



The modern circuit realizations of structural and algorithmic transformations of pyrometry and thermal control are considered.

А. П. МАРКОВ, Е. И. МАРУКОВИЧ, Е. М. ПАТУК, Ю. Л. СТАНЮЛЕНИС, ИТМ НАН Беларуси,
А. Г. СТАРОВОЙТОВ, РУП «Могилевэнерго»

УДК 536.521.621.039.564.3

СХЕМОТЕХНИКА СВЕТОВОДНОЙ ПИРОМЕТРИИ В ЛИТЬЕ И МЕТАЛЛУРГИИ

Введение. При тепловом распространении энергии пламени нагревателя реализуются различные процессы термодинамического взаимодействия в пространственно-временных координатах нагреваемого тела. Его теплоэнергетическое состояние определяется режимами нагревания и охлаждения. Пространственно-временные изменения отличаются некоторой неопределенностью и инерционностью распределенных в технологическом процессе элементарных нагревателей и масштабно-параметрическими параметрами изделий.

Физико-технические свойства нагреваемого тела и выполняемых тепловых операций абстрактно отражаются в первичной информации, где закодированы количественные и качественные показатели фактического состояния операций нагрева и охлаждения. Тепловой контроль и термометрия динамических процессов связаны с рядом технологических и информационных ограничений. В информационном процессе пассивного взаимодействия нагревателя и объекта особую проблему составляют локализация, защита и пространственно-распределенная трансформация первичной информации.

Формирование и распределение первичной информации о тепловом состоянии нагретого тела реализуется через физические эффекты энергетического взаимодействия нагревателя, среды передачи, материала заготовки. При этом основу формирования информационного поля составляет не сам тепловой процесс с его нормированными параметрами, а его изменения (отклонения) в виде характерных признаков и соответствующих физических величин. На информативности и эффективности термодинамического взаимодействия нагревателя и материального тела существенно сказываются состояние поверхности и ее отражательная способность. Технологией установлены допусти-

мые границы распределения случайных отклонений от нормируемых режимов, в которых с определенной доверительной вероятностью могут колебаться теплофизические параметры объекта. Для оценки граничных отклонений используются некоторые физические эффекты. В них более восприимчиво и достоверно выражаются определенные соотношения между физическими параметрами и первичными признаками зарождающихся термических отклонений. При этом наряду с энергетичностью, протяженностью и трудоемкостью важное значение приобретают оперативность и эффективность трансформации информативных признаков [1].

Тепловое состояние тел не поддается непосредственной оценке. Для параметрических измерений используется какой-либо признак, преобразуемый в другую адекватную физическую величину. Многофакторные взаимозависимости и возникающие при этом неопределенности требуют оперативной оценки теплового состояния нагретого тела на всех стадиях литья и металлургии [1].

Информационно-схемотехнические преимущества дистанционной пирометрии и теплового контроля обеспечивают широкую перспективу совершенствования способов и средств оценки теплового состояния в литье и металлургии. Однако трудности учета многофакторных зависимостей эффективной температуры нагретого тела и термодинамической температуры поверхности от ее излучательной способности, изменяющегося спектра и интенсивности информативного излучения, колебаний расстояния от участка поверхности до приемника, геометрии тела и оптической системы ограничивают их применимость.

Тепловые режимы в операционных воздействиях литья и металлургии. Воздействие нагревателя проявляется в сообщении термодинами-

ческой системе энергии теплоты. Процесс нагревания характеризуется термодинамическим равновесием, определяемым температурой. Температура как параметр термодинамического состояния является величиной экстенсивной. Термодинамическая температура всегда положительна и отсчитывается с помощью термодинамической шкалы, единицей которой служит один Кельвин (К), связанный с общепринятой шкалой Цельсия. Цена деления шкалы Кельвина и Цельсия – одна ($1\text{K} = 1\text{ }^\circ\text{C}$); абсолютный нуль соответствует $T_0 = -273,15\text{ }^\circ\text{C}$ [2]. Путем измерения температуры определяются теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность и тепловые режимы в литейном, сварочном, металлургическом и других процессах.

В структуре стационарной пирометрии схемотехнически объединены оптическая система формирования информативного излучения нагретой поверхности, элементы геометрической и волоконной оптики, светоприемники и средства обработки. Сложность визирования и спектрально-энергетических согласований параметров поверхности, ее теплового излучения и приемника с последующей обработкой ограничивают чувствительность, достоверность и производительность.

Наиболее информативным параметром в оценке теплового состояния поверхности является ее спектрально-энергетическое излучение. Дистанционный контроль и термометрия методами и средствами неразрушающего контроля обеспечивают получение достоверной информации о системном взаимодействии источника нагрева или охлаждения, среды распространения и объекта. Системная пирометрия и тепловой неразрушающий контроль позволяют оценивать реальное термическое состояние объекта при различных воздействиях нагревателя или охладителя и окружающей среды с последующей оптимизацией режимов по обоснованному критерию. Непрерывное термоскопирование и оптимальное управление термодинамическими режимами не имеет серьезной альтернативы повышения эффективности процессов плавки, миксерования, разливки, сварки и других медленно- и быстродействующих операций. Недостатки классических технологий термоскопирования существенно ограничивают совершенствование техники и контролеспособность таких теплоемких и энергозатратных производств.

На эффекте влияния жидкой среды на механические и технологические свойства нагретых тел основано низкотемпературное термогидрохимическое упрочнение. Термоэнергетическое взаимодействие поверхности с нагревателем через окружающую среду с участием жидких поверхностно-ак-

тивных веществ сказывается на распределении поверхностной энергии тела. В отдельных случаях положительное изменение свойств твердых тел проявляется путем формирования поверхностной зоны повышенных напряжений сжатия [3].

