

Л. Ф. Жуков, д-р техн. наук, гл. науч. сотр., e-mail: zhukov@i.com.ua

А. Л. Корниенко, канд. техн. наук, науч. сотр.,

e-mail: andreika@rambler.ru

Д. А. Петренко, мл. науч. сотр., e-mail: dima-petrenko@meta.ua

М. И. Смирнов, гл. электронщик

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

МОДЕРНИЗАЦИЯ НЕПРЕРЫВНОГО СВЕТОВОДНОГО И БЕСКОНТАКТНОГО ТЕРМОКОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ НА БАЗЕ МНОГОЦВЕТОВОЙ ПИРОМЕТРИИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Разработано новое направление многоцветовой симметрично-волновой пирометрии излучения, значительно повышающее метрологические характеристики и расширяющее область применения наиболее эффективного непрерывного световодного и бесконтактного термоконтроля металлических сплавов. Изучены закономерности влияния оптических характеристик многоцветовой пирометрии излучения и металлических сплавов на методические погрешности линейной симметрично-волновой термометрии. С использованием установленных закономерностей на базе современной оптоэлектронной, волоконной и микропроцессорной техники разработаны алгоритмы, методы и средства симметрично-волновой термометрии. Модернизация непрерывного термоконтроля с применением симметрично-волновой пирометрии излучения снижает его методические погрешности в 2,3; 4,9–13,2 и 3,1–3,6 раза по сравнению с известной многоцветовой, а также классической энергетической и спектральной термометрией, соответственно.

Ключевые слова: температура, непрерывный бесконтактный и световодный термоконтроль, спектральное распределение излучательной способности, железоуглеродистые сплавы, многоцветовая симметрично-волновая пирометрия излучения, методическая и инструментальная погрешность.

Производственные процессы, в том числе металлургические, основаны на температурном воздействии на основные и вспомогательные материалы. Температура здесь является главным параметром, определяющим качество металлопродукции и затраты на ее получение. Поэтому неслучайно в структуре метрологического обеспечения наиболее показательных в метрологической культуре японских предприятий Kawasaki Seitetsu и Nippon Steel Corporation термометрия доминирует, занимая около 30 % и в несколько раз превосходя количество других измерений, например, химического состава – в 6, а массы – в 8 раз (рис. 1).

Для измерений температуры в металлургии используются термоэлектрические и оптические технологии. Сейчас термоэлектрический термометр – лучший инструмент, но только для периодических измерений температуры. Например, номинальная статистическая характеристика наиболее стабильного термоэлектрического преобразователя типа ТПП (S) в алундовой изоляции при температуре 1300 °C за 24 часа изменяется на 1 % [1]. Однако, наиболее эффективным, обеспечивающим оптимальное управление производственными процессами в режиме «он-лайн», является непрерывный термоконтроль.

Пример 1. Созданная во ФТИМС НАН Украины на базе непрерывного световодного и бесконтактного термоконтроля АСУ ТП индукционной плавки, обработки и разлива чугуна снижает энергозатраты до 2 раз и угар шихтовых материалов – на 30 %, повышает срок службы футеровки до 2,5 раз и производительность печей – на 40 %, исключает связанные с температурой брак и аварийные ситуации.

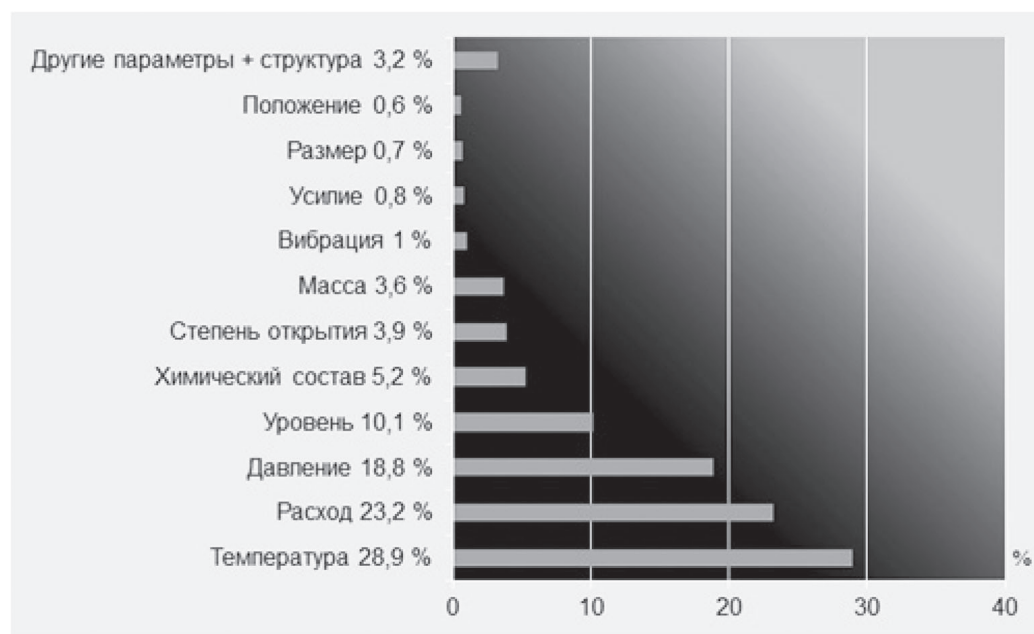


Рис. 1. Структура метрологического обеспечения металлургических предприятий Kawasaki Seitetsu и Nippon Steel Corporation

Пример 2. На одной из международных конференций по термометрии доложено, что мировые затраты на разработку непрерывного термоконтроля конверторного процесса уже превысили 1 млрд. USD. По оценкам Research & Development Center (Thermometry Department) of Nippon Steel Corporation, эти затраты сегодня уже составляют не менее 1,5 млрд USD. Тем не менее, задача еще не решена и до сих пор используется малоэффективный периодический термоконтроль термоэлектрическими сменными преобразователями погружения.

Пример 3. По зарубежным данным (TATA Steel Corporation), непрерывный контроль температуры стали в промковше обеспечивает экономический эффект 2 357 864 евро в год. Экономия достигается за счет повышения стойкости футеровки, уменьшения количества прорывов и перемерзания ручьев, повышения производительности машин непрерывного литья заготовок, уменьшения температуры и оптимизации скорости разливки, снижения расходов на обслуживание, повышения техники безопасности и исключения влияния человеческого фактора при измерениях.

