



УДК 536.521:621.039.564.3

Поступила 08.05.2013

*Е. И. МАРУКОВИЧ, ИТМ НАН Беларуси, А. П. МАРКОВ, Белорусско-Российский университет,  
Е. М. ПАТУК, ИТМ НАН Беларуси,  
С. С. СЕРГЕЕВ, А. Г. СТАРОВОЙТОВ, Белорусско-Российский университет*

## ОПТИКО-ВОЛОКОННАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

*Рассматриваются современные схематехнические реализации оптико-волоконных структур бесконтактной пирометрии.*

*Modern circuitry realizations of fiber-optic structures of contactless pyrometry are considered.*

**Введение.** Для придания определенных свойств изделиям и соединениям деталей используется тепловая энергия внешнего излучателя. Как электромагнитное излучение поглощаемая или испускаемая изделием внутренняя энергия через процессы нагревания или охлаждения отражает пространство состояний и свойств всей макроскопической системы. При этом посредством некоторых тепловых эффектов и соответствующих физических величин косвенно оцениваются процессы нагревания или охлаждения различных изделий и их неоднородности. Неоднородности быстропротекающих процессов в основном обусловлены металлургическими и тепловыми явлениями при формировании и кристаллизации структуры металлов в зонах энергетического воздействия и термического влияния.

Эффективность операций термодинамического воздействия определяется структурой материала и его прочностными характеристиками. Формирование качественного результата воздействия связано с некоторыми пространственно-временными действиями как с физико-технической, так и информационно-физической сторон. Особый эффект быстрогодействия термического воздействия проявляется в получении требуемых свойств соединения с определенными его параметрами и характеристиками. В интегральной оценке соединения методами неразрушающего контроля определяющее значение имеет дифференцированная первичная информация по каждому параметру в пространственно-временных координатах всего процесса.

Для теплового излучения энергия излучения обусловлена только температурой и воспринима-

ется как тепло нагреваемого или охлаждаемого тела. В реальных условиях в излучениях тел всегда присутствует некоторая доля отраженного излучения. Зависимость спектрально-энергетического распределения излучения нагретого тела подчиняется закону Планка. При этом интенсивность излучения резко возрастает при увеличении температуры. Каждой температуре соответствует такая длина волны, для которой интенсивность излучения максимальна. Произведение абсолютной температуры и длины волны, для которой интенсивность излучения максимальна, является постоянной величиной [1, 2].

**Особенности фазовых изменений.** В любом случае излучение светящегося тела складывается из волн, которые, возбуждаясь, налагаются одна на другую и образуют испускаемую световую волну. Фаза результирующей волны претерпевает скачкообразное случайное изменение, определяемое временем когерентности. Всякое нагретое тело является излучателем некогерентным. Для получения когерентного излучения поток нагретого тела разделяют на две части и их отдельно модулируют. И если заставить эти две волны пройти разные оптические пути, а потом наложить их, то они будут интерферировать.

Если в радиационной пирометрии используется полное излучение нагретого тела, то в оптической и оптико-волоконной – интенсивность излучения определенной длины волны  $\lambda$ , т. е. в некотором интервале  $\lambda_1 - \lambda_2$ . От температуры зависит отношение интенсивностей радиации для двух различных длин волн, поскольку интенсивность для меньших длин волн изменяется с температу-

рой сильнее, чем у излучения с более длинными волнами. Такая особенность сказывается на изменении цвета, что используется в цветовой пирометрии.

**Информационное моделирование и информативные параметры.** Для быстропротекающих процессов термодинамического взаимодействия характерно пространственно-временное распределение теплофизических воздействий с соответствующими операциями, случайно распределенными информативными параметрами термодинамического влияния и зонами. При своем кратковременном проявлении особую сложность представляет выявление функциональных зависимостей и корреляционных связей между первичными признаками (эффектами) и информативными параметрами.