Все тела в природе обмениваются энергией излучения, которая отражается, рассеивается, а при поглощении превращается во внутреннюю энергию. Тела более нагретые излучают с единицы поверхности и больше тепловой энергии. Такое свойство тел проявляется в тепловом или температурном режиме нагрева или охлаждения. Для генерации излучения к нагревателю подводится энергия, превращаемая в тепловую и воздействующую на приемную поверхность. При нарушении теплового баланса получаемой и излучаемой энергий тело остывает или нагревается. Окружающая среда также является излучающим телом (вторичный излучатель).

В любом случае лучистый поток распространяется в среде, не изменяя своих оптических свойств и не оказывая влияния на отдельные элементарные спектрально-энергетические составляющие. Эта особенность обеспечивает улучшенные информационно-физические возможности спектрально-энергетической пирометрии. Однако для формирования и распределения всех составляющих лучистого потока необходима прозрачная и стабильная среда трансформации спектральных компонент информативного излучения и дифференцированный учет реальных свойств поверхности [2, 4].

При высоких температурах тела испускают лучистую энергию в видимой части спектра. Каждое излучение характеризуется своим спектром – сплошным или линейчатым. Излучения молекул и люминесцентное свечение характеризуются полосатыми спектрами, состоящими из большого числа отдельных линий. В отличие от линейчатого спектра сплошной спектр излучения раскаленного тела не зависит от особенностей его строения.

Энергетическая светимость нагретого тела R_3 характеризует его излучательную способность во всем интервале длин волн. Если учитывать распределение энергии в спектре излучения тела по длинам волн, то общая энергетическая светимость представляет собой сумму всех спектральных плотностей излучательности $r_{\lambda i}$ во всем интервале длин волн:

$$R_3 = \int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda.$$

Между телом, нагревателем (средой) и оболочкой происходит обмен энергией только путем излучения и поглощения излучения. После помеще-

ния тела в оболочку вся система достигает одинаковой температуры и будет находиться в тепловом равновесии. При тепловом равновесии тел, обменивающихся энергией только путем поглощения и излучения, устанавливается пропорциональность между излучательной $r_{i(\lambda, T)}$ и поглощательной $r_{i(\lambda, T)}$ способностями тел. На основе закона Кирхгофа спектральную плотность излучательности любого тела можно выразить через спектральную плотность излучательности абсолютно черного тела:

$$r_{i(\lambda, T)} = \alpha_{i(\lambda, T)} r_{i(\lambda, T)}$$

По закону Кирхгофа каждое тело при температурном излучении лучше всего поглощает те самые лучи, которые оно излучает при данной температуре.

Некоторые особенности формирования информационного поля в ИК области излучений. Дальнейшее совершенствование операций термической обработки связано с температурно-временными комбинациями нагрева, охлаждения, отпуска и закалки. При этом важное значение в энергосберегающих технологиях приобретает среда, а также совмещение операций, например, закалки и промывки. В таких технологических процессах нагревается изделие в средах с окислительной атмосферой, а охлаждается в расплаве солей с последующим полосканием в воде и сушкой на воздухе. Рациональное комбинирование температурно-временных параметров обеспечивает энергосбережение при улучшении качества термообработки [3].

Аналитическое описание информационного поля материальных объектов представляет собой определенные сложности ввиду многофакторной зависимости параметров теплового поля от длины волны λ , температуры T , состояния и геометрии поверхности и других случайных воздействий.

В общем виде поток Φ_u излучения «серого» излучателя площадью S с коэффициентом ε_λ нагретой до температуры T поверхности описывается по формуле Планка. При этом спектрально-энергетическое распределение излучения Φ_u определяется по выражению:

$$\Phi_u = \frac{\tau_0 S_{об} \varepsilon_\lambda}{\pi} s_\lambda \tau_a \eta(\lambda, T) \omega,$$

где τ_0 – коэффициент пропускания оптической системы; $S_{об}$ – рабочая площадь приемного объектива; s_λ – спектральная чувствительность приемника излучения и фильтра; τ_a – коэффициент пропускания среды-оболочки; $\omega = \frac{S_{об} \cos \varphi}{h^2}$ – телесный угол.

Функция $\eta(\lambda, T)$ рассчитывается следующим образом:

$$\eta(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp \frac{c_2}{\lambda T} - 1}$$

и представляет собой спектральную интенсивность плотности излучения, где T – абсолютная температура, К; λ – длина волны излучения; коэффициенты $c_1 = 3,74 \cdot 10^4$ Вт/(см²·мкм), $c_2 = 1,44 \cdot 10^4$ мкм·К.

Дифференцируя функцию $\eta(\lambda, T)$ по T , получаем зависимость контрастности потока излучения по поверхности или ее участку. При этом температура контрастного участка отличается на величину ΔT от средней температуры T_ϕ окружающего фона и характеризуется коэффициентом k_m :

$$k_m = \frac{\Delta T}{\lambda T_\phi} (1 - e^{-c_2/\lambda T_\phi})^{-1}.$$

Из полученного выражения следует, что с увеличением длины волны излучения контрастность понижается.

Дифференцируя соотношение Φ_u и $\eta(\lambda, T)$ по λ находим зависимость контрастности потока излучения на участке поверхности от $\Delta\lambda$. При этом контрастность определяет спектральную область, в которой контраст отличается на величину $\Delta\lambda$ от средней длины волны излучения фона:

$$k_\lambda = \frac{[c_2/\lambda T e^{c_2/\lambda T} - 5(e^{c_2/\lambda T} - 1)] \Delta\lambda}{\lambda(e^{c_2/\lambda T} - 1)} = \left[\frac{c_2}{\lambda^2 T} \frac{1}{(e^{c_2/\lambda T} - 1)} - \frac{5}{\lambda} \right] \Delta\lambda.$$

Из этого следует, что с увеличением λ и температуры поверхности контрастность понижается.