Приведенные количественные оценки говорят о высокой технико-экономической эффективности, исключительной сложности и актуальности непрерывного термоконтроля в металлургии и металлургии машиностроения, для которого оптическая термометрия не имеет альтернативы. Поэтому не случайно первые оптические термометры появились именно в металлургическом производстве.

Сегодня оптическая термометрия по своим инструментальным метрологическим характеристикам не уступает и даже превосходит термоэлектрическую, поэтому используется для построения температурных шкал средних и высоких температур и эталонных измерений. В металлургии классическая энергетическая и спектрального отношения термометрия широко используется без введения температурных поправок для пирометрии термодинамически равновесного и «серого» излучения, а также с введением поправок – окрашенного излучения в условиях стабильной излучательной способности. Однако, в производстве мы имеем дело, в основном, со случайно изменяющейся в широких пределах излучательной способностью, влияние которой усугубляется изменяющимся пропусканием промежуточной среды. В таких условиях методические погрешности измерений классической термометрии

достигают сотен градусов в абсолютном исчислении, поэтому в последние годы начала интенсивно развиваться многоцветовая (спектральная) термометрия, которая значительно снижает методические погрешности. Бурное развитие и миниатюризация спектральных оптических и электронных технологий, в том числе оптоэлектронных, волоконно-оптических, микропроцессорных и компьютерных также способствуют развитию многоцветовой термометрии.

В оптической термометрии оперируют двумя физическими материальными субстанциями, то есть веществом (контролируемым объектом) и его электромагнитным полем (тепловым излучением). Излучение переносит тепло, а значит имеет энергию, энтропию и температуру. Представления о температуре и функции спектрального распределения излучения нагретого тела были значительным успехом новой физики первой половины прошлого столетия. В случае абсолютно черного тела субстанции находятся в термодинамическом равновесии и поэтому их температуры равны. Это свойство абсолютно черного тела и его излучения используется в оптической термометрии для отмеченных выше эталонных измерений, построения температурных шкал и градуировки оптических термометров.

Оптическая термометрия зарождалась на стадии становления теории теплового излучения, когда еще не пользовались понятием и термином «температура излучения» и поэтому были введены понятия и термины «условных температур», или «псевдотемператур», термометрируемых объектов. Они не соответствуют физическому смыслу и определениям температуры в термодинамике, молекулярно-кинетической теории и статистической физике. Например, если рассматривать фундаментальное для определения температуры направление теплообмена излучением, то тело с меньшей псевдотемпературой при определенных условиях может передавать энергию и нагревать тело с более высокой псевдотемпературой. Это противоречит определению температуры в физике, задающему направление теплообмена, поэтому д.т.н. Жуков Л. Ф. предложил использовать более естественное в оптической термометрии и физически обоснованное понятие температуры излучения. Этой утверждающейся в термометрии концепции авторы придерживаются и в настоящей статье.

Начатая научной термометрической общественностью дискуссия о возможностях измерений температуры объектов, в том числе окрашенных тел, по температурам их излучения не окончена. Достаточна ли переносимая излучением информация о термометрируемых объектах для измерений их температуры? В положительных и отрицательных ответах на этот фундаментальный вопрос современной оптической термометрии специалисты разделились на два противоположных лагеря. Современные достижения спектральной термометрии развивают события в ее пользу и не оставляют никакой надежды скептикам.

В настоящей статье представлены результаты исследований и разработок, выполненных ФТИМС НАН Украины в одном из наиболее перспективных направлений многоцветовой термометрии – симметрично-волновой пирометрии излучения (СВПИ). Разрабатываются и другие технологии многоцветовой термометрии, в том числе спектрально-компенсационные [2], параболической аппроксимации [3] и двухцветовые компенсационные [4]. Эти технологии значительно повышают метрологические характеристики разработанного ФТИМС НАН Украины на базе классической энергетической и спектрального отношения пирометрии излучения непрерывного бесконтактного и световодного контроля температуры. При разработке классических технологий основное внимание уделялось созданию общих и частных методов световодной и бесконтактной термометрии, а также вспомогательных устройств, в том числе фурм, охлаждающих, визирных и сканирующих устройств, устройств оптического сочленения и др. Эти технологии внедрены на предприятиях Украины, России, США, Германии, Болгарии, Венгрии, Ирана, Японии, Тайваня и других стран с высоким технико-экономическим эффектом (табл. 1).

Для повышения метрологических характеристик и соответствующего расширения области применения классического световодного и бесконтактного непрерывного термоконтроля проводится его модернизация на основе многоцветовой пирометрии излучения.

Таблица 1

Технико-экономические показатели температурного контроля

Разработки	Объекты внедрения	Снижение брака «по температуре», %	Снижение угара, %	Повышение ресурса футеровки, %	Снижение расхода	
					кокса, %	электроэнергии, %
Бесконтактные термометрические системы	вагранки	30–70	10–30	–	6–10	–
Бесконтактные термометрические системы	электро-дуговые печи	20–30	5	25–35	–	15–20
Световодные термометрические системы	индукционные печи	20–60	20	20–90	–	10–30

По многим показателям, в том числе по количеству патентов и метрологическим характеристикам разработок, Украина занимает лидирующие позиции в мире (табл. 2).

Многоцветовые технологии основаны на дистанционном качественном и количественном определении спектральных распределений излучательной способности контролируемых объектов. Используя полученные распределения и известные связи между спектральными коэффициентами излучения-поглощения, отражения и пропускания, можно определять макрооптические характеристики этих объектов и дистанционно их идентифицировать, поэтому разрабатываемые многоцветовые термометрические технологии могут также быть использованы для специальных и аэрокосмических исследований и контроля.

СВПИ основана на установленной авторами, достаточной для практического использования корреляции излучательной способности термометрируемых объектов в конденсированном состоянии в средней части рабочего спектрального диапазона

Таблица 2

Разработчики многоцветовых термометрических технологий

Страна	Разработчик	Количество патентов	Количество рабочих волн	Относительная погрешность, %
Украина	ФТИМС НАН Украины	18	3	< 0,5
США	Princeton University & NASA	11	3–8	1–5
Беларусь	Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси	4	3	2
Россия	ОАО «Научно-исследовательский институт оптико-электронного приборостроения»	6	8	Н/Д
Япония	Noritake Co., Ltd.	4	3	Н/Д
Германия	«Erich Weinert» betrieb des kombinates	3	3	Н/Д

с ее значениями на симметрично размещенных граничных участках. Установленная корреляция позволяет получить обобщающее пирометрическое уравнение линейной СВПИ (ЛСВПИ), численно решаемое относительно определяемой температуры сплава T [5]. Возьмем самый простой случай линейного спадающего распределения излучательной способности и трех рабочих волн (рис. 2).