Особую проблему составляют многопараметровые взаимодействия с разноуровневым случайным распределением текущего состояния и свойств нагретых тел. В пассивном режиме функционирования технологическая проявляемость первичных факторов и информативных параметров ограничивает их информационную выявляемость в момент взаимодействия в единых пространственно-временных координатах первичного отображения. В нем заложены информационные особенности термодинамического взаимодействия нагревателя и объекта.

Принципиальную основу формирования первичного отображения о тепловом состоянии поверхности составляет эффект ее взаимодействия с оптическим изучением. При этом физико-технические свойства отображаются в некотором информационном поле с соответствующими им характеристиками. Качество информационного изображения поверхности в основном определяется качеством формирования первичного отображения локализованного участка, генерирующего первичную информацию. Информативное излучение оптического изображения формируется в виде распределения яркости, пропорционального квадрату амплитуды  $E(x, y) = k\Phi_0^2(x, y)$ . С появлением некоторой эквивалентной изменчивости изменяются характер и параметры первичного отображения. На промодулированный по амплитуде световой поток  $\Phi_0(x, y)$  оказывает воздействие и рассеянное на участке поверхности излучение. По закону Ламберта этот световой поток пропорционален площади элементарного участка изменчивого теплового состояния (рис. 1). Рассеянное излучение особенно значимо для слабо отражающей поверхности. Распределение яркости  $E'$  в первом отражении  $F$  элементарного участка описывается функцией [2]:

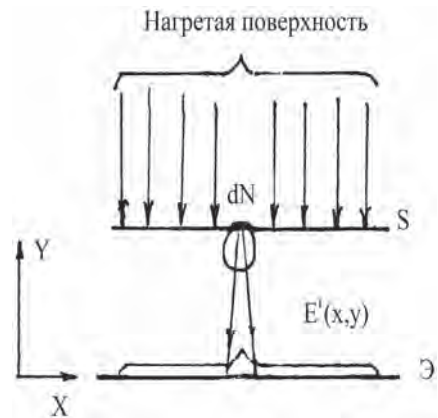


Рис. 1. Модель формирования теплового отображения нагретой поверхности

$$E'(x, y) = \begin{cases} E(x, y) & \text{при } x < x_0, \quad x < x_0 + \Delta x, \\ & y < y_0, \quad y < y_0 + \Delta y; \\ 0 & \text{при } x < x_0, \quad x < x_0 + \Delta x, \\ & y < y_0, \quad y < y_0 + \Delta y, \end{cases}$$

где  $x_0, y_0$  – координаты геометрической точки сосредоточения изменчивого участка  $dN$  поверхности  $S$ .

В распределении яркости  $E(x, y)$  оптического изображения заложены признаки, характеризующие ее тепловую изменчивость.

Однако случайный характер их распределения приводит к большому разнообразию моделей описания первичных отображений. Для детерминированных и случайных распределений, преимущественно встречающихся в реальных условиях, изображения представляются ограниченным числом моделей. Математическая модель изображения представляется распределением яркости в пространственных координатах  $X$  и  $Y$  или в области пространственных частот  $B(j\omega_x, j\omega_y)$ . При взаимодействии с приемником излучения на яркость  $E'(x, y)$  накладывается функция, вид которой определяется индикатрисой рассеянного излучения, вследствие чего изменяется контрастность теплового отображения  $\mathcal{E}$ .

Для стабильного состояния нагретого тела контрастность  $K_0$  выражается формулой:

$$K_0 = \frac{E(x, y) - E(x + \Delta x, y + \Delta y)}{E(x, y) + E(x + \Delta x, y + \Delta y)}, \quad (1)$$

а при тепловой изменчивости элементарного участка контрастность в зоне  $S$  изменится и представится в виде зависимости:

$$K_H = \{E(x, y) - E(x + \Delta x, y + \Delta y) - [E_H(x, y) - E_H(x + \Delta x, y + \Delta y)]\} \times \{E(x, y) + E(x + \Delta x, y + \Delta y) + [E_H(x, y) + E_H(x + \Delta x, y + \Delta y)]\}^{-1}. \quad (2)$$