На изменение контрастности поверхности существенно влияет и коэффициент c_2 :

$$\frac{\Delta\Phi_m}{\Phi_u} = \left[\frac{c_2 T}{\lambda \Delta T} \frac{\Delta\Phi_m}{\Phi_u} - \frac{5}{\lambda} \right] \Delta\lambda = \frac{c_2 \Delta\lambda T}{\lambda \Delta T} \frac{\Delta\Phi_m}{\Phi_u} - \frac{5 \Delta\lambda}{\lambda},$$

или

$$k_\lambda = \frac{c_2 \Delta\lambda T}{\lambda \Delta T} k_m - \frac{5 \Delta\lambda}{\lambda}.$$

Таким образом, относительные изменения контрастности нагретой поверхности при изменении длины волны излучения выше на c_2 от изменения контрастности от температуры при одинаковом относительном изменении температуры и длины волны излучения.

Трансформация отображений оптически прозрачными средами. В трансформации первичных тепловых отображений термодинамического равновесия более информативной является часть лучистого потока, ограниченная некоторым спектральным диапазоном $\lambda_2 - \lambda_1$ (рис. 1):

$$\Phi_u = \frac{\tau_0 S_{об} \varepsilon}{\pi} \frac{S \cos \alpha \cos \varphi}{h^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta(\lambda T) S_\lambda \tau_a d\lambda,$$

где φ – угол между линией дальности и оптической осью системы визирования (угол рассогласования); α – угол между нормалью N_k поверхности и линией дальности; h – удаленность приемной части оптической системы.

В трансформации тепловых отображений поверхностного состояния нагретого тела особый интерес представляют среда и эффективная плотность информативного излучения $R_{эф}$. Эффективная плотность информативного излучения определяется суммарной спектральной интенсивностью $\eta(\lambda)$ в интервале $\lambda_2 - \lambda_1$:

$$R_{эф} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta(\lambda) S_\lambda d\lambda.$$

Через эффективную плотность информативного излучения оценивается реакция оптической системы на энергетическое воздействие нагретой поверхности с температурой T . В этой части полной энергии излучения приемник адаптивно реагирует на тепловые воздействия. Полная плотность излучения R_0 черного тела определяется выражением:

$$R_0 = \int_0^\infty \eta(\lambda) d\lambda = \sigma T^4,$$

где $\sigma = 5,673 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ – постоянная величина.

Для серого излучателя плотность излучения $R_c = \varepsilon \sigma T^4$.

В трансформации теплового отображения состояния нагретого тела определяющее значение имеют мощность излучения черного тела и мощность эффективного излучения приемника. При сравнении этих двух плотностей излучения для каждого значения температуры излучения получа-

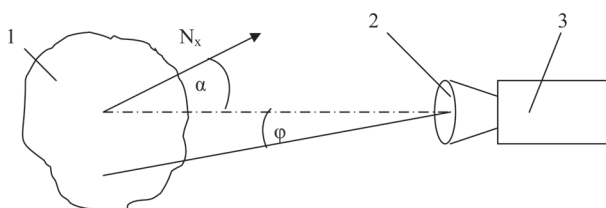


Рис. 1. Схема расчетная: 1 – поверхность нагретого тела; 2 – приемный объектив; 3 – система трансформации излучений

ется их соотношение, определяемое зависимостью:

$$K = \frac{R_{эф}}{R_0} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta(\lambda) S_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty \eta(\lambda) d\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta(\lambda) S_\lambda d\lambda}{\sigma T^4}.$$

Этой зависимостью определяется и спектральное согласование излучения поверхности нагретого тела со своей спектральной характеристикой и температуры участка излучаемой поверхности.

Визуализация теплового поля в ИК излучении. Визуализация теплового состояния тела реализуется через термоскопирование. Таким путем потребителю представляется визуальное отображение реального состояния в принятой системе исчисления в установленных градациях [5, 6].

Восприятие и анализ нагретых поверхностей основывается на скопировании температурного поля или тепловых потоков термометрическим или теплотметрическим способом. При этом первичная информация формируется по температурному рельефу поверхности. При неизменяющемся температурном градиенте скорость теплового потока является величиной постоянной и характеризуется коэффициентом теплопроводности k_m . Для изменяющихся тепловых полей скорость распространения потока изотермической поверхности оценивается по коэффициенту k_a . При этом инерционность процессов нагревания и охлаждения учитывается коэффициентом тепловой активности k_b , определяющим способность тела поглощать или отдавать тепловую энергию.

Величина k_b рассчитывается по выражению:

$$k_b = \sqrt{k_m C} = \sqrt{k_m c \varphi},$$

где C, c – соответственно объемная и удельная теплоемкости нагретого тела; φ – плотность нагретого тела.

Соотношения этих коэффициентов определяются выражением:

$$k_b = k_m \sqrt{k_a}.$$

Носителем информации о теплофизическом состоянии поверхности и внутренней структуре материала является изменение теплового потока, проявляющееся при наличии температурного градиента. Визуализация таких изменений связана с информативным отображением в некоторых признаках.

В ориентированном выявлении признаков, поиске источников первичной информации и направленном выявлении контрастных зон при простран-

ственно-временном скопировании эффективно реализуются способы и структуры восприятия и физико-оптических преобразований с диаграммной модуляцией. Модуляция диаграммы направленности достигается амплитудно-фазовым изменением распределения поля по приемной апертуре, ее геометрии, положению и пространственной ориентации. При этом в зависимости от направленности приема спектр информативного излучения может не изменяться, в то время как помехи, исходящие от других случайно направленных источников, модулируются. Тогда путем расширения спектра помех некоторая часть его оказывается вне полосы по отношению к информативному излучению. За счет частотной избирательности приемника эта часть отрезается, что способствует повышению помехозащищенности ориентированного термоскопирования.

В отличие от пространственно-частотной обработки, основанной на пространственно-частотном распределении с частотно-зависимой направленностью приемника, спектрально-энергетическая трансформация отличается и более эффективным использованием всей ширины спектра информативного излучения. Пространственное изменение спектра связано с изменением параметров такого излучения как при приеме, так и при передаче.

