения, можно значительно расширить возможности оптической термометрии и прежде всего для наиболее распространенных окрашенных тел. Эти возможности следуют из пирометрического уравнения многоцветовой оптической термометрии

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{S_{m\lambda}} = \frac{I_{\lambda}}{c_2} \ln e_{\lambda}, \quad (1)$$

где I_{λ} – эквивалентная длина волны, м; e_{λ} – эквивалентная излучательная способность термометрируемой поверхности; $S_{m\lambda}$ – многоцветовая температура излучения термометрируемой поверхности n -го порядка, К.

Например, при $n=3$ $e_{\lambda} = e_1 e_3 / e_2^2$ и $I_{\lambda} = 1 / (I_1^{-1} - 2I_2^{-1} + I_3^{-1})$, $n=4$ $e_{\lambda} = e_1 e_4 / e_2 e_3$ и $I_{\lambda} = 1 / (I_1^{-1} - I_2^{-1} - I_3^{-1} + I_4^{-1})$ и т.д. [2].

Анализ этого уравнения, и прежде всего его эквивалентных параметров e_{λ} и I_{λ} , определяет основополагающие направления развития многоцветовой оптической термометрии. Выполненные ранее для исключения методических погрешностей разработки и сложные математические преобразования в итоге сводятся к решению не сформулированных прежде задач – определению таких значений длин волн для реальных яркостей или корректировок на фиксированных волнах спектральных яркостей термометрируемого объекта, при которых его эквивалентная излучательная способность равна единице [3–6]. Например, в работе [3] доказано, что в пределах применимости закона Вина любая производная логарифма яркости по длине волны является

монотонной функцией температуры термодинамически равновесного излучения. Исходя из этого, выведено уравнение, связывающее трёх- и четырёхцветовые температуры излучения с температурой объекта. Получены выражения, описывающие спектральные распределения излучательной способности

$$e = \exp(b+kI^a), \quad e = kI^a \quad \text{и} \quad e = k(I+I)^a,$$

а также расчетные формулы значений длин волн для них, при которых $e_s = 1$ т.е. $S_{3\lambda} = T$ и $S_{4\lambda} = T$. Эти и другие известные математические преобразования направлены на поиск связей между S и T и условий, в том числе спектральных распределений $e = f(I)$ или корректировок спектральных яркостей объекта, при которых $S = T$, т.е. в итоге на решение указанных задач. Авторами доказано, что в достаточно широком спектральном диапазоне можно практически всегда определить длины волн, на которых e_s равна или достаточно близка к 1 для любых реальных распределений излучательной способности (1). При $e_s \gg 1$ на выбор рабочих длин волн накладывается дополнительное условие, при котором I_s не должна превышать значение, определяемое требуемой точностью измерений температуры. При более подробном рассмотрении методов многоцветовой термометрии с позиций решения указанных задач эту классификацию можно детализировать и существенно расширить.

Бурное развитие и современное состояние оптических и электронных технологий, в том числе оптоэлектронных, волоконно-оптических, микропроцессорных и компьютерных, способствуют значительному снижению инструментальных погрешностей пирометрических систем и стимулируют разработку новых направлений многоцветовой пирометрии излучения. В настоящее время оптическая термометрия по инструментальным погрешностям не уступает термоэлектрической. Поэтому погрешности безальтернативных во многих случаях оптических, в том числе многоцветовых измерений температуры, определяются исключительно методическими составляющими, которые в свою очередь в основном предопределяются неизвестными и случайно изменяющимися значениями излучательной способности термометрируемых объектов и пропусканием промежуточных сред.