Изменчивость  $\gamma$  контрастности в этой зоне определяется соотношением  $\gamma = K_0 / K_H$ . Для элементарной площадки поверхности с малыми приращениями координат ( $\Delta x \rightarrow 0, \Delta y \rightarrow 0$ ) основная составляющая в выражении для  $K_H$ ,  $E_H(x, y) \approx E_H(x + \Delta x, y + \Delta y)$  и изменение контраста примет вид

$$\gamma = 1 + 2 \frac{E_H(x, y)}{E(x, y) + E(x + \Delta x, y + \Delta y)}. \quad (3)$$

Из этого следует, что при тепловой изменчивости изделия соответственно изменяется контрастность первичного отображения. Оптический контраст позволяет локализовать и анализировать первичные признаки. Выявление этих признаков изменчивого состояния поверхности позволяет устанавливать некоторые характеристики теплового отображения.

На основе простейших моделей и их комбинаций описываются различные случаи формирования спектрально-энергетических изображений тепловой изменчивости нагретых тел. Рассматривая оптическую систему формирования и приема первичной информации как линейную, можно эффективно применить принцип суперпозиции. Тогда формализованный процесс взаимодействия и преобразования оптической информации можно анализировать поэлементно для отдельной пространственно-временной операции и на выходе отображения результатов представлять суммарным действием отдельных элементов. Структурно любая система представляет собой объединение функционально связанных оптических элементов, объединенных единой целью: визуализировать тепловую изменчивость нагретой поверхности реального изделия.

**Структуризация оптической трансформации информативных излучений.** Значительную перспективу открывают способы спектрально-энергетической термометрии со спектрально окрашенными информативными излучениями. Их преимущества особо проявляются в выявляемости и визуализации тепловой изменчивости нагретых тел. Цветная термометрия отображает все многообразие изменчивых свойств нагретой поверхности.

В спектрально-энергетической взаимосвязи оптических излучений и первичных отображений более комфортно и эргономично структурируется весь процесс информационных преобразований. В визуализации как информационно-преобразовательном процессе реализуются две важнейшие функции: энергетическая и информационная. Как энергия, так и информация непосредственно связаны со средой. И для того чтобы пространственно-

временное отображение тепловой изменчивости «высветилось» и было воспринято всей структурой, необходимо системное объединение всех элементов с согласованием уровней сигналов предшествующих и последующих преобразователей и их спектральных характеристик.

Для структур контроля быстропротекающих процессов характерно пространственно-временное распределение физико-технических и информационно-физических операций и соответствующих теплофизических взаимодействий (рис. 2). Эффективность операций термодинамического воздействия определяется структурой материала и его прочностными характеристиками. Формирование качественного результата воздействия связано с некоторыми пространственно-временными действиями как с физико-технической, так и информационно-физической сторон. Особый эффект быстройдействующего термического воздействия проявляется в получении требуемых свойств соединения с определенными его характеристиками. К таким соединениям относятся неразъемные соединения типа сварных. Сложность при этом представляет выявление функциональных и/или корреляционных зависимостей между характеристиками и информативными параметрами соединения. Односторонний доступ и сложности ориентированного приема информативных параметров ограничивают применимость абсолютных методов непосредственной оценки характеристик соединения.

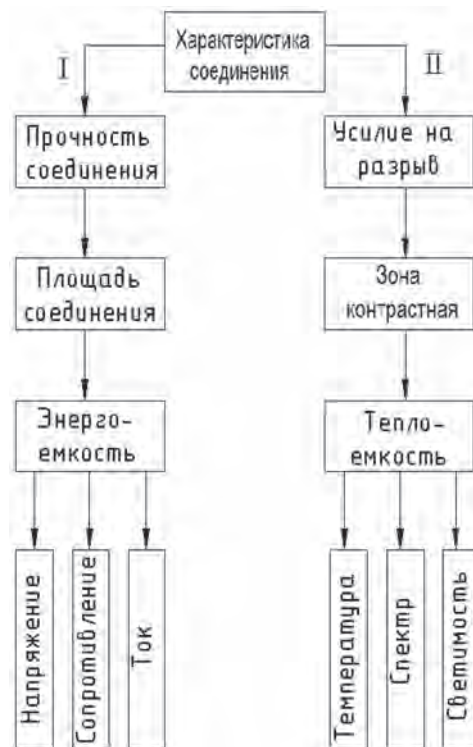


Рис. 2. Физико-техническая I и информационно-физическая II структура формирования качества соединения