Спектрально-энергетическая трансформация информативных излучений требует согласования в частотных характеристиках всех функциональных элементов информационной цепи. При этом обеспечиваются минимальный уровень помех на выходе всей системы трансформации информативных излучений и ее максимальная адаптация к условиям термоскопии.

«Ориентация – адаптация» приемно-передающей системы обнаружения контрастных зон тепловой неоднородности расширяет функциональные возможности и повышает выявляемость источников информативных излучений особенно на уровне слабых полей. Вся эта специфика проявления и обнаружения первичной информации особенно сказывается на экономической эффективности преобразований и структурной оптимизации систем термоскопирования.

Система термоскопирования, структура и алгоритмы обнаружения и оптико-электронной (микросекундной) обработки, как важнейшие составные части всего информационно-преобразовательного процесса, функционально проявляются в реализации информационных каналов и управлении всеми операциями скопирования и визуального представления. Информационно-энергетическая совместимость системного объединения раз-

нородных элементов предполагает оптимизацию структуры по информационно-экономическому и/или спектрально-энергетическому критериям.

При этом массогабаритные, пространственно-временные и эксплуатационные ограничения приобретают более значимое влияние. Производству надо, чтобы было надежно, информационно, но малозатратно. При таком подходе к термоскопированию исключительное значение придается эффективному выявлению технологических признаков тепловых изменений, рациональному обнаружению распределенных источников информации, достоверной дистанционной передаче и эффективной обработке. И здесь весьма эффективно применение комплексных способов информационно-физической трансформации и адаптивных алгоритмов пространственно-временной обработки.

Наряду с освоением новых участков спектрального диапазона излучений, совершенствованием конструкций и технологий пространственно-временная обработка особо значима в дистанционных и телеметрических системах термоскопирования. Такие системы более ориентированы на «адаптивные», так как функционируют без априорной информации о расположении и направлении информативного сигнала (источника информации), его параметрах и природе. Физико-оптические структуры термоскопирования и пространственно-частотной обработки с модуляцией диаграммы направленности открывают новые возможности физико-оптической трансформации первичной информации [6, 7].

Пространственно-частотное обнаружение контрастных зон предполагает совокупность действий над информативными излучениями с управлением их спектрально-энергетическими характеристиками с целью придания им свойств в функции пространственно-временных параметров. Управление спектрально-энергетическими излучателями и информативными излучениями позволяет вести пространственно-временные восприятия уже на первичном уровне с последующим дистанцированием на последующие уровни. При этом эффективно решается задача спектрально-энергетической максимизации информативных сигналов и минимизации помех. Если максимизация предполагает выделение (выявление) первичных сообщений контрастной зоны в реальной фоновой обстановке, то минимизация – подавление помех на приеме и ограничение попадания информативного излучения с некоторыми дестабилизирующими свойствами (параметрами).

На основе типовых элементов скопирования способами адаптации повышается эффективность

обработки при некотором снижении скорости адаптации особенно сложных объектов. При существенных различиях в параметрах реальных и идеальных систем оптимизация структуры средств термоскопирования наряду с эффективностью должна учитывать быстрдействие преобразований и пространственно-временные особенности производства. Здесь важно взаимное согласование преобразовательных и технологических операций применительно к информационно-помеховой обстановке производства, т. е. принцип «ориентация–адаптация» в системе выявления источников первичной информации предполагает ориентированный прием сигналов и помех. Ориентация термодетектора в информационно-помеховой обстановке производства упрощает процедуру обнаружения и обработки. При этом оптимизационные задачи эффективнее решать в процессе обработки первичной информации.

Однако техника и технологии термоскопирования должны уже на первичном уровне устойчиво выделять информативный сигнал на фоне производственных помех. Информативные сигналы могут отчетливо различаться по уровню, спектрам и другим параметрам. При этом особое значение имеют пространственно-временное выявление спектрально-энергетических различий информативного сигнала и помехи на определенных диапазонах. С учетом таких особенностей операции дискретизации (аналого-дискретного), функционального преобразования, кодирования, мультиплексирования и другие информационно-логические процедуры расширяют возможности совершенствования алгоритмов и структур приема (выявления) и передачи в системах визуального скопирования.

При устойчивом соотношении спектрально-энергетических характеристик информативных излучений и помех максимизируется помехозащищенность. Пространственно-временным распределением источников первичной информации и статистическим – помех задается направление и удаление технологических отклонений. При этом задаются и спектрально-энергетические характеристики информативного излучения либо статические – помех. Но более эффективно задание параметров информативного (воздействующего) излучения. Ограниченный доступ к источникам информации не всегда позволяет предотвратить подавление информативного излучения при фильтрации и компенсации помех.

В усовершенствованной схеме устройства теплового контроля многоканальный световодный коллектор объединен с оптической системой транс-

формации информативного излучения. В двояной структуре схема оптической системы объединяет первый объектив и точечную диафрагму, дефлектор и нормированную поверхность. При этом дефлектор расположен в плоскости отраженного от нормированной поверхности излучения, информативная часть которого через второй объектив и точечную диафрагму направлена на линейно-распределенный светоприемник спектрального разложения. Его выход схемно связан с блоком обработки первичной информации непосредственно во время сканирования нагретой поверхности.

Схемотехнические особенности многоканальной пирометрии. Многоканальная пирометрия создает дополнительные преимущества в оптимизации спектрально-энергетических характеристик оптико-электронных структур. За счет элементов геометрической оптики, светопроводящих волокон и микропроцессорной техники информативное излучение нагретого тела пространственно разделяется по спектральным каналам для трансформации и группируется с помощью оптически прозрачных сред для обработки [8].

