



*The ways and structures of spectral-energy thermometry of heated surfaces are examined.*

*Е. И. МАРУКОВИЧ, Ю. Л. СТАНЮЛЕНИС, ИТМ НАН Беларуси, О. Ю. БОНДАРЕВ, ПА «МЕГА»,  
А. П. МАРКОВ, ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»,  
А. Г. СТАРОВОЙТОВ, РУП «Могилевэнерго»*

УДК 681.518.3:681.586'36

## СПЕКТРАЛЬНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ НАГРЕТЫХ ТЕЛ

**Введение.** Текущее состояние поверхности нагретого тела проявляется в тепловом или температурном излучении. В тепловом балансе отражается взаимодействие получаемой и излучаемой энергии нагретого тела. В качестве побочного излучателя выступает окружающая среда, которая создает случайный информативный фон [1].

При нагреве элементы поверхности геометрического тела испускают лучистую энергию в определенной части спектра. В отличие от линейчатого спектра сплошной спектр излучения участка поверхности интегрально характеризует тепловое состояние и не зависит от особенностей строения излучающего тела [2].

В отличие от поглощения отражающая способность поверхности оценивается по многофакторной зависимости и для разных участков и разных длин волн воздействующего излучения принимает разные значения.

Энергетическая светимость, как интегральный параметр, характеризует излучательную способность нагретого тела во всем диапазоне длин волн. В энергетическом распределении в спектре излучения нагретого тела по длинам волн общая энергетическая светимость представляет сумму всех спектральных плотностей излучательности во всем интервале длин волн.

По законам классической электродинамики и геометрической оптики лучистый поток распространяется в среде, не изменяя оптических свойств и не оказывая влияния на отдельные элементарные спектрально-энергетические составляющие. Среди бесконтактных способов и средств пирометрии спектрально-энергетические отличаются улучшенными, но сложно реализуемыми преимуществами, так как для формирования и распределения спек-

трально-энергетических составляющих информативного излучения участка поверхности необходима оптически прозрачная среда трансформации спектральных компонент излучения и дифференцированный учет реальных свойств поверхности [3, 4].

**Физические основы спектрально-энергетической термометрии.** Дистанционная термометрия нагретого тела на основе эффектов и структур термометрии, с помощью которых визуализируется тепловое состояние отдельного участка, строится на трансформации элементарного лучистого потока к виду, удобному как для наблюдателя, так и для средств обработки информации, ее хранения, анализа, документирования.

Для поверхностей твердых тел с характерным непрерывным спектром собственного излучения интенсивность потока излучаемого при нагревании твердого тела изменяется плавно с изменением длины волны. В дистанционной термоскопии распределение интенсивности информативного лучистого потока определяется по спектральному коэффициенту излучения  $\epsilon_\lambda$ , который определяет и отношение спектральной интенсивности излучения поверхности  $b(\lambda, T)$  к спектральной интенсивности абсолютно черного тела  $b(\lambda, T)_{\text{ачт}}$  при той же температуре [5].

При постоянном температурном градиенте скорость теплового потока является величиной постоянной и характеризуется коэффициентом теплопроводности  $k_T$ . Величина  $k_T$  численно равна количеству тепла, протекающему в единицу времени через единицу поверхности при перепаде температуры на единицу длины нормали [4, 5].

В отличие от коэффициента  $k_T$  для учета скорости распространения потока изотермической

поверхности используется коэффициент температуропроводности  $k_a$ . Характерная для тепловых процессов инерционность учитывается коэффициентом тепловой активности  $k_b$ , определяющим способность тела поглощать или отдавать тепловую энергию по зависимости:

$$k_b = \sqrt{k_T C} = \sqrt{k_T c \gamma},$$

где  $C$  – объемная теплоемкость нагретого тела;  $c$  – удельная теплоемкость нагретого тела;  $\gamma$  – плотность нагретого тела.