Поэтому более рациональной является косвенная оценка характеристик соединения по абстрактным отображениям. Путем абстрагирования свойств материального объекта через совокупные информативные параметры осуществляется переход от реального теплового процесса к его формализованному отображению. При этом системное объединение информационно-физических преобразований позволяет формализовать и весь процесс термодинамического воздействия.

В таком формализованном представлении эффективно реализуется пооперационное воздействие (коррекция, стабилизация и др.) по управлению тепловым процессом, его прогнозированию или принятию экстремальных воздействий (в критических или аварийных ситуациях).

В большинстве случаев критерий качества соединения накладывает жесткие ограничения на алгоритм и метод технологического контроля. Определяющим условием выбора метода и схемы формирования и выявления источников первичной информации является получение ее максимума при определенных энергоинформационных параметрах. А относительный минимум информации должен обеспечиваться с учетом всевозможных дестабилизирующих воздействий и искажений данных о фактических параметрах, полученных принятым методом.

Двустороннее расположение источника и приемника излучений с учетом ограниченного доступа, уровень аппаратного и методического обеспечения, комфортность и эргономика ограничивают применимость радиационных, электромагнитных, электрических и других традиционных методов неразрушающего контроля при решении операционных задач его совершенствования. Однако при любом методе неразрушающего контроля выявление источников первичной информации определяется чувствительностью первичного преобразователя, основанного на определенном физическом эффекте взаимодействия, и эффективностью вторичных преобразований с помехозащищенной дистанционной передачей. Последнее условие особо значимо для сварочных процессов с характерными электромагнитными, тепловыми и другими дестабилизирующими воздействиями.

Совершенствование контроля быстродействующими сварочными процессами обуславливает некоторую специфику установления обратной связи. Как сложная быстродействующая технико-экономическая система сварочное производство характеризуется многообразием свойств и параметров, в которых сосредоточены разные источники информации. Сварочный процесс представляет собой

строго predetermined последовательность физических действий и одновременно сопровождается информационными операциями, характерными для каждой стадии производства.

Статистические методы контроля обеспечивают отработку режимов сварки и способствуют увеличению ресурса наработки. Но из-за случайных аномальных отклонений эти методы не исключают появления брака и аварийных ситуаций. Случайно распределенные по технологическим уровням источники первичной информации усложняют сбор статических данных, а с ними и функциональное диагностирование и управление качеством соединений. Разрыв во времени получения первичной информации и формированием управляющего воздействия сварочным процессом снижает эффективность производства.

Для получения прогнозируемого качества сварных изделий необходима достоверная первичная информация о реальном ходе процесса. Оперативный контроль на всех этапах производственного процесса создает предпосылки для его оптимизации. При такой информационной избыточности появляется необходимость в многофункциональном дорогостоящем аппаратном обеспечении. Оптимизация структуры и состава ограничивается выбором критерия. В структуре многокритериального алгоритма с последовательным приближением к заданной цели определяющим критерием качества служит прочность соединения. Именно она является интегральной оценкой качества сварки [3, 4].

Технология сварочного производства отличается большим разнообразием исходных материалов, режимов, оборудования и других составляющих. Сварочный процесс, как последовательность отдельных операций, сопровождается адекватным информационным процессом. В таком структурно-энергетическом единстве проявляются и их специфические противоречия. В сварке, как энергетическом процессе, определяющими являются теплофизические и временные параметры. Они определяют и прочностные характеристики формируемого при энергетическом воздействии сварного соединения.