Дистанцированное световодом 2 излучение поверхности 1 системой дефлекторов 3 направляется в фотоприемник 4 и пространственно распределяется по длинам волн от λ_1 до λ_n . При этом наряду с каналированием и направленной трансляцией световод выполняет функции входной диафрагмы элемента, разлагающего воспринятое излучение. Выполненный в виде вогнутой дифракционной решетки этот элемент служит связующим звеном в системе оптических преобразований и оптико-электронной обработки 5 (рис. 2).

Фотоприемный блок снабжен многоэлементной линейкой дискретных преобразователей (ПЗС-структуры), каждый из которых принимает излучение в узкой полосе $\Delta\lambda_i$ спектрального диапазона, а их электрические выходы связаны с блоком

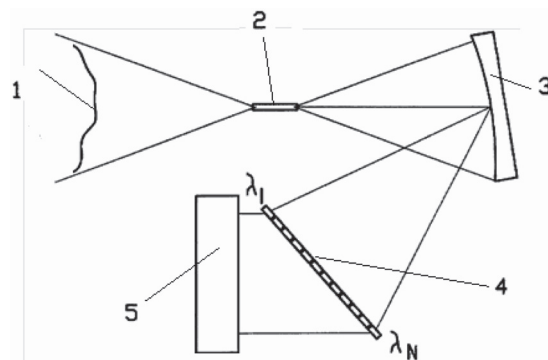


Рис. 2. Схема формирования и разделения информативного излучения: 1 – поверхность излучающая; 2 – световод; 3 – дифракционная решетка; 4 – фотоприемник распределенный; 5 – блок обработки

обработки (через аналого-цифровой преобразователь с ЭВМ). По абсолютной яркости ЭВМ рассчитывают цветовую яркость.

В структурах пирометрии быстропротекающих процессов геометрическая оптика используется для формирования и разделения информативного излучения по двухканальной схеме. Воспринятое объективом информативное излучение диафрагмируется и с помощью конденсора ориентируется по осевой линии оптической системы преобразований. В ней посредством обтюлятора в виде наклонного вращающегося малогабаритного отражающего зеркала, связанного с быстроходным малогабаритным двигателем, оптический луч Φ раздвигается, отражаясь от первого неподвижного зеркала, эти лучи через соответствующие светофильтры направляются на второе сферическое зеркало, в фокусе которого расположен фотоприемник.

В таких устройствах схемотехника преобразований строится на структурах геометрической оптики формирования и разложения информативного излучения нагретого тела. Для обработки и представления результатов используется элементная база оптоэлектроники, преобразовательной и микропроцессорной техники или ЭВМ. Структуры с расширенной оптико-электронной обработкой отличаются повышенным быстродействием, а эталонный канал способствует улучшению метрологических характеристик [9]. В запатентованной фотоэмиссионной пирометрии (рис. 3) информативное излучение нагретого тела 1 с помощью формирующей оптической системы 2 направленно воздействует на фотокатод ФЭУ, используемый в качестве фотоприемника 4 .

Излучение оптической системы воспринимается через регулируемую диафрагму 3 светонепро-

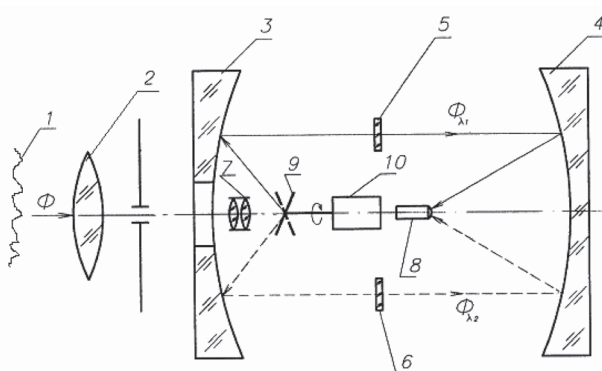


Рис. 3. Схема фотоэмиссионной пирометрии: 1 – источник излучения; 2 – формирующая оптическая система; 3 – диафрагма светонепроницаемой камеры; 4 – фотоприемник; 5 – усилитель анодного тока; 6 – блок электронной обработки с ПК; 7 – усилитель тока фотодиода; 8 – фотодиод; 9 – источник стабилизированного напряжения

ницаемой камеры, в которой размещен фотоприемник. Через усилитель анодного тока ФЭУ электрический сигнал поступает в блок электронной обработки с персональным компьютером. Второй вход в этот блок обеспечивается опорным каналом с источником стабилизированного напряжения 9 , фотодиодом 8 и усилителем тока фотодиода 7 .

При некотором усложнении оптической части и оптико-электронной обработки фотоэмиссионный пирометр обеспечивает улучшенную метрологию и чувствительность в помеховой обстановке цеховых условий. Однако такая жесткая структура требует строгого визирования всех элементов.

В схеме пирометра спектрального отношения для формирования информативных потоков применена система двух вогнутых неподвижных зеркал, по оптической оси которых первого расположены конденсор, объектив с диафрагмой и обтюлятор (рис. 4), а в фокусе второго отражающего зеркала установлен приемник.

Информативное излучение нагретой поверхности 1 через объектив 2 с диафрагмой и неподвижное отражающее зеркало 3 с отверстием формируется конденсором 7 . Расположенным по оптической оси обтюлятором 9 излучение раздваивается на два канала: одним со светофильтром 5 формируется поток Φ_{λ_1} , а другим – поток Φ_{λ_2} . Потоки спектрального отношения воспринимаются приемником 8 . Очередность приема потоков Φ_{λ_1} и Φ_{λ_2} устанавливается обтюлятором 9 , представляющим вращающееся малогабаритным двигателем 10 наклонное зеркало.

За счет увеличения объема температурной информации повышается быстродействие и обеспечивается надежность при работе в условиях значительных вибраций и перегрузок.