При определённой T (1) много-, в том числе трёхцветовые температуры излучения зависят от оптических спектральных характеристик пирометрических

систем I_s и термометрируемых объектов e_s . Поэтому для определения предполагаемых возможностей многоцветовой пирометрии излучения прежде всего необходимо изучить оптические термометрические характеристики объектов, в том числе их излучательную способность и пропускание промежуточных сред. Наиболее представительными для такого изучения являются металлические сплавы, диапазоны значений и изменений характеристик которых в производственных условиях перекрывают другие, например неметаллические материалы. Самый распространённый литейный материал чугуны с широкими перекрывающими остальные сплавы диапазонами оптических характеристик в жидком состоянии представляет в этом случае максимальный интерес. Во ФТИМС НАН Украины выполнен комплекс исследований влияния технологических процессов и параметров, в том числе плавки, выдержки, количества неметаллических включений, температуры, перемешивания, химического состава и спектрального диапазона на частичную и интегральную излучательную способность чугуна, а также на состав и пропускание сопутствующих газовых сред [7–11].

3. Анализ полученных результатов. В результате исследований установлено, что:

- с увеличением количества неметаллических включений в чугуне, которое в свою очередь зависит от процессов плавки и выдержки металла, повышается излучательная способность расплава и снижается селективность его излучения. Частичная и интегральная излучательные способности чугуна в видимой и инфракрасной областях спектра, выплавленного в электрорезистивных лабораторных и индукционных промышленных печах, а также вагранках соответственно составляют :

- 0,23 – 0,39 и 0,31;

- 0,32 – 0,42 и 0,37;

- 0,28 – 0,43 и 0,38 на выпуске из копильника вагранки в струе у лётки;

- 0,32 – 0,48 и 0,41 в сифоне вагранки;

- 0,43 – 0,53 и 0,48 на выпуске из вагранки в струе у лётки;

- 0,52 – 0,66 и 0,58 на выпуске из вагранки в струе 0,3 м от лётки;

- известное в фундаментальной оптике металлов прямое влияние температуры на излучательную способность расплавов через их электромагнитные

характеристики (σ , e , μ) не является определяющим в производственных условиях. Температурные зависимости излучательных характеристик чугуна определяются косвенным доминирующим воздействием физико-химических процессов, в том числе реакций окисления и восстановления, растворения графита и образования графитовой спели. Поэтому эти зависимости для спокойной ванны под аргоном в различных условиях имеют сложную форму и при $t > 1400$ °C могут быть как положительными, так и отрицательными. Расплавы с высоким содержанием Si и Mn и низким C имеют отрицательные зависимости, а с низким содержанием Si и Mn и высоким C – положительные. Причём эти зависимости усиливаются с уменьшением содержания Si и повышением Mn . При температурах выше 1550 – 1600 °C наблюдается однозначная тенденция возрастания излучательной способности.

Зависимости при слабом перемешивании расплава (до 0,5 м/с) являются спадающими или возрастающими, а для сильного (более 2,0 м/с) – возрастающими;

– в обычных производственных условиях поверхность расплавов всегда покрыта неметаллическими включениями и прозрачными или непрозрачными оксидными плёнами, под воздействием которых спектральное распределение теплового излучения имеет сложный аналитический вид с несколькими экстремумами. В видимой части спектра частичная излучательная способность уменьшается, в ближней инфракрасной области повышается и затем понижается, а в диапазоне 3,83 – 8,00 мкм – снова возрастает. С повышением содержания неметаллических включений первый экстремум смещается в инфракрасную область, при этом излучательная способность повышается в среднем от 0,3 до 0,66 и от 0,2 до 0,5 соответственно в коротковолновой и длинноволновой частях спектра. В случае непрозрачных оксидных плён излучение по спектральному составу становится серым. Излучение интенсивно перемешиваемого расплава приближается к металлическому и его излучательная способность с переходом в длинноволновую часть спектра плавно уменьшается;

– влияние химического состава на частичную излучательную способность различно по спектру и определяется селективностью поглощения прозрачных оксидных плён и интерференцией на них излучения. Углерод изменяет частичную излучательную способность неоднозначно. При увеличении содержания

углерода в высокомарганцовистых чугунах с низким кремнием излучательная способность уменьшается, а в низкомарганцовистых с высоким кремнием – повышается. С увеличением содержания кремния и марганца излучательная способность соответственно возрастает и уменьшается;

– с повышением температуры возрастает нестабильность предложенных для исследований оптических характеристик расплавов и расчёта термометрических систематических и случайных погрешностей, пирометрического коэффициента ($K_n = e \times t$) за счёт насыщения сопутствующей промежуточной среды оксидами марганца и углерода, дестабилизации плёнообразования, а также усиления волнистости поверхности и искрообразования. Влияние первых трёх факторов селективно и соответственно проявляется на различных участках спектра.