С информационной стороны носителем первичной информации служат аномальные отклонения в распределении теплового поля свариваемого соединения, т. е. изменение тепловой энергии является тем информативным параметром, который отражает характерные особенности формируемого соединения. Собственное тепловое излучение контрастного участка сварного соединения – это реальное отображение его физико-технических свойств. В аномальных отклонениях теплового поля прояв-



ляются дефекты формируемого соединения, проявляемость которых отображается в их видимости. Именно тепловой контраст, как источник первичной информации об аномальных отклонениях в формируемом соединении, характеризуется видимостью. Видимость, как соотношение фактического и минимального контраста, характеризует и информационную восприимчивость технической системы. При этом минимальная обнаруживаемая разность яркостей теплового поля и фона характеризуется контрастной чувствительностью.

Информативное излучение передает энергию источника первичной информации. А коэффициент пропускания соединения зависит от свойств нагретого ядра. Коэффициент собственного излучения контрастного участка по закону Кирхгофа равен коэффициенту поглощения для всех нагретых тел. Для серых тел коэффициент излучения не зависит от температуры и длины волны излучения. В реальных условиях информативные излучатели сварного соединения могут рассматриваться как серые источники только в ограниченном спектральном диапазоне длин волн ИК излучения.

Ограниченный доступ к тепловому полю ядра усложняет реализацию технологического контроля прямыми методами. Существенное влияние оказывают тепловые помехи окружающей среды и массогабаритные параметры чувствительных элементов первичных преобразователей. С учетом этого перспективно применение спектрально-энергетических преобразователей излучения с передачей информации по защищенным каналам.

Представленная структура (рис. 3) преобразования первичной информации о качестве сварного соединения включает методы прямых и косвенных оценок сообщений генерируемых источниками информации. Совокупные информативные параметры объединяют механические, электрические и тепловые преобразования. Сложность реализации абсолютных методов и схем измерений делает более эффективными относительные контрольно-измерительные преобразования.

Традиционно более освоенными являются электрические методы и средства контроля. Первичные электрические преобразователи одновременно выполняют функции измерительных, что упрощает схемную реализацию обратных связей для управляющей части. Однако косвенная оценка качества (прочности) по таким схемам преобразования не обеспечивает требуемой достоверности из-за наводок и гальванических связей.

При жесткой пространственно-временной последовательности технологических операций процесса сварки построение информационной цепи



Рис. 3. Схема распределения информационных операций по контролю качества сварки

преобразований по контролю качества представляет некоторые сложности. Во-первых, вся первичная информация о качественном соединении сосредоточена в труднодоступном ядре. Во-вторых, на первичном уровне технологические и информационные операции взаимосвязаны, что представляет определенные сложности в их разграничении для исключения взаимовлияний. Эта особенность в большей мере проявляется при косвенных оценках посредством механических и электрических преобразований.

Для косвенных и совокупных измерений информативных параметров важное значение имеет установление фиксированного начала отсчета. Отсчет, как начало информационного процесса, должен обеспечивать достоверную быстродействующую связь операций начала сварного процесса и считывание информации о его ходе. С учетом вспомогательных воздействий (предварительное сжатие, ультразвуковая обработка и т. д.) в формировании измерительной информации должны иметь место такие физические эффекты, которые позволяли бы четко разграничить цепь прямых и обратных преобразований (обратных связей).

Современное сварочное производство и его аппаратное обеспечение использует преимущественно типовые электромагнитные (индукционные), резистивные, емкостные и другие параметрические преобразователи. При этом предусматривается электрический выход для электронной (микропроцессорной) обработки информации. Эти преобразователи, как и любые другие параметрические устройства, подвержены влиянию электромагнитных и тепловых полей, нестабильности напряже-

ния и частоты источников питания, вибраций. На метрологические характеристики таких преобразователей оказывают влияние случайный характер распределения геометрических размеров свариваемых деталей, качество поверхности и недостаточная (ограниченная) жесткость сварочной машины. В средствах контроля с высокоточными фотоэлектрическими преобразователями оптические первичные преобразователи и оптико-электронные средства обработки функционируют непосредственно в условиях работы сварочной машины, что снижает их эксплуатационные и технические достоинства.

Контроль и управление по косвенным параметрам прочности, определяемым технологией и технологическим оборудованием, не отображают фактического энергетического состояния процесса сварки. Это обусловлено тем, что электромагнитные поля, присущие таким процессам, не обладают аддитивными свойствами и подвержены влиянию различных помех.