Для таких условий на основе термодинамических законов теплового излучения получим систему 3 пирометрических уравнений, связывающих температуру объекта T с температурами его излучения S_1 , S_2 и S_3 через значения излучательной способности ε_1 , ε_2 , и ε_3 на рабочих волнах λ_1 , λ_2 и λ_3 .

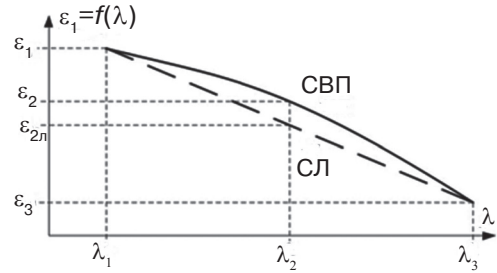


Рис. 2. Спадающие (линейное и нелинейно-выпуклое) распределения излучательной способности

$$\begin{cases} \frac{1}{T} - \frac{1}{S_1} = \frac{\lambda_1}{C_2} \ln(\varepsilon_1); & (1) \\ \frac{1}{T} - \frac{1}{S_2} = \frac{\lambda_2}{C_2} \ln(\varepsilon_2); & (2) \\ \frac{1}{T} - \frac{1}{S_3} = \frac{\lambda_3}{C_2} \ln(\varepsilon_3). & (3) \end{cases}$$

Система не решается аналитически, так как содержит 4 неизвестные величины: T , ε_1 , ε_2 и ε_3 . Симметричное распределение рабочих длин волн и установленная корреляция обеспечивают априорную информацию об ε_2 через ε_1 и ε_3 , например, при линейных распределениях излучательной способности $\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2}$. Из уравнений (1) и (3) системы находим выражения для ε_1 и ε_3

$$\varepsilon_1 = \exp\left(-\frac{C_2(T - S_1)}{T\lambda_1 S_1}\right) \quad \text{и} \quad \varepsilon_3 = \exp\left(-\frac{C_2(T - S_3)}{T\lambda_3 S_3}\right).$$

После подстановки ε_1 и ε_3 в $\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2}$ получаем выражение

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} = \frac{\exp\left(-\frac{C_2(T - S_1)}{T\lambda_1 S_1}\right) + \exp\left(-\frac{C_2(T - S_3)}{T\lambda_3 S_3}\right)}{2},$$

которое используем в уравнении (2) системы

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{S_2} = \frac{\lambda_2}{C_2} \ln(\varepsilon_2) = \frac{\lambda_2}{C_2} \ln\left(\frac{\exp\left(-\frac{C_2(T - S_1)}{T\lambda_1 S_1}\right) + \exp\left(-\frac{C_2(T - S_3)}{T\lambda_3 S_3}\right)}{2}\right),$$

и выводим искомое обобщающее пирометрическое уравнение ЛСВПИ

$$\frac{\lambda_2}{C_2} \ln \left(\frac{\exp\left(-\frac{C_2(T-S_1)}{T\lambda_1 S_1}\right) + \exp\left(-\frac{C_2(T-S_3)}{T\lambda_3 S_3}\right)}{2} \right) - \frac{1}{T} + \frac{1}{S_2} = 0.$$

Выполнен комплекс исследований влияния оптических характеристик металлических сплавов и СВПИ на ее методические погрешности. Для обеспечения исследований изучены и классифицированы известные многоцветовые термометрические технологии [6] и спектральные распределения излучательной способности наиболее распространенных и близких по оптическим характеристикам к табулированному вольфраму железоуглеродистых сплавов [5]. Выполненная в результате изучения и анализа излучательных характеристик металлических сплавов в производственных условиях классификация спектральных распределений излучательной способности приведена в табл. 3 и на рис. 3 [7].

В зависимости от состояния излучающей поверхности наиболее распространенных в металлургии железоуглеродистых сплавов и условий термоконтроля, эти распределения могут быть термодинамически равновесными (ТР), серыми (СР) или окрашенными – спадающими (СЛ, СВП, СВГ), возрастающими (ВЛ, ВВП, ВВГ), линейными (СЛ, ВЛ), выпуклыми (СВП, ВВП) и вогнутыми (СВГ, ВВГ). Указанные распределения количественно и качественно изменяются в широких пределах и с запасом перекрывают спектральные излучательные характеристики других материалов, например, керамики, стекла и т. д.

Таблица 3

Оптические характеристики термометрируемых сплавов

Объекты	Качественные			Количественные		Делитель $D = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{\varepsilon_2}$
	спектраль- ные распре- деления	математиче- ские описания распределений	обозначе- ния распре- делений	Кн	Кк	
	многотонные литейные					
Абсолютно черные	термодина- мические равновес- ные	$\varepsilon_{\lambda 1} = \varepsilon_{\lambda 2} = \varepsilon_{\lambda 3} = 1$	ТР	0	0	2
Серые	серые	$\varepsilon_{\lambda 1} = \varepsilon_{\lambda 2} = \varepsilon_{\lambda 3} =$ $= \text{const} < 1$	СР	0	0	2
Окрашен- ные	спадающие линейные	$1 \geq \varepsilon_{\lambda 1} > \varepsilon_{\lambda 2} > \varepsilon_{\lambda 3}$	СЛ	0	<0	2
	возрас- тающие линейные	$\varepsilon_{\lambda 1} < \varepsilon_{\lambda 2} < \varepsilon_{\lambda 3} \leq 1$	ВЛ	0	>0	2
	многотонные нелинейные					
	спадающие выпуклые	$1 \geq \varepsilon_{\lambda 1} > \varepsilon_{\lambda 2} > \varepsilon_{\lambda 3}$	СВП	> 0	< 0	< 2
	спадающие вогнутые	$1 \geq \varepsilon_{\lambda 1} > \varepsilon_{\lambda 2} > \varepsilon_{\lambda 3}$	СВГ	< 0	< 0	> 2
	возрас- тающие выпуклые	$\varepsilon_{\lambda 1} < \varepsilon_{\lambda 2} < \varepsilon_{\lambda 3} \leq 1$	ВВП	> 0	>0	< 2
	возрас- тающие вогнутые	$\varepsilon_{\lambda 1} < \varepsilon_{\lambda 2} < \varepsilon_{\lambda 3} \leq 1$	ВВГ	< 0	> 0	> 2