Основным селективным дестабилизирующим пирометрический коэффициент элементом является марганец, высшие нелетучие окислы которого при нагреве расплава переходят в низшие летучие. Являющийся раскислителем углерод также уменьшает стабильность излучательной способности расплава и пропускания сопутствующей промежуточной среды. Кремний образует стабильные температуроустойчивые плёны и в рассматриваемом аспекте является стабилизирующим элементом.

При введении углерода в расплав железа нестабильность коэффициента незначительно повышается, Si в $Fe-C$ -расплав – в 2 раза снижается, а Mn в $Fe-C-Si$ -расплав – в 3 раза повышается. Поэтому минимальные изменения коэффициента (до 0,01) имеют низкомарганцовистые высококремнистые чугуны с малым содержанием углерода. Высокомарганцовистые низкокремнистые чугуны с высоким содержанием углерода имеют самые нестабильные пирометрические коэффициенты (изменения до 0,17).

Технологический процесс получения жидкого чугуна является доминирующим, определяющим нестабильность пирометрического коэффициента фактором. При температуре 1360 °C изменения пирометрического коэффициента для чугуна в индукционной печи типа ИЧТ-10 (0,38–0,53) в среднем в два раза выше, чем для ваграночного чугуна (0,1–0,3). Причем минимальные значения были получены для чугуна в струе у лётки вагранки и затем в порядке возрастания – для металла в струе у лётки копильника, в конце струи из вагранки и в потоке у сифона;

– состав сопутствующей газовой промежуточной среды определяется температурой и интенсивностью перемешивания чугуна. При вынужденной конвекции и перегреве расплава выше температуры термодинамического равновесия основной металлургической реакции содержание CO_2 увеличивается от 0,04 до 4,50 % (в 114 раз), а O_2 – соответственно уменьшается от 20,7 до 17,0 %. После прекращения вынужденной конвекции состав скачком возвращается к исходному при любой температуре. Такие изменения содержания CO_2 селективно в различных спектральных диапазонах и в широких пределах снижают стабильность пирометрического коэффициента в видимой и инфракрасной областях спектра.

Полученные результаты исследований оптических характеристик систематизированы и классифицированы. С физических, в том числе термометрических, позиций объекты термоконтроля являются термодинамически равновесными, серыми или окрашенными телами со спадающими или возрастающими линейными и нелинейными вогнутыми и выпуклыми, с различными коэффициентами нелинейности и крутизны, распределениями излучательной способности. По крайней мере, эта классификация выдерживается для реальных объектов на определенных, наиболее приемлемых для оптической термометрии, участках спектра [12]. Основные проблемы оптической, в том числе многоцветовой термометрии, проявляются в случае окрашенных тел.

В результате исследований влияния оптических спектральных характеристик термометрируемых объектов и пирометрических систем на эквиваленты определяющих параметров и многоцветовые температуры излучения установлены основополагающие для многоцветовой термометрии закономерности, в том числе:

– оси значений критической длины волны и установленных для спадающих и возрастающих спектральных распределений излучательной способности термометрируемых объектов характеристических температур делят пространство значений трехцветовых температур излучения на четыре квадранта. При этом значения трехцветовых температур имеют определяемую эквивалентной волной гиперболическую зависимость от длины настроечной волны и находятся в сопряженных квадрантах. Температура объекта при определенных значениях длины настроечной волны может симметрично или асимметрично находиться между сопряженными температурами излучения или равняться одной из них при соответствующей на-

стройке пирометрической системы. Спектральные распределения излучательной способности термометрируемых объектов определяются знаком и величиной отклонений многоцветовых температур излучения от их характеристических. Знак и значение температурной гистерезисной поправки световодной термометрии зависят от разности характеристических и трехцветовых температур световодного излучения, измеренных на близких к критическим настроечных волнах;

– практически любое монотонное спектральное распределение излучательной способности описывается параболой с определенными коэффициентами;

– измеренные на симметрично распределенных рабочих длинах волн одноцветовые температуры излучения обеспечивает априорную информацию об излучательной способности на средних длинах волн для термометрируемых объектов с различными монотонными и экстремальными спектральными распределениями.