Более динамичным и достоверным в структурно-алгоритмической реализации является операционный контроль по теплофизическому состоянию сварного соединения, так как микроструктура и пространственные размеры ядра определяются величиной внутренней тепловой энергии. Динамика теплового поля, формируемого в процессе сварки, функционально отражает прогнозируемую прочность и учитывает характерные особенности изменения электрических, геометрических, механических и других параметров. Моделирование процесса теплового излучения, распределенного по свариваемой поверхности, более эффективно при локализации и восприятии первичной информации непосредственно в зоне сварки [4]. При этом бесконтактный съем информации не оказывает обратного воздействия преобразователя на теплофизические характеристики информационного поля. Характерная связь теплофизических воздействий и прочностных характеристик проявляется в диаграмме микроструктурных преобразований и формирования сварного соединения.

По быстрдействию и помехозащищенности информационные операции, реализованные в ИК излучении, превосходят более инерционные тепловые процессы, что создает принципиальные возможности контроля и управления контактной сваркой в реальном времени. Из-за специфичности температуропроводности нагреваемых деталей формирование теплового поля четко обуславливает два характерных этапа. Вследствие различия формирования теплового поля приэлектродной и околошовной зонах появляется некоторое время за-

паздывания, отличное от времени сварки. Однако на информативное ИК излучение влияет как повышение температуры околошовной зоны, так и увеличение ее площади.

При выборе алгоритма, критерия и структуры важное значение имеет обеспечение достоверного соответствия совокупности физических свойств и признаков термодинамического процесса и формализованной совокупности информативных сигналов. При этом оптика используется для формирования и разделения информативного излучения нагретого тела по многоканальным схемам, а оптоэлектроника и электротехника – для преобразования и трансформации. В способах фотоэмиссионной пирометрии [5] излучение нагретой поверхности с помощью формирующей оптики направленно воздействует на фотокатод ФЭУ, используемый в качестве фотоприемника. При некотором схематехническом усложнении фотоэмиссионная пирометрия отличается улучшенной метрологией и повышенной чувствительностью в помеховой обстановке производственных условий.

В структурах с пространственно разделенной обработкой информативных излучений оценивается распределение температуры в тепловом отображении состояния нагретой поверхности. Путем вычисления температуры в каждом фрагменте отображения на основе соотношения интенсивностей излучения в каждой паре смежных фрагментов находится действительная температура. При этом яркости первого и второго фрагментов отображения получены из соответствующих излучений для  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  длины волны [6]. На основе полученных зависимостей по соотношению интенсивностей рассчитывается пошагово действительная температура распределения по поверхности нагретого тела. Все расчетные данные для каждого шага и каждого фрагмента «запоминаются» и при необходимости распределение поверхностной температуры нагретого тела показывается в определенных различных цветах.

В таком способе и устройствах пространственно-временное разделение информативного отображения и спектрально-энергетической обработки существенно сказывается на быстродействии и достоверности контроля.

Более эффективно пространственно-распределенное восприятие и обработка первичных отображений нагретого тела реализуется способами и средствами волоконной оптики.

Оптико-волоконные способы термометрии строятся на основе различных схематехнических реализаций процесса трансформации воспринимаемого информативного излучения участка на-

гретого тела. За счет преимуществ технологий волоконной оптики более эффективно реализуются операции каналирования, направления и согласования лучистых потоков.

Опико-волоконная термометрия обеспечивает дистанционно-ориентированное восприятие информативного излучения участка нагретой поверхности и дифференцированное сопоставление интенсивностей на разных длинах волн, входящих в спектр излучения нагретого тела. По соотношению этих интенсивностей определяется фактическая температура.

В схемной реализации опико-волоконной термометрии излучение нагретой поверхности с помощью волоконно-оптических адаптеров воспринимается и каналируется по локальным световодам. Выходы этих световодов объединяются в жгут, оптически связанный с коммутатором и блоком опико-электронной обработки, где осуществляются хранение, документирование и отображение результатов.