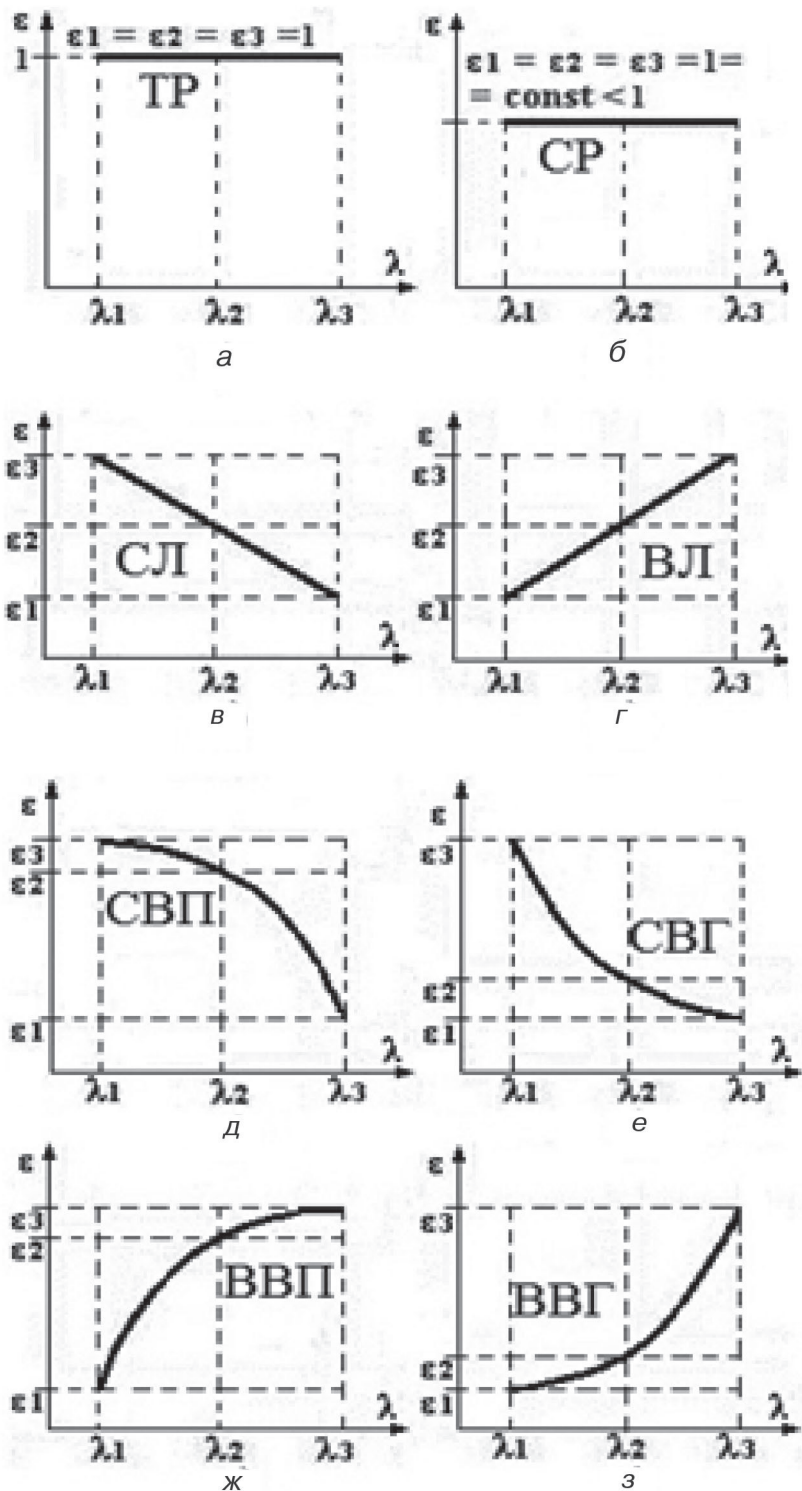


Рис. 3. Спектральные распределения излучательной способности

В табл. 3 также приведены количественные характеристики классифицированных спектральных распределений излучательной способности. В принципе, распределения количественно определяются коэффициентом нелинейности K_n и

коэффициентом крутизны K_k и не приведенными в табл. 3 и на рис. 3 количественными оценками излучательной способности. Безразмерный K_n рассчитывается по следующему выражению

$$K_n = \varepsilon_2 - \varepsilon_{2n},$$

где ε_{2n} – излучательная способность объекта на длине волны λ_2 для линейно аппроксимированного по ε_1 и ε_3 распределения $\varepsilon_n = f(\lambda)$ (см. рис. 2).

K_k определяется выражением

$$K_k = (\varepsilon_3 - \varepsilon_1) / (\lambda_3 - \lambda_1), \text{ м}^{-1},$$

где ε_3 и ε_1 – значения излучательной способности объекта, соответственно, на длинах волн λ_3 и λ_1 (см. рис. 2).

Установлены закономерности влияния рабочего спектрального диапазона $\lambda_2 = \frac{\lambda_1 + \lambda_3}{2}$ ЛСВПИ [8] и его ширины $\Delta\lambda = \frac{\lambda_3 - \lambda_1}{2} = \lambda_2 - \lambda_1 = \lambda_3 - \lambda_2$ на ее методические погрешности (рис. 4).

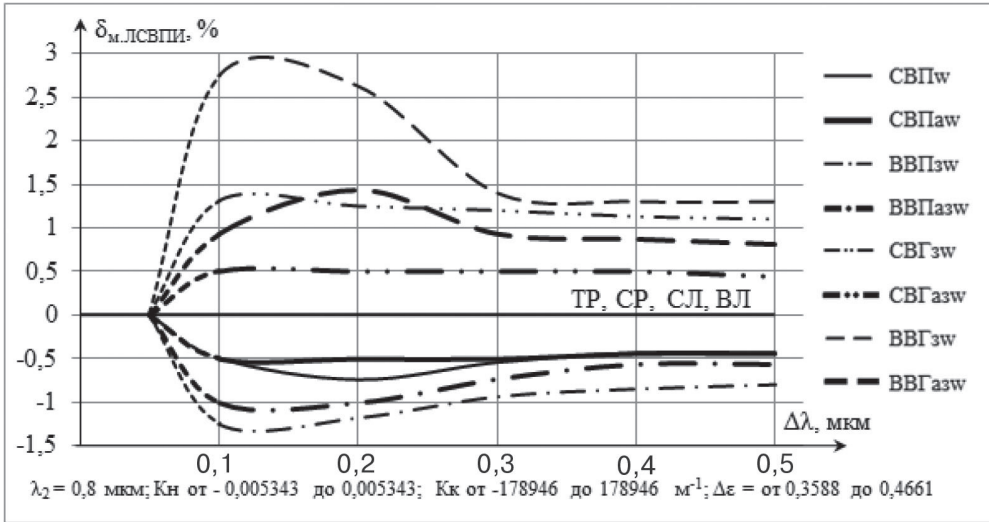


Рис. 4. Зависимости методических погрешностей ЛСВПИ от ширины спектрального диапазона $\Delta\lambda$