На базе установленных физических закономерностей разработаны такие методы бесконтактной и световодной многоцветовой термометрии:

– спектрально-компенсационные (однотемпературный, двух сопряженных температур, с динамической коррекцией и световодный);

– параболической аппроксимации;

– симметрично-волновой [13–17].

Спектрально-компенсационные методы соответственно основаны на:

– определении длин рабочих волн, при которых $e_\lambda = 1$ и измеренная многоцветовая температура излучения равна температуре объекта;

– выборе длин настроечных волн для двух измеряемых сопряженных многоцветовых температур излучения, с последующим расчетом по ним температуры объекта;

– зависимости температурной поправки к измеряемым многоцветовым температурам излучения от их отклонений от установленных и физически обоснованных характеристических температур;

– зависимости гистерезисной температурной поправки от разности характеристических и многоцветовых температур излучения, измеряемых на длинах настроечных волн, близких к критическим значениям.

Метод параболической аппроксимации основан на описании спектрального распределения излучательной способности объекта параболой и определении ее коэффициентов путем последовательных приближений и оценок этих приближений по разработанным критериям.

Симметрично-волновой метод использует переносимую излучением информацию о спектральном распределении излучательной способности термометрируемого объекта при симметричном расположении по спектру длин рабочих волн многоцветовой пирометрической системы.

Методы многоцветовой термометрии используют излучение с трех и более узкополосных участков спектра. При этом, например, для спектрально-компенсационной пирометрии краевые и настроечные длины волн могут варьироваться в зависимости от излучательных характеристик объектов для исключения совпадения настроечных длин волн с их критическими значениями. Известные многоцветовые пирометры не приспособлены для реализации новых методов. Используемые в них детекторы излучения и алгоритмы обработки первичной пирометрической информации исключают регистрацию излучения объектов на узкополосных участках спектра и изменение спектральных характеристик пирометрической системы.

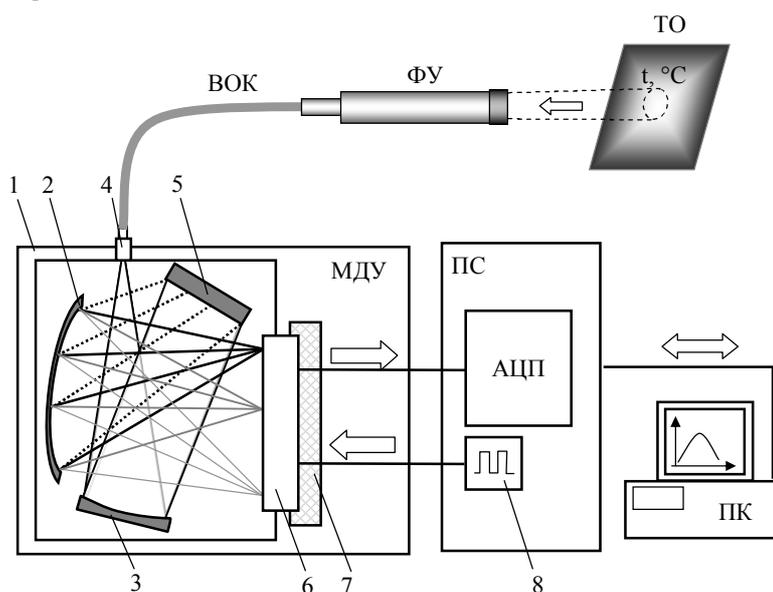
Для испытаний и исследований новых методов многоцветовой термометрии разработана пирометрическая система, осуществляющая регистрацию излучения на 2024 узкополосных участках спектрального диапазона кремниевых детекторов излучения, преобразование и цифровую компьютерную обработку пирометрической информации. На рисунке представлена функциональная схема системы.