Исключительные возможности каналирования и смешивания элементарных лучистых потоков с помощью помехозащищенных светопроводящих сред создают колоссальные схмотехнические и информационные преимущества способам дистанционной опико-волоконной термометрии.

Однако при сравнительной помехозащищенности и быстродействии такие способы прямого детектирования не отличаются улучшенными информационными метрологическими показателями и требуют своего совершенствования.

Нелинейная зависимость и неопределенность в оценке излучательной способности поверхности в таких способах и устройствах прямых измерений температуры ограничивают достоверность и сужают диапазон, в том числе и динамический. Измерение температуры по методу двух, а также путем ограничения спектральной чувствительности узким интервалом длин волн радикально не решает задачу повышения достоверности и точности дистанционной оценки теплового состояния нагретой поверхности.

В известном способе дистанционного измерения температуры нагретой поверхности оптическая система ориентированно и одновременно взаимодействует с нагретой поверхностью и отражающими по-

верхностями образцов со слабой и сильной излучательной способностью. Измерительная информация при этом формируется по соотношению спектрально-энергетических параметров излучения измерительного и опорного излучателей в момент сканирования с последующим световодным каналированием, распределением, преобразованием и опико-электронной обработкой в реальных пространственно-временных параметрах [7, 8].

С помощью оптических моноволокон реализуется спектрально-энергетическое смещение и распределение лучистых потоков, обеспечивая улучшенные информационно-метрологические характеристики дистанционной термометрии, в том числе и труднодоступных участков внутренних поверхностей.

По оптическим волокнам, сформированным в жгуты, излучение нагретой поверхности смешивается в световодном коллекторе с опорным излучением поверхности с большим коэффициентом излучательной способности и отражательной поверхности с малым коэффициентом излучательной способности в другом коллекторе-излучателе. При этом измеряется интенсивность излучения контролируемой поверхности и отраженное излучение от поверхностей других с контрастной отражательной способностью. По соотношению этих контрастных излучений, смешанных в коллекторах-излучателях, и информативного излучения жгута сигналы соответствующих выходов фотоприемников обрабатываются в блоке первичной обработки. По результатам обработки идентифицируют измеряемую температуру.

В системной совокупности информационно-преобразовательных операций и световодных каналирующих, направляющих и смешивающих лучистые потоки от контролируемой поверхности и опорных отражающих поверхностей с большим различием в излучательной способности поверхностей устройств улучшаются метрологические возможности и эргономика контроля (за счет дистанционирования оператора и приемника непосредственно от нагретой поверхности). Такая особенность весьма значима для дистанционной термометрии быстропротекающих процессов нагрева и охлаждения.

## Литература

1. Гусев Г. В. Измерение высоких температур в промышленности бесконтактными термометрами (пирометрами излучения) / Г. В. Гусев, В. Г. Хазаров // Промышленные АСУ и контроллеры. 2006. № 5. С. 47–51.
2. Измерения в промышленности: Справ. изд. В 3-х кн. Кн. 2. Способы измерения и аппаратура: Пер. с нем. / Под ред. П. Профоса. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Металлургия, 1990.
3. Ключев В. В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справ. / В. В. Ключев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов и др. М.: Машиностроение, 1995.

4. Экспериментальный образец системы многопараметрического контроля дуговой сварки по электрическим параметрам дуги и тепловым параметрам околошовной зоны / Гос. науч. учрежд. «Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси // Приложение.

5. Пат. BY 10993. Фотоэмиссионный пирометр для измерения температуры поверхности нагретого тела. Заявка а20050749 от 21.07.2005.

6. Пат. US 6814484. Метод и устройство для исследования распределения температуры. Заявка 10/184957 от 01.07.2002.

7. Пат. BY 13276 C1. Способ дистанционного измерения температуры нагретой поверхности и устройство для его осуществления. Заявка а20080389 от 30.06.2010.

8. Пат. RU 2382340. Способ дистанционного измерения температуры и устройство для его осуществления. Заявка № 2008/28047/28 от 09.07.2008.