Взаимосвязь коэффициентов  $k_T$ ,  $k_a$ ,  $k_b$  определяется выражением:

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

Для ряда интенсивно протекающих теплофизических процессов нагрев поверхности проходит в коротком временном интервале, что требует всестороннего учета многофакторных зависимостей теплофизических параметров от температуры и состояния поверхности.

Непосредственной задачей первичных преобразований в дистанционной термометрии является изыскание способов и физических эффектов бесконтактного восприятия изменяющихся параметров теплового поля в условиях постоянного термодинамического воздействия на поверхность как нагревателя, так и помех.

При этом в трансформации первичной информации о тепловом состоянии поверхности абстрагируются признаки и свойства нагретого тела в информативные излучения, в которых отражаются определенные соотношения между теплофизическими и информационно-физическими параметрами. В параметрической совокупности термофизических взаимодействий нагревателя и геометрического тела проявляются количественные и качественные показатели технологичности продукции, ее энергоемкости, с одной стороны, и эффективности теплового контроля с другой. Наряду с энерго- и материалоемкостью, длительностью производственного цикла и трудозатратами весьма значимы оперативность обнаружения ненормированных отклонений и эффективность трансформации сформированных информативных излучений.

Дистанционная оценка фактического состояния нагретой поверхности основывается на анализе излучаемого ею теплового потока. При этом параметры информативной составляющей потока излучения определяются его абсолютным значением и спектрально-энергетическим распределением. Если в способах абсолютного термометрирования преобразовательный процесс строится путем прямого детектирования потока излучения

в одном участке  $\Delta\lambda$  спектра, то в спектрально-энергетических способах оценивается спектрально-энергетическое распределение потока в двух и более участках спектра.

Для нагретых тел по мере изменения температуры изменяются спектрально-энергетические параметры. Если повышается температура, то увеличивается энергия излучения, а длина волны  $\lambda_{max}$ , на которой излучение максимально, уменьшается. Интегрированная энергия излучения нагретого участка поверхности получается путем суммирования энергии по всему спектральному участку [5, 6].

Спектральная температура нагретой поверхности равна истинной температуре, если спектральный коэффициент излучения  $\epsilon_\lambda$  поверхности геометрического тела равен единице. При их различиях для спектрально-энергетической термометрии спектральный коэффициент излучения имеет некоторые фиксированные значения и для известного материала достаточно знать  $\epsilon_\lambda$  только при используемой длине волны  $\lambda_i$ .

Для двух модулированных потоков  $\Phi_{01}$  и  $\Phi_{02}$  излучения нагретой поверхности изменяются по синусоидальному закону и описываются выражениями:

$$\Phi_1 = \Phi_{01} \sin(\omega t + \varphi_1) \text{ и } \Phi_2 = \Phi_{02} \sin(\omega t + \varphi_2).$$

После наложения этих потоков излучений результирующее излучение (рис. 1) также будет синусоидальным:

$$\Phi_{\text{и}} = \Phi_p \sin(\omega t + \theta),$$

где амплитуда  $\Phi_p$  и фаза  $\theta$  определяются соотношением:

$$\Phi_p^2 = \Phi_1^2 + \Phi_2^2 + 2\Phi_1\Phi_2(\cos(\varphi_1 - \varphi_2)),$$

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

Как следует из рис. 1,  $\varphi_2 - \varphi_1 = \theta$ ;

$$\Phi_p \sin \theta = \Phi_1 \sin \varphi_1 + \Phi_2 \sin \varphi_2$$

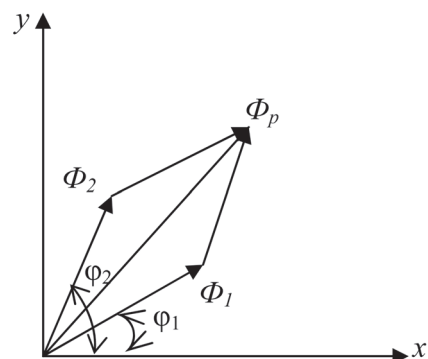


Рис. 1. Формирование результирующего излучения

или

$$\Phi_p \cos \theta = \Phi_1 \cos \varphi_1 + \Phi_2 \cos \varphi_2.$$

Выражение для  $\operatorname{tg} \theta$  примет вид:

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

Соотношение потоков  $y$  определяется выражением:

$$\Phi_p / \Phi_2 = \sqrt{1 + y^2 + 2y \cos \theta},$$

где  $y = \Phi_p / \Phi_2$ , а угол между  $\Phi_p$  и  $\Phi_2$  составляет:

$$\varphi_1 = 0, \quad \varphi_2 = 0, \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{1}{\sin \theta} (y + \cos \theta),$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Phi_2 \sin \theta}{\Phi_1 + \Phi_2 \cos \theta}.$$

При этом информативным параметром излучения нагретой поверхности является и фазовый угол  $\varphi$ . Для  $\theta = \operatorname{const}$  фазовый угол однозначно определяет соотношение двух потоков излучения реальной нагретой поверхности.

Абсолютное значение потока излучения  $\Phi_p$  трансформируемого оптико-электронной системой в электрический сигнал, определяется эффектом использования излучаемого нагретой поверхностью потока и коэффициентом спектрального пропускания оптической системы  $\tau_\lambda$ :

$$\Phi_p = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_{\lambda T} \tau_\lambda d\lambda,$$

где  $\epsilon_{\lambda T} = c_1 \lambda^{-5} \left( \exp \frac{c_2}{\lambda T} - 1 \right)^{-1}$ ;

$c_1 = 37413 \cdot 10^{-12} \text{ Вт} \cdot \text{см}^2$ ;  $c_2 = 1,436 \text{ см} \cdot \text{град}$ ;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $T$  – температура, К.

В общем виде фазовый угол  $\varphi$  зависит от соотношения потоков  $y$  и начального сдвига  $\theta$  (рис. 2) [6].

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

- излучением в модулированный гармонический сигнал;
- схмотехническим 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 совершенствующих способов и средств ограничиваются их комплексной реализуемостью и приспособленностью к условиям и технологиям развивающегося производства [3].

**Высокочувствительные способы бесконтактной термометрии.** Дифракционные способы термометрирования основываются на формировании

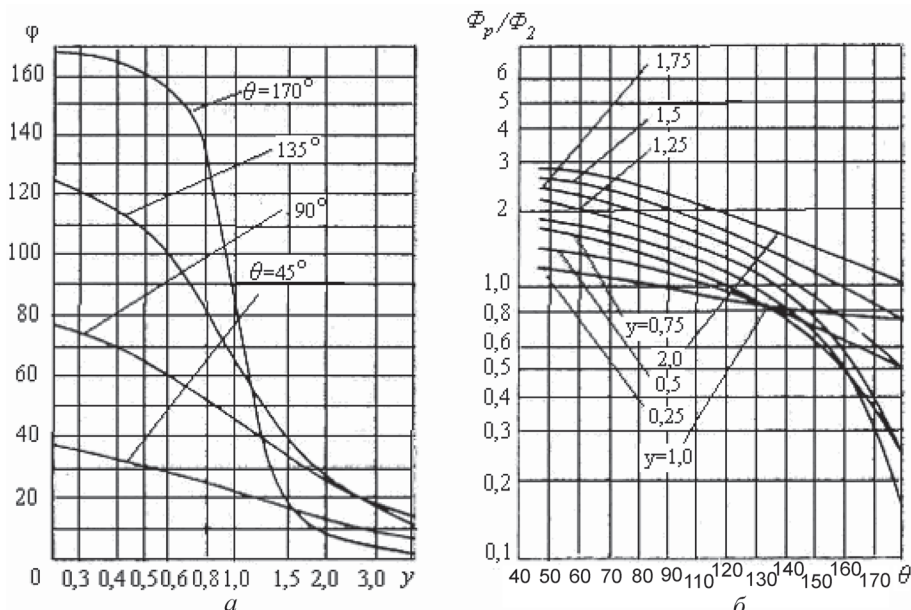


Рис. 2. Зависимость информативных параметров нагретой поверхности от соотношения потоков  $y(a)$  и фазового угла  $\varphi(b)$

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 не когерентным 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.