Установленные закономерности показывают, что оптимизацией значений λ_2 и $\Delta\lambda$ методические погрешности ЛСВПИ могут быть уменьшены, соответственно, в 1,3–5,0 и 1,1–2,3 раза, а при $\Delta\lambda \leq 0,05$ мкм – полностью исключены. Это влияние определяется взаимосвязью нелинейности спектральных распределений излучательной способности с изученными параметрами λ_2 и $\Delta\lambda$.

Установлены закономерности влияния излучательной способности металлических сплавов, а также характера, нелинейности и крутизны спектральных распределений ее значений на методические погрешности ЛСВПИ [9, 10]. Доказано сильное влияние характера спектральных распределений излучательной способности, определяемое комбинациями ее значений со значениями длин рабочих волн. Показано, что погрешности минимальны для спадающих выпуклых, наиболее характерных для железоуглеродистых сплавов, распределений. Подтверждено адекватное для оптической термометрии уменьшение погрешностей с возрастанием излучательной способности. Показано сильное влияние нелинейности на методические погрешности ЛСВПИ и отсутствие такового для крутизны. Используя эти закономерности при выборе условий измерений температуры, можно уменьшить методические погрешности в 2–5 раз или даже полностью исключить их.

Инструментальные погрешности ЛСВПИ при $T = 1600\text{K}$; $\Delta\lambda = 0,3\text{ мкм}$; $\lambda_2 = 0,8\text{ мкм}$ для аппроксимированных и производных зеркальных распределений излучательной способности вольфрама

Таблица 4

Распределения количественных оценок $\delta_{S1, S2, S3}$		Спектральные распределения излучательной способности											
		СВПав				ВВГазв				ВВПазв			
		$T_{\text{тем}}, \text{ К}$	$\delta_{\text{тем}} = ((T_{\text{тем}} - T)/T) \cdot 100, \%$	$\delta_{\text{тем}} = \delta_{\text{тем}} - \delta_{\text{мет}}, \%$	$T_{\text{тем}}, \text{ К}$	$\delta_{\text{тем}} = ((T_{\text{тем}} - T)/T) \cdot 100, \%$	$\delta_{\text{тем}} = \delta_{\text{тем}} - \delta_{\text{мет}}, \%$	$T_{\text{тем}}, \text{ К}$	$\delta_{\text{тем}} = ((T_{\text{тем}} - T)/T) \cdot 100, \%$	$\delta_{\text{тем}} = \delta_{\text{тем}} - \delta_{\text{мет}}, \%$	$T_{\text{тем}}, \text{ К}$	$\delta_{\text{тем}} = ((T_{\text{тем}} - T)/T) \cdot 100, \%$	$\delta_{\text{тем}} = \delta_{\text{тем}} - \delta_{\text{мет}}, \%$
$\delta_{S1}, S2, S3, \%$													
0,2	++ +	1595,1	-0,31	0,20	1623,3	1,46	0,20	1587,8	-0,76	0,20	1611,9	0,74	0,20
0,2	-- -	1588,7	-0,71	-0,20	1616,9	1,06	-0,20	1581,4	-1,16	-0,20	1605,5	0,34	-0,20
0,5	++ +	1599,9	-0,01	0,50	1628,1	1,76	0,50	1592,6	-0,46	0,50	1616,7	1,04	0,50
0,5	-- -	1583,9	-1,01	-0,50	1612,1	0,76	-0,50	1576,6	-1,46	-0,50	1600,7	0,04	-0,50
1,0	++ +	1607,7	0,48	0,99	1635,9	2,24	0,99	1600,3	0,02	0,98	1624,7	1,54	1,00
1,0	-- -	1576,1	-1,49	-0,99	1604,2	0,26	-0,99	1568,8	-1,95	-0,99	1592,7	-0,46	-1,00
1,5	++ +	1615,6	0,98	1,48	1643,9	2,74	1,48	1608,3	0,52	1,48	1632,7	2,04	1,50
1,5	-- -	1568,2	1,99	-1,48	1596,4	-0,22	-1,48	1560,9	-2,44	-1,48	1584,7	-0,95	-1,49

Выполнен комплекс исследований влияния погрешностей измерений одноцветовых температур излучения на инструментальные погрешности ЛСВПИ [7]. Доказано, что они не превышают указанные погрешности измерений, которые для технических измерений обычно составляют не более 0,5 и даже 0,2 % (табл. 4).

В результате исследований разработаны физические основы, алгоритмы, методы и многоцветовая термометрическая система [11] с программным обеспечением линейной и универсальной СВПИ [12].

Обобщающее пирометрическое уравнение универсальной СВПИ решается численно-итерационным методом с цикловой, для каждого значения D , верификацией по критерию соответствия (рис. 5).