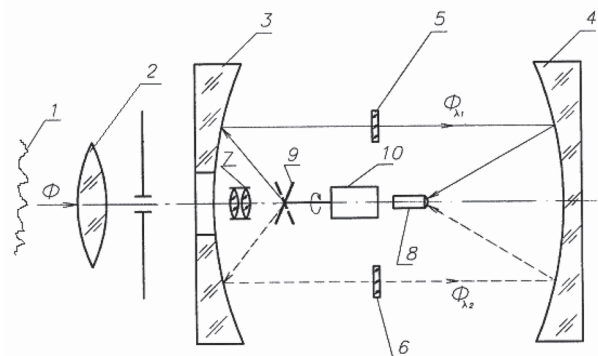


Рис. 4. Схема первичного преобразования информативного излучения в пирометрии спектрального отношения: 1 – поверхность нагретого тела; 2 – объектив с диафрагмой; $3, 4$ – неподвижные отражающие зеркала; $5, 6$ – светофильтры; 7 – конденсор; 8 – приемник; 9 – обтюлятор; 10 – малогабаритный двигатель; $\Phi_{\lambda_1}, \Phi_{\lambda_2}$ – световые потоки оптических каналов спектрального отношения

Схемотехника спектрального разложения строится на создании дифракционного поля в виде совокупности асимметричных расходящихся парциальных пучков с соответствующей им длиной волны. При этом воспринятый под углом α_i лучистый поток с соответствующей длиной волны λ_i отклоняют в сторону оптической оси с сохранением его гомоцентричности. За счет однозначного соответствия угла α_i каждой точке фокусировки на оптической оси системы соответствует определенная спектральная компонента с длиной волны λ_i . Параметры другой оптической системы подобраны так, что отраженное от нормированной поверхности излучение соответствует телескопическому ходу лучей в пространстве предметов. Из оптического изображения, формируемого в задней фокальной плоскости второго объектива (второй оптической системы), выделяется некоторая информативная его часть. В ней содержится сфокусированная компонента с присутствием частичных потоков других длин волн. Формируемая в дальней зоне дифракционная картина в виде распределенного спектра содержит измерительную информацию о температуре нагретой поверхности в момент ее сканирования. Измерительная информация о температуре контролируемой зоны нагретой поверхности определяется по соотношению экстремальных интенсивностей в распределенном спектре информативного излучения в реальных пространственно-временных координатах.

В эффективном взаимодействии нагревателей и изделий важное значение имеет термоэнергетическая оптимизация всех операционных взаимодействий нагретого тела, среды и технологического контроля. Техническое переоснащение, модернизация и оптимизация для энергозатратных производств приобретают стратегическое значение в развитии народнохозяйственного комплекса страны. В системе мер по их реализации предусматривается использование современных технологий и средств контроля и защитных сред при нагреве свыше 600 °С. При этом наряду с контролируемым нагревом повышаются или полностью исключаются потери от образования и удаления окислы [1, 3].

В такой структуре (рис. 5) излучение поверхности 1 через защитное стекло 2 микрообъективами 3 одновременно фокусируется на входных торцах жгутов 4, выходы которых объединены в световодном коллекторе 5. Дифракционное поле, создаваемое первым объективом 6 с диафрагмой 7, направленно дефлектором 8 воздействует на светоделиватель 10. С другой стороны, одновременно с этим излучением воздействует излучение, отра-

женное от нормированной поверхности 9. Отраженным от светоделивателя излучением в заданной фокальной плоскости второго объектива 11 с диафрагмой 12 формируется информативное изображение. Посредством диафрагмы создается линейно распределенный спектр этого излучения, воспринимаемого координатным фотоприемником 13. Его выходы связаны с блоком обработки информации с отображением результатов в виде, непосредственно воспринимаемом наблюдателем или/и ЭВМ.

В такой схеме структурно-алгоритмической реализации информационно-физических преобразований при высоком быстродействии обеспечивается улучшенная метрология и повышается достоверность с некоторым усреднением воспринимаемых одновременно информативных излучений. Информационно-физической задачей опера-

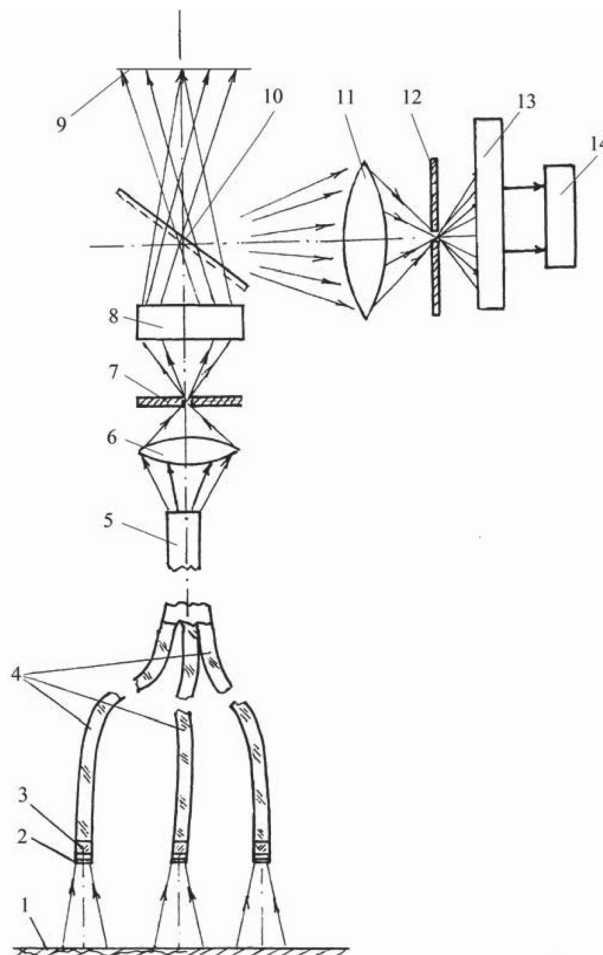


Рис. 5. Схема многоканального дифракционного формирования информативного излучения нагретой поверхности: 1 – поверхность нагретого тела; 2 – стекло защитное; 3 – микрообъектив; 4 – жгуты световодящих моноволокон; 5 – коллектор световодный; 6, 7 – первый объектив с точечной диафрагмой; 8 – дефлектор; 9 – нормированная отражающая поверхность; 10 – светоделиватель; 11, 12 – второй объектив с диафрагмой; 13 – фотоприемник распределенный; 14 – блок обработки информации