Система работает так: излучение термометрируемого объекта (ТО) собирает фокусирующее устройство (ФУ) на торце волоконно-оптического

кабеля (ВОК) и передается к многоцветовому детектирующему устройству (МДУ). Конструктивно МДУ состоит из таких элементов:

- корпуса 1, предохраняющего оптические и электронные элементы МДУ от механического, термического и химического воздействия;
- коннектора 4 ВОК, расположенного в фокусе первичного сферического отражателя 3;
- первичный сферический отражатель формирует параллельный пучок излучения и направляет его на калиброванную дифракционную решетку 5;
- дифракционная решетка 5 размещена в фокусе вторичного сферического отражателя 2 и раскладывает излучение в спектр;
- вторичный сферический отражатель проецирует действительное изображение спектра на линейный детектор 6 с зарядовой связью и термостатом 7;
- термостат 7 поддерживает температуру детектора на заданном уровне.

Плата согласования (ПС) МДУ с персональным компьютером (ПК) включает аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и генератор тактовой частоты 8. Генератор задает частоту опроса пиксельных фотодиодов в детекторе 6. В зависимости от модификации ПК, для приема первичной пирометрической информации может быть использован USB-порт, ISA- или PCI-шина. ПК обрабатывает первичную пирометрическую информацию на заданных длинах волн по алгоритмам разработанных методов многоцветовой термометрии, а также алгоритмам шумоподавления и компенсации темновых токов.



Функциональная схема многоцветовой пирометрической системы

Исследования методических погрешностей бесконтактной и световодной многоцветовой пирометрии излучения выполнены в наиболее сложных термометрических условиях. При бесконтактных спектрально-компенсационных исследованиях в процессе окисления нагреваемого до 1450 К сплава его излучательная способность в диапазоне от 0,5 до 1 мкм изменялась количественно от 0,3 до 0,9 и качественно – от спадающих до возрастающих распределений по спектру. Установлено, что абсолютные погрешности разработанных многоцветовых и сравниваемых классических одноцветового и двухцветового методов без введения температурных поправок соответственно составили 11, 146 и 64 К, а с введением поправок на средние значения излучательной способности в указанном диапазоне ее изменений – 7, 66 и 37 К или в относительной форме 0,5; 4,5 и 2,5 %. Световодные исследования выполнены в условиях максимального температурного гистерезиса яркости излучающей полости прямых цилиндрических лейкоапфировых световодов, достигаемого при нагреве и охлаждении иммерсионных торцов в диапазоне 1150 – 1600 К со средними скоростями соответственно 8 и 24 К/мин. Гистерезисные средние квадратические погрешности сравниваемых многоцветового и классических энергетического и спектрального отношения методов световодной термометрии соответственно равны 2,8; 8,8 и 5,7 К.

Метрологические характеристики методов параболической аппроксимации и симметрично-волнового исследованы на линейных и нелинейных выпуклых и вогнутых с различными, перекрывающимися коэффициенты нелинейности и крутизны реальных объектов, распределениями излучательной способности в спектральном диапазоне от 0,5 до 1,1 мкм, при температурах 1200 – 2000 К. При бесконтактной пирометрии излучения погрешности методов параболической аппроксимации и симметрично-волнового составляют соответственно 0,7 и 0,3 %.

4. Выводы. Таким образом, погрешности разработанных бесконтактных многоцветовых спектрально-компенсационных методов без и с температурными поправками меньше погрешностей классической энергетической и спектрального отношения оптической термометрии соответственно в 6–21 и 5–11 раз. По сравнению с классической пирометрией излучения многоцветовой спектрально-компенсационный метод снижает основную гистерезисную составляющую погрешности световодной термометрии в 2–3 раза. Погрешности методов параболической аппроксимации и симметрично-волнового меньше погрешностей классической одно- и двухцветовой термометрии соответственно в 4–6 и 8–15 раз.