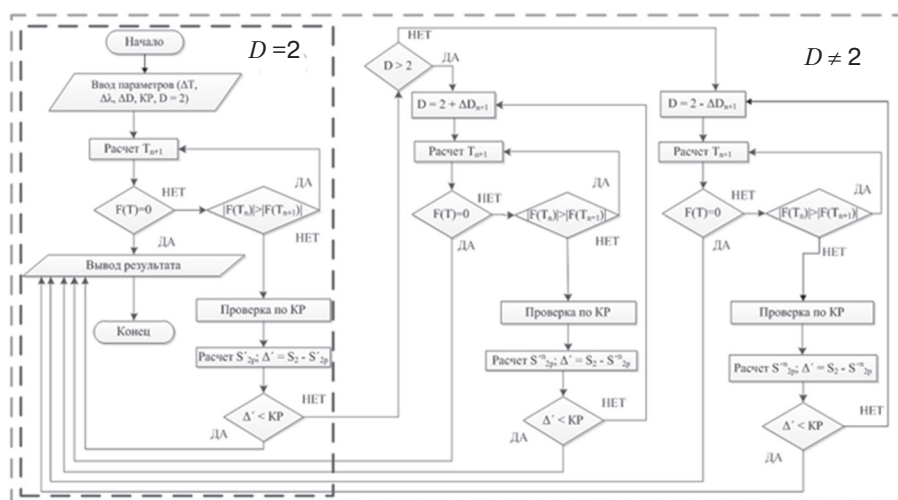


Рис. 5. Линейный и универсальный алгоритмы СВПИ

Для технической реализации алгоритмов обработки первичной пирометрической информации многоцветовых технологий наиболее удобны выполненные на базе современной оптоэлектроники микроспектрометры. Основными в мире производителями микроспектрометров являются США (Ocean Optics Inc., Newport Corp., Thorlabs Inc., XiTRON Technologies, Infrared Focal Systems Inc.), Япония (Hamamatsu Photonics Corp., Horiba Corp.), Германия (Insion GmbH), Финляндия (VTT Technical Research Centre) и Израиль (SK Advanced Group). При соответствующем программировании используемые в них кремниевые линейные детекторы излучения с зарядовой связью обеспечивают реализацию алгоритмов. Такие микроспектрометры применяются в медицине, исследованиях окружающей среды, астрономии и космонавтике. Микроспектрометры также перспективны для повышения метрологических характеристик многоцветовой оптической термометрии. Многоцветовая термометрическая система разработана на базе микроспектрометра S2000 (Ocean Optics Inc.) [11].

Разработаны методики и установка для градуировки системы и экспериментальных исследований метрологических характеристик СВПИ [13]. Для обеспечения прецизионных экспериментальных исследований, установка разработана на базе медного АЧТ, которое исключает влияние CO_2 на градуировку при традиционном использовании графита в метрологических лабораториях (рис. 6).

В результате исследований также установлено, что изотермичность медной модели АЧТ в 4 и 12 раз выше изотермичности моделей, соответственно, из графита и стали. Установка, в основном, состоит из высокоизотермичной ($\Delta t \geq 0,5^\circ\text{C}$) модели АЧТ, нагревательной печи с источником электропитания и прецизионным термоэлектрическим термометром. Доказано, что погрешности измерений даже ЛСВПИ, например, для платины, меньше погрешностей классической энергетической, а также спектрального отношения, термометрии, соответственно, в 4,8–13,4 и 2,4–5,0 раза (табл. 5) [14].

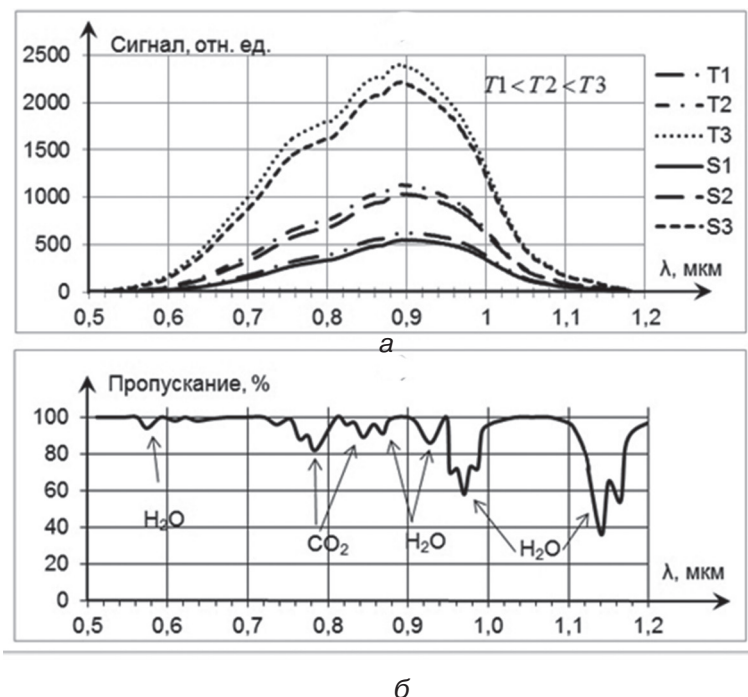


Рис. 6. Спектральные распределения яркости графитовых образца и модели абсолютно черного тела для трех температур (а), пропускание промежуточной среды в рабочем спектральном диапазоне (б)

На базе современной спектральной оптоэлектронной, волоконной и микропроцессорной техники, а также СВПИ-технологий модернизирован непрерывный световодный и бесконтактный контроль температуры металлических сплавов в металлургических и нагревательных печах, в том числе в вагранках, а также электродуговых и индукционных тигельных и канальных плавильных, миксерных и разливочных печах (рис. 7).

Как указано выше, модернизация уменьшает или исключает методические погрешности наиболее эффективной для непрерывного термоконтроля оптической термометрии при минимально возможном уровне инструментальных погрешностей. В модернизированных световодной и бесконтактной системах непрерывного термоконтроля вместо ДУ, ВИП и ИРП использованы МДУ и ПК.

Таким образом, в результате представленных исследований разработано новое направление многоцветовой симметрично-волновой пирометрии излучения, которое значительно повышает метрологические характеристики и расширяет область применения наиболее эффективного непрерывного световодного и бесконтактного термоконтроля металлических сплавов в процессах их плавки, обработки и разлива в литейном производстве.

Изучены закономерности влияния оптических характеристик многоцветовой термометрии и металлических сплавов на методические погрешности линейной симметрично-волновой пирометрии излучения в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. С использованием установленных закономерностей и современной оптоэлектроники разработаны физические основы, алгоритмы, методы и средства симметрично-волновой пирометрии излучения, а также методики и установки для экспериментальных исследований ее метрологических характеристик. Доказано, что методические погрешности измерений симметрично-волновой термометрии меньше методических составляющих известной многоцветовой, а также классической энергетической и спектрального отношения пирометрии излучения, соответственно, в 2,3; 4,9–13,2 и 3,1–3,6 раза.