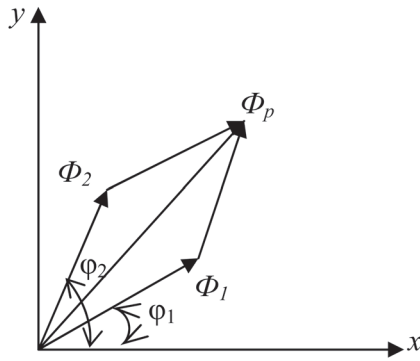


Рис. 6. Формирование результирующего излучения

тивной пирометрии является изыскание способов и схем трансформации физических эффектов изменяющегося теплового поля в условиях продолжительного термодинамического воздействия нагревателя и помех. При этом в схемной трансформации излучений нагретой поверхности абстрагируются признаки и свойства нагретого тела в информативные излучения различных зон нагретой поверхности.

В них отображаются определенные взаимозависимости между теплофизическими и информационными параметрами (рис. 6). При сканировании теплового поля для двух модулированных потоков Φ_{01} и Φ_{02} излучения нагретой поверхности изменяются по синусоидальному закону и описываются выражениями:

$$\Phi_1 = \Phi_{01} \sin(\omega t + \varphi_1),$$

$$\Phi_2 = \Phi_{02} \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Посредством наложения этих потоков получается результирующее излучение Φ_p , которое также будет синусоидальным:

$$\Phi_u = \Phi_p \sin(\omega t + \theta).$$

Здесь амплитуда Φ_p и фаза θ определяются выражениями:

$$\Phi_p^2 = \Phi_1^2 + \Phi_2^2 + 2\Phi_1\Phi_2(\cos \theta),$$

$$\operatorname{tg} \theta = (\Phi_1 \sin \varphi_1 + \Phi_2 \sin \varphi_2) / (\Phi_1 \cos \varphi_1 + \Phi_2 \cos \varphi_2).$$

В такой модели двухпараметрового информативного излучения повышается чувствительность, так как наряду с интенсивностью потоков учитывается и фазовый угол. В общем случае фазовый угол однозначно определяет соотношение потоков Φ_1 и Φ_2 реальной нагретой поверхности.

Формирование первичной информации по изменению фазы информативного излучения нагретой поверхности неразрывно связано с операционными преобразованиями:

- излучением в модулированный гармонический сигнал;

- схемотехническим распределением на две информативные составляющие потока;
- восприятием фазового сдвига между результирующим и опорным сигналами;
- отображением оперативных результатов о фактической температуре нагретой поверхности.

В таких преобразованиях реализуются способы и структуры более эффективной трансформации излучений нагретой поверхности на основе комбинированных оптико-электронных и интерференционных принципов и схем.

Спектрально-энергетическая трансформация информативных излучений способами и технологиями оптико-электронных преобразований и дистанционной передачи позволяет улучшить как информативные, так и метрологические показатели. Однако эффективность и перспективность совершенствующихся способов и средств ограничиваются их комплексной реализуемостью и приспособленностью к условиям и технологиям развивающегося производства [8].

Высокочувствительные способы бесконтактной термометрии. Дифракционные способы термометрирования основываются на формировании и анализе дифракционного изображения изменений теплового состояния нагретой поверхности в фокальной плоскости объектива. С использованием методов и схем регулирования размера дифракционного изображения повышается чувствительность и снижается влияние положения излучателя и других случайных воздействий.

Интерференционные способы реализуются на смещении фазы информативного излучения, которое оценивается по изменению интерференционной картины при сопоставлении теплового излучения материальной поверхности с формируемым базовым (опорным). Излучаемая поверхность нагретого тела является вторичным некогерентным излучателем и для получения когерентного информативного излучения лучистый поток с участка поверхности распределяют на два потока с последующей модуляцией. Схемотехнически эти две волны проходят разными оптическими путями. При последующем наложении наблюдается их интерференция.

Имеется большое разнообразие способов и схем интерференционных преобразований. В общем случае интерферируют два, изменяющихся по синусоидальному закону промодулированных потока, не совпадающих по фазе.

Оптико-волоконные способы и схемы. Оптико-волоконная термометрия строится на основе различных схемотехнических реализаций процесса трансформации воспринимаемого информатив-

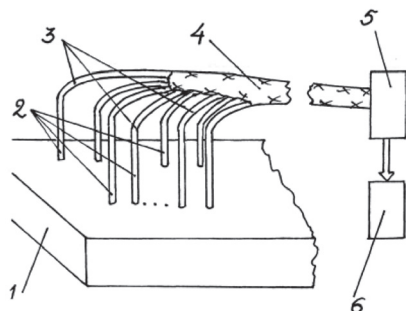


Рис. 7. Схема дистанционной термометрии нагретой поверхности: 1 - охлаждаемые волоконно-оптические адаптеры; 2 - локальная световодная связь; 3 - жгут световодный; 4 - коммутатор; 5 - блок опико-электронной обработки

ного излучения участка нагретого тела. За счет преимуществ технологий волоконной оптики более эффективно реализуются операции каналирования, разделения и смешения 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 [7].

Схемная реализация опико-волоконной термометрии показана на рис. 7.

Излучение нагретой поверхности 1 с помощью волоконно-оптических адаптеров 2 воспринимается и каналируется по локальным световодам 3. Выходы этих световодов объединяются в жгут 4, оптически связанный с коммутатором 5 и блоком опико-электронной обработки 6, где осуществляется хранение, документирование и отображение результатов [10].

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 [8, 10].