1. Киренков И.И. Метрологические основы оптической пирометрии. – М.: Издательство стандартов, 1976. 2. Жуков Л.Ф., Богдан А.В. Исследование и разработка методов многоцветовой оптической термометрии / Инженерно-физический журнал. – 2002. – № 5. – С. 510–515. 3. Метод пирометрии двойного спектрального отношения / Жагулло О.М. / Теплофизика высоких температур. – 1972, – № 3, – С. 622–628. 4. А. с. 267127 МКИ G01K. Трехцветовой пирометр / А.И. Вилейшиис. 5. Способ бесконтактного измерения температуры: А.с. 1563361 СССР, МКИ G 01 J 5/24 / И.И. Новиков, Е.Д. Глазман и Л.И. Дубсон. Заявлено 05.05.88; Опубликовано. 15.06.94. Бюл. № 11. 6. Устройство для пирометрических измерений: А.с. 1345776 СССР, МКИ G 01 J 5/00 / И.И. Новиков, Е.Д. Глазман и Л.И. Дубсон. Заявлено 20.03.85; Опубликовано. 30.12.90. Бюл. № 48. 7. Жуков Л.Ф., Корниенко А.Л., Зубенина Н.Ф. Исследование стабильности оптических термометрических характеристик жидкого чугуна / МЛ. – 2011. – № 8. – С. 29–33. 8. Л.Ф., Корниенко А.Л., Зубенина Н.Ф. Влияние химического состава на излучательные характеристики чугуна / Процессы литья. – 2011. – № 5. – С.68–71. 9. Жуков Л. Ф. Исследование влияния времени выдержки и технологии плавки на интенсивность и спектральное распределение теплового излучения железоуглеродистых расплавов / Процессы литья. – 1996. – № 3. – С. 56–64. 10. Жуков Л. Ф. Исследование спектрального распределения теплового излучения железо-углеродистых расплавов / Процессы литья. – 1998. – № 3–4. – С. 154–157. 11. Жуков Л. Ф. Исследование температурных закономерностей теплового излучения железо-углеродистых расплавов / Процессы литья. – 1996. – № 4. – С. 9–19. 12. Жуков Л.Ф., Богдан А.В. Идентификация объектов оптической термометрии по их тепловому излучению / Вимірювальна техніка та метрологія. – Львов – 2009. – № 70. – С. 96–103. 13. Спосіб вимірювання температури: Пат. 65861 А, Україна МПК7 G01 J5/00 / Л.Ф. Жуков, О.В. Богдан, А.Л. Корнієнко. - № 2003065464; Заявл. 29.03.2002; Опубликовано. 17.02.2003; Бюл. № 2. 14. Спосіб вимірювання температури: Пат. 54756 А, Україна МПК7 G01 J5/00 / Л.Ф. Жуков, О.В. Богдан. – № 2002032293; Заявл. 22.03.2002; Опубликовано. 17.03.2003; Бюл. № 3. 15. Спосіб вимірювання температури: Пат. 63396 А, Україна МПК7 G01 J5/00 / Л.Ф. Жуков, О.В. Богдан. – № 2003043296; Заявл. 14.04.2003; Опубликовано. 15.01.2004; Бюл. № 1. 16. Спосіб вимірювання температури: Пат. 64517 А, Україна МПК7 G01 J5/00 / Л.Ф. Жуков, О.В. Богдан. – № 2003065721; Заявл. 20.06.2003; Опубликовано. 16.02.2004; Бюл. № 2. 9 17. Спосіб вимірювання температури: Пат. 65861 А, Україна МПК7 G01 J5/00 / Л.Ф. Жуков, О.В. Богдан. – № 2003065464; Заявл. 12.06.2003; Опубликовано. 15.04.2004; Бюл. № 4.