Таблица 5
Результаты сравнительных измерений температуры для классической и многоцветовой
линейной симметрично-волновой пирометрии излучения

Матери- алы	Погрешности пирометрии излучения:													
	классической							спектрального отношения (двухцветовой)						
	энергетической (одноцветовой)							$\lambda_{1'}$ мкм	$\lambda_{2'}$ мкм	$\lambda_{3'}$ мкм	ε_1	ε_2	ε_3	$\delta T_{co},$ %
Платина	$\lambda_{1'}$ мкм	$\lambda_{2'}$ мкм	$\lambda_{3'}$ мкм	ε_1	ε_2	ε_3	$\delta T_{3'},$ %	0,75	0,85	0,95	0,3201	0,2588		1,07
		0,85			0,2588		3,88	0,75		0,95	0,3201		0,2113	1,43
			0,95			0,2113	5,90		0,85	0,95		0,2588	0,2113	2,20
Алунд	0,75			0,5990			0,97	0,75	0,85		0,5990	0,3641		2,44
		0,85			0,3641		2,95	0,75		0,95	0,5990		0,2741	2,63
			0,95			0,2741	5,00		0,85	0,95		0,3641	0,2741	3,03
Графит	0,75			0,8056			0,41	0,75	0,85		0,8056	0,8834		0,48
		0,85			0,8834		0,38	0,75		0,95	0,8056		0,9436	0,56
			0,95			0,9436	0,24		0,85	0,95		0,8834	0,936	0,75
многоцветовой линейной симметрично-волновой														
	$\lambda_{1'}$ мкм	$\lambda_{2'}$ мкм	$\lambda_{3'}$ мкм	ε_1	ε_2	ε_3	$\delta T_{лсвп},$ %	$\delta T_{3'}/\delta T_{лсвп}$			$\delta T_{co}/\delta T_{лсвп}$			
Платина	0,75	0,85	0,95	0,3201	0,2588	0,2113	0,44	4,8–13,4			2,4–5,0			
Алунд	0,75	0,85	0,95	0,9550	0,3641	0,2741	0,41	2,4–12,2			5,9–7,4			
Графит	0,75	0,85	0,95	0,8056	0,8834	0,9436	0,39	0,6–1,1			1,2–1,9			

Созданы надежные предпосылки для разработки непрерывного световодного термоконтроля сплавов в металлургии, в том числе в конверторах и промковшах. Симметрично-волновая пирометрия излучения также повышает точность и расширяет область применения непрерывного термоконтроля в керамическом, стекольном, химическом, коксохимическом, энергетическом и других производствах.



Рис. 7. Непрерывный световодный (а) и бесконтактный (б) контроль температуры расплавов в металлургических печах на базе классической и симметрично-волновой пирометрии излучения: СУ – световодное устройство; УОС – устройство оптического сочленения; ВУ – визирное устройство; ФУ – фокусирующее устройство; ДУ – детектирующее устройство; ВОК – волоконно-оптический кабель; ВИП – вторичный измерительный преобразователь; ИРП – измерительный регистрирующий преобразователь; ВЦИУ – выносное цифровое индикаторное устройство; МДУ – многоцветовое детектирующее устройство; ПК – персональный компьютер

Список литературы

1. Жуков Л. Ф. Исследование и разработка методов и средств температурного контроля и ресурсосберегающих технологических процессов получения жидкого чугуна в литейном производстве // Дис. доктора техн. наук: 05.11.04, 05.16.04. – Киев, 1992. – 505 с.
2. Жуков Л. Ф., Богдан А. В. Исследование и разработка методов многоцветовой оптической термометрии // Инженерно-физический журнал. – 2002. – № 5. – С. 510–515.
3. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л., Богдан А. В., Крупник В. М., Крупник Л. В., Писаренко В. Г., Костановский В. В. Инновационные технологии многоцветовой термометрии // Измерительная техника и метрология. Межведомственный научно-технический сборник. – 2012. – №73. – С. 45–51.
4. Жуков Л. Ф., Петренко Д. А., Корниенко А. Л. Двухцветовая компенсационная термометрия металлических сплавов и ее инструментальные погрешности. // Процессы литья. – 2016. – №5. – С. 48–58.
5. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л. Новые технологии многоцветовой симметрично-волновой термометрии и их метрологические характеристики // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Том 87, №2. – С. 87–96.
6. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л., Петренко Д. А. Современные методы многоцветовой термометрии металлургических объектов // Металл и литье Украины. – 2015. – № 11. – С. 29–33.
7. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л. Новые технологии симметрично-волновой термометрии [англ.]. – Lambert Academic Publishing, 2014. – 161 с.
8. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л. Влияние спектральных характеристик систем пирометрии излучения на методические погрешности многоцветовой линейной симметрично-волновой термометрии металлургических объектов // Металл и литье Украины. – 2013. – № 2. – С. 27–32.

9. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л. Влияние излучательной способности на систематические погрешности многоцветовой линейной симметрично-волновой пирометрии излучения в металлургии // Металл и литье Украины. – 2013. – № 4. – С. 30–34.
10. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л. Исследование влияния термометрических характеристик металлических сплавов на погрешности многоцветовой линейной симметрично-волновой пирометрии излучения // Металл и литье Украины. – 2013. – № 3. – С. 21–25.
11. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л., Петренко Д. А. Многоцветовая термометрическая система для непрерывного контроля температуры металлических сплавов // Процессы литья. – 2017. – № 6. – С. 54–60.
12. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л. Универсальная многоцветовая симметрично-волновая термометрия объектов металлургии с линейными и нелинейными спектральными распределениями излучательной способности // Промышленная теплотехника. – 2013. – Том 35, № 5. – С. 88–95.
13. Жуков Л. Ф., Корниенко А. Л., Петренко Д. А., Смирнов М. И., Богдан А. В. Установка для прецизионных исследований и градуировки систем многоцветовой пирометрии излучения металлургических объектов // Процессы литья. – 2015. – № 6. – С. 55–59.
14. Корниенко А. Л., Жуков Л. Ф. Экспериментальные исследования метрологических характеристик многоцветовой симметрично-волновой пирометрии излучения материалов металлургии // Промышленная теплотехника. – 2014. – Том 36, № 5. – С. 89–97.