#### Опико-волоконные способы и устройства.

Опико-волоконные способы термометрии строятся на основе различных схемотехнических реализаций процесса трансформации воспринимаемого информативного 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].

Схема реализации опико-волоконной термометрии показана на рис. 3. 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 [8].

Исключительные возможности каналирования и смешивания элементарных лучистых потоков

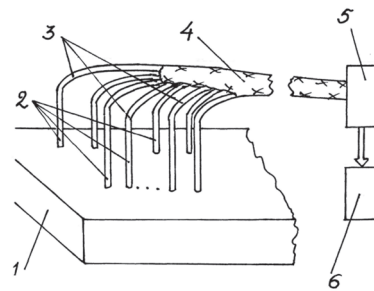


Рис. 3. Схема дистанционной термометрии нагретой поверхности 1; 2 – охлаждаемые волоконно-оптические адаптеры; 3 – локальная световодная связь; 4 – жгут световодный; 5 – коммутатор; 6 – блок опико-электронной обработки

с помощью помехозащищенных светопроводящих сред создают колоссальные схемотехнические и информационные преимущества способам дистанционной опико-волоконной термометрии.

Однако при сравнительной помехозащищенности и быстроте действия 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 ограничивает достоверность и сужает 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 [3, 8].

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 [9].

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

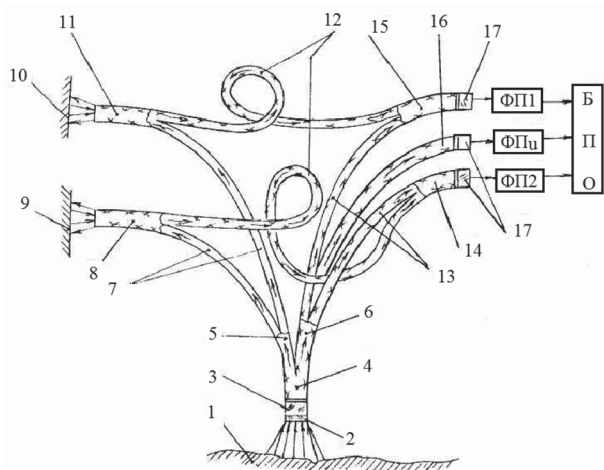


Рис. 4. Схема спектрально-энергетического устройства дистанционного измерения температуры: 1 – поверхность; 2 – стекло защитное; 3 – микрообъектив; 4 – коллектор приемный; 5, 6 – коллекторы-распределители; 7 – жгуты оптических волокон; 8 – коллектор-преобразователь излучения; 9 – поверхность с сильной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

Способ реализуется устройством (рис. 4), 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 способности, 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).

### Литература

1. Методология совершенствования технологического контроля в литейном производстве / Е. И. Марукович, А. П. Марков, В. В. Коннов, А. А. Кеткович // *Литье и металлургия*. 2007. № 4(44). С. 96–103.
2. Г о р д о в А. Н. Основы пирометрии. М.: Металлургия, 1971.
3. Оптико-волоконное скопирование в литье и металлургии / А. П. Марков [и др.]; Под общ. ред. Е. И. Маруковича. Мн.: Беларуская навука, 2010.
4. П р е о б р а ж е н с к и й В. П. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Энергия, 1978.
5. 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. С. 34–346.
6. К р и к с у н о в Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. Радио, 1978.
7. Б у с у р и н В. И. Волоконно-оптические датчики. Физические основы, вопросы расчета и применения. М.: Энергоатомиздат, 1990.
8. О к о с и Т., О к а м о т о К., О ц у М. и др. Волоконно-оптические датчики: Пер. с япон. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-е, 1990.
9. Способы дистанционного измерения температуры и устройство для его осуществления: Пат. RU № 2382340(13).