Предложен способ дистанционного измерения температуры нагретой поверхности, в котором оптическая система ориентированно и одновременно взаимодействует с нагретой поверхностью и отражающими поверхностями 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 [11].

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

Способ реализуется устройством, работающим следующим образом. За счет световодных жгутов 13 излучение нагретой поверхности 1 смешивается в коллекторе 14 с опорным излучением поверхности 9 с коэффициентом излучательной способности, равным 0,95, и отражательной поверхности 10 с коэффициентом излучательной способ-

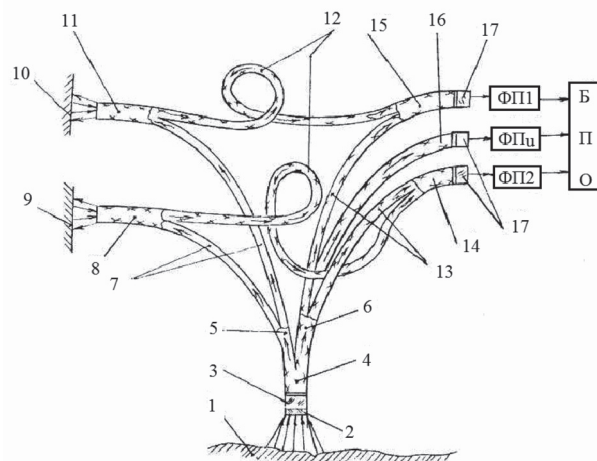


Рис. 8. Схема спектрально-энергетического устройства дистанционного измерения температуры: 1 - поверхность; 2 - стекло защитное; 3 - микрообъектив; 4 - коллектор приемный; 5, 6 - коллекторы-распределители; 7 - жгуты опических волокон; 8 - коллектор-преобразователь излучения; 9 - поверхность с сильной отражательной способностью; 10 - поверхность со слабой отражательной способностью; 12, 13 - жгуты локальной опической связи; 14, 15, 16 - коллекторы-излучатели; 17 - микрообъективы, ФП1, ФП2, ФПИ - фотоприемники; БПО - блок первичной обработки

ности, равным 0,06, в коллекторе-излучателе 15. При этом измеряется интенсивность излучения контролируемой поверхности 1 и отраженное излучение от поверхностей 9 и 10 с контрастной отражательной способностью (сильной и слабой), а по соотношению этих контрастных излучений, смешанных в коллекторах-излучателях 14 и 15, и информативного излучения жгута 16 сигналы соответствующих выходов фотоприемников ФП1, ФП2 и ФПИ обрабатываются в блоке первичной обработки (БПО). По результатам обработки идентифицируют измеряемую температуру. В такой 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 улучшаются метрологические возможности и эргономика контроля (за счет дистанционирования оператора и приемника непосредственно от нагретой поверхности).

В нормировании теплотехнических и технико-экономических показателей энергозатратных производств определяющее значение имеют оперативный контроль и первичная информация о фактическом тепловом балансе нагревания и охлаждения изделия с учетом особенностей нагреваемой поверхности, теплофизических свойств, поперечных размеров и материалов. Все изменения и отклонения в температурном поле и скоростях практически оценить весьма сложно. Поэтому более реализуема оценка термодинамического состояния нагретого тела в некотором поле допусков, что позволяет перейти от абсолютных измерений температуры к относительным.

Спектрально-энергетическая трансформация тепловых излучений способами и средствами современной элементной базы обеспечивает эффективность и гибкость структурно-алгоритмической реализации схмотехническими, светотехническими, рефлектометрическими и информационными схемами.

Литература

1. Тимошпольский В. И. Обзор основных направлений модернизации печного парка и совершенствование технологий нагрева и термической обработки слитков и заготовок в условиях современного машиностроительного предприятия / В. И. Тимошпольский, М. Л. Герман, Д. В. Менделев // *Литье и металлургия*, 2007. № 4 (44). С. 54–62.
2. Гордов А. Н. Основы пирометрии / А. Н. Гордов. М.: Металлургия, 1971.
3. Чекрыгин, А. В. Энергосберегающая технология закалки / А. В. Чекрыгин // *Литье и металлургия*. 2007. № 4 (44). С. 37–38.
4. Демидов А. В. Испытание волокон, прошедших низкотемпературное термогидравлическое упрочнение на РУП «Белорусский металлургический завод» / А. В. Демидов, А. И. Рожков, Д. Г. Сачава // *Литье и металлургия*. 2007. № 4 (44). С. 29–31.
5. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники / Л. З. Криксунов. М.: Сов. радио, 1978.
6. Оптико-волоконное скопирование в литье и металлургии / А. П. Марков и [др.]; под общ. ред. Е. И. Маруковича. Минск: Белорусская наука, 2010.
7. Бусурин В. И. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения / В. И. Бусурин, Ю. Р. Носов. М.: Энергоатомиздат, 1990.
8. Пат. RU 2366909. Многоканальное устройство для измерения пиротехнических характеристик / А. Ф. Аушев, А. Г. Бедрин, А. Н. Туркин; заявка № 2008115767/28. 21.04.2008; опубл. 10.09.2009.
9. Пат. ВУ 10993. Фотоэмиссионный пирометр для измерения температуры поверхности нагретого тела / К. Е. Бедякин, Д. В. Минько, О. О. Кузнецик и др.; заявка а20050749, 21.07.2005; опубл. 30.08.2008..
10. Пат. RU 2192624. Датчик спектрального отношения / Б. С. Игнатъев, М. Б. Игнатъев, И. Д. Белоусова, А. Г. Шумихин; заявка № 2001108256/28, 27.03.2001; опубл. 10.11.2002.
11. Пат. RU 2382340. Способ дистанционного измерения температуры и устройство для его осуществления / Е. И. Марукович, А. П. Марков, А. И. Кац и др., заявка № 2008/28047/28, 09.07.2008; опубл. 20.02.2008.
12. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы / В. П. Преображенский. М.: Энергия, 1978.