Поступила 30.07.2018

References

1. Zhukov, L. F. (1992) Investigation and development of methods and means of temperature control and resource-saving technological processes of liquid cast-iron obtaining in foundry production. Dissertation of doctor of technical sciences: 05.11.04, 05.16.04, Kiev, 505 p. [in Russian].
2. Zhukov, L. F., Bogdan, A. V. (2002). Research and development of multicolour optical thermometry methods. *Inzhenerno-fizicheskiiy zhurnal*, № 5, p. 510–515 [in Russian].
3. Zhukov L. F., Kornienko A. L., Bogdan A. V., Krupnik V. M., Krupnik L. V., Pisarenko V. G., Kostanovskiy V. V. (2012) Innovation technologies of multicolour thermometry. *Izmeritelnaya tekhnika i metrologiya – Mezhdovedomstvennyy nauchno-tekhnicheskiiy sbornik*, № 73, p. 45–51. [in Russian].
4. Zhukov, L. F., Petrenko, D. A., Kornienko, A. L. (2016) Two-colour compensative thermometry of metal alloys and its instrumental errors. *Protsessyi litya*, № 5, p. 48–58. [in Russian].
5. Zhukov, L. F., Kornienko, A. L. (2014) New technologies of multicoursymmetric wave themmetry and their metrological characterisics. *Inzhenerno-fizicheskiiy zhurnal*, Vol. 87, № 2, p. 87–96. [in Russian]
6. Zhukov, L. F., Petrenko, D. A., Kornienko, A. L. (2015) Modern technologies of multicolour thermometry of metallurgical objects. *Metall i lite Ukrainyi*, №11, p. 29–33. [in Russian].
7. Zhukov, L. F., Kornienko, A. L. (2014) New multicolour symmetric-wave thermometry technologies. *Lambert Academic Publishing*, 161 p. [in Russian].
8. Zhukov L. F., Kornienko A. L. (2013) Influence of the pyrometry systems spectral characteristics on the errors of method of multicolour linear symmetric-wave thermometry of metallurgical objects. *Metall i lite Ukrainyi*, № 2, p. 27–32. [in Russian].
9. Zhukov, L. F., Kornienko, A. L. (2013) Emissivity influence on systematical errors of multicolour linear symmetric-wave pyrometry in metallurgy]. *Metall i lite Ukrainyi*, № 4, p. 30–34. [in Russian].
10. Zhukov, L. F., Kornienko, A. L. (2013) Investigation of thermometrical characteristics influence of metal alloys on errors of multicolour linear symmetric-wave pyrometry in metallurgy. *Metall i lite Ukrainyi*, № 3, p. 21–25. [in Russian].
11. Zhukov, L. F., Kornienko, A. L., Petrenko, D. A. (2017) Multicolour thermometry system for continuous temperature control of metal alloys. *Protsessyi litya*, № 6, p. 54–60. [in Russian].
12. Zhukov, L. F., Kornienko, A. L. (2013) Universal multicolour symmetric-wave thermometry of metallurgical objects with linear and nonlinear spectral emissivity distributions. *Promyshlennaya teplotehnika*, Vol. 35, № 5, p. 88–95. [in Russian].
13. Zhukov, L. F., Kornienko, A. L., Petrenko, D. A., Smirnov, M. I., Bogdan, A. V. (2015) Set for precision investigations and calibration of the multiwavelength pyrometry systems of metallurgical objects. *Protsessyi litya*, № 6, p. 55–59. [in Russian].

14. Kornienko, A. L., Zhukov, L. F. (2014) Experimental investigations of metrological characteristics of multicolour symmetric-wave pyrometry of metallurgical materials]. Promyshlennaya teplotekhnika, Vol. 36, № 5, p. 89–97. [in Russian].

Received 30.07.2018

Л. Ф. Жуков, д-р техн. наук, гол. наук. співр., e-mail: zhukov@i.com.ua
О. Л. Корнієнко, канд. техн. наук, наук. співр., e-mail: andreika@rambler.ru
Д. О. Петренко, мол. наук. співр., e-mail: dima-petrenko@meta.ua
М. І. Смирнов, гол. електронщик
Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, Київ

МОДЕРНІЗАЦІЯ БЕЗКОТАКТНОГО ТА СВІТЛОВОДНОГО ТЕРМОКОНТРОЛЮ МЕТАЛЕВИХ СПЛАВІВ НА БАЗІ БАГАТОКОЛЬОРОВОЇ ПІРОМЕТРІЇ ВИПРОМІНЮВАННЯ

Розроблено новий напрям багатокольорової симетрично-хвильової пірометрії випромінювання, який значно підвищує метрологічні характеристики і розширює область застосування найбільш ефективного безперервного світловодного і безконтактного термоконтролю металевих сплавів. Досліджено закономірності впливу оптичних характеристик багатокольорової пірометрії випромінювання і металевих сплавів на методичні похибки лінійної симетрично-хвильової термометрії. З використанням встановлених закономірностей на базі сучасної оптоелектронної, волоконної і мікропроцесорної техніки розроблено алгоритми, методи та засоби симетрично-хвильової термометрії. Модернізація безперервного термоконтролю з застосуванням симетрично-хвильової пірометрії випромінювання знижує його методичні похибки в 2,3; 4,9–13,2 і 3,1–3,6 рази порівняно з відомою багатокольоровою, а також класичною енергетичною та спектральною відношення термометрією, відповідно.

Ключові слова: температура, безперервний безконтактний і світловодний термоконтроль, спектральний розподіл випромінювальної здатності, залізовуглецеві сплави, багатокольорова симетрично-хвильова пірометрія випромінювання, методична та інструментальна похибка.

L. F. Zhukov, Doctor of Engineering Sciences, Chief Researcher, e-mail: zhukov@i.ua
A. L. Kornienko, Candidate of Engineering Sciences, Researcher, e-mail: andreika@rambler.ru
D. O. Petrenko, Junior Researcher, e-mail: dima-petrenko@meta.ua
M. I. Smirnov, Chief Electronics Engineer

Phisico-technological institute of metals and alloys NAS of Ukraine, Kyiv

MODERNIZATION OF CONTACTLESS AND LIGHT-GUIDE TEMPERATURE CONTROL OF METAL ALLOYS ON THE BASE OF MULTICOLOUR PYROMETRY

New direction of multicolour symmetric-wave pyrometry is developed. It significantly increases metrological characteristics and widens application field of the most efficient continuous light-guide and contactless temperature control of metal alloys. Regularities of multicolour thermometry and metal alloys optical characteristics influence on errors of method of linear symmetric-wave thermometry are studied. Using established regularities, on the base of modern optoelectronic, fiber and microprocessor technologies, algorithms, methods and means of symmetric-wave thermometry were developed. Modernization of continuous temperature control on the base of symmetric-wave pyrometry decreases errors of method of such temperature control in 2,3; 4,9–13,2 and 3,1–3,6 times comparing with the known multicolour, as well as classical energy and spectral ratio thermometry, respectively.

Keywords: temperature, continuous contactless and light-guide temperature control, spectral distribution of emissivity, ferrous-carbon alloys, multicolour symmetric-wave pyrometry, error of method, instrumental error.