

А.П. ДАВИДЕНКО, канд. техн. наук, *В.Н. СЛАВКОВ*, студ. магистр

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ОЦЕНОК ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ ЛОКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

Наведено результати досліджень температурних полів локальних об'єктів і представлені розподіли температур різних локальних об'єктів отримані за допомогою ПЗЗ матриць. Описані математичні функції програмного пакету MathCAD для обробки температурних картин локальних об'єктів.

The results of temperature fields of local facilities and temperature distributions represented different local facilities obtained through the CCD. Described mathematical function software package MathCAD processing temperature of paintings of local facilities.

В настоящее время широко применяются системы для дистанционного контроля температурных полей локальных объектов. Эти системы, обладая широкими функциональными возможностями, позволяют намного повысить качество и скорость анализа состояния различных теплоэнергетических систем. Прежде всего необходимо отметить применение таких систем в технологических процессах, таких как непрерывная выплавка слитков, обработка давлением, электронно-лучевая и лазерная термообработка, сушка, термоупрочнение и др.

Основными средствами для решения этой проблемы являются оптико-электронные системы измерения температуры (ОЭСИТ), которые объединяют широкий ряд приборов: оптические пирометры (рис.1а), измерительные пирометрические системы, тепловизоры (см. рис.1б), сканирующие пирометры, анализаторы температурного поля и т.д. [1].



Рис. 1:
а – пирометр; б – тепловизор

Зачастую размеры пятна визирования таких ОЭСИТ превышают размеры контролируемого участка локального объекта, следовательно, необходимо провести исследование методов позволяющих получить точечные оценки температуры локальных полей.

Опτικο-электронные методы позволяют измерить температуру объекта путем анализа параметров потока теплового излучения от объекта (1–4).

В основе этих методов лежит зависимость величины и спектрального распределения плотности энергии излучения b_{IT} – объекта от его температуры, определяемая для «черного» тела формулой Планка:

$$b_{IT} = C_1 I^{-5} \left(\exp \frac{C_2}{IT} - 1 \right)^{-1}, \quad (1)$$

где T – температура, К; $C_1 = 3,7413 \cdot 10^{-12}$ Вт·см²; $C_2 = 1,436$ см·град; I – длина волны излучения, мкм.

С относительной погрешностью $d = \frac{\Delta b_{IT}}{b_{IT}} = \exp \left(-\frac{C_2}{IT} \right)$ формула Планка может быть аппроксимирована формулой Вина:

$$b_{IT} = C_1 I^{-5} \exp \left(-\frac{C_2}{IT} \right), \quad (2)$$

а с погрешностью

$$d = 1 - \left[\exp \left(\frac{C_2}{IT} - 1 \right) \right]^{-1} T I C_2^{-1}$$

– формулой Рэлея–Джинса:

$$b_{IT} = \frac{C_1}{C_2} I^{-4} T. \quad (3)$$

Непосредственной задачей ОЭСИТ, измеряющей температуру объекта по излучению, является дистанционное измерение параметров потока излучения, испускаемого объектом (или частью объекта). К параметрам, характеризующим поток излучения, относятся абсолютное значение этого потока и его спектральное распределение. В связи с этим ОЭСИТ делят на энергетические и спектральные отношения.

В энергетических ОЭСИТ осуществляется прием и измерение потока излучения от объекта в одном участке ΔI спектра, в спектральных — в нескольких (двух и более) участках спектра: $\Delta I_i = 2, 3, \dots, N$. Соответствующие ОЭСИТ будем называть системами: 1) суммарного излучения (радиационными) при $\Delta I \rightarrow \infty$; 2) частичного излучения (монохроматическими) при $\Delta I \rightarrow 0, \Delta I = \text{const}$; 3) спектрального отношения (цветовыми) при $N=2$; 4) многоспектральными (многоцветовыми) при $N \geq 3$.

Абсолютное значение потока излучения Φ , преобразуемого ОЭСИТ в электрический сигнал, определяется коэффициентом A использования потока от объекта и коэффициентом спектрального пропускания оптической системы t_l , т. е.:

$$\Phi = A \int_0^{\infty} b_l t_l dl . \quad (4)$$

Следовательно, расчётное значение температуры t_p можно получить путём нахождения свёртки (5) функции $j(x, y)$, которое выражает распределение плотности энергии получаемой от объекта и функции $g(x, y)$, которое в свою очередь описывает коэффициент пропускания оптической системы пирометра, тепловизора:

$$t_p = \int_0^a \int_0^b j(x, y) g(x, y) dx dy . \quad (5)$$

Функция $g(x, y)$ в большей степени зависит от следующих факторов [6]:

1) Поле зрения пирометра (рис. 2) – область пространства, в пределах которой производится измерение температуры. Для корректного проведения измерений необходимо чтобы объект полностью перекрывал поле зрения. В противном случае, во первых, поток теплового излучения попадающий на приемник (датчик) пирометра от объекта измерения уменьшится пропорционально сокращению перекрываемой объектом площади, во вторых, на приемник будет попадать излучение заднего фона (объектов, расположенных за объектом измерения). Однако всё равно возможен случай, когда температурное поле локального объекта попадает частично в поле зрения пирометра (см. рис. 3), вследствие чего необходимо смещать поле зрения пирометра, для того чтобы охватить объект полностью (рис. 4). Такой случай возможен при низких показателях визирования пирометра (12:1, 50:1);

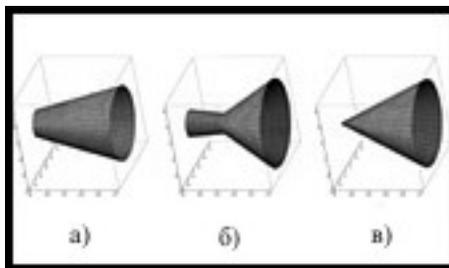


Рис. 2. Поле зрения пирометра:
 а – в виде усечённого конуса; б – с «перетяжкой»; в – в виде конуса

2) Показатель визирования (рис. 5) h – равен отношению диаметра D поля зрения к расстоянию L до точки измерения (6):

$$h = \frac{D}{L}. \quad (6)$$

Функция $j(x, y)$ также имеет сложный характер и зависит от многих факторов: неоднородности нагрева, теплофизических свойств материала, нарушений однородности, качества поверхности, геометрических размеров, анизотропии и т.д. Для получения точечных оценок этого распределения, возможно использование способа, основанного на применении ПЗС матриц.



Рис. 3. Пятно визирования пирометра

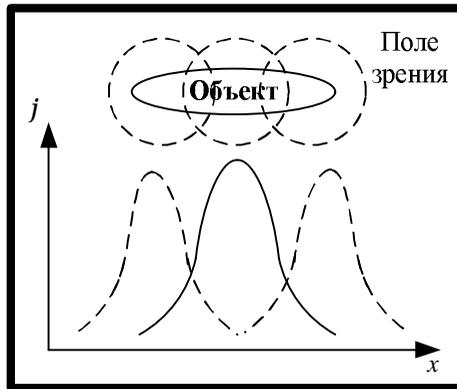


Рис. 4. Смещение поля зрения пирометра

ПЗС-матрица (сокр. от «прибор с зарядовой связью») или *CCD*-матрица (от англ. *CCD*, «*Charge-Coupled Device*») – специализированная аналоговая интегральная микросхема, состоящая из светочувствительных фотодиодов, выполненная на основе кремния, использующая технологию ПЗС — прибо-

ров с зарядовой связью (рис. 6). Эти матрицы являются составной частью практически всех современных цифровых фотоаппаратов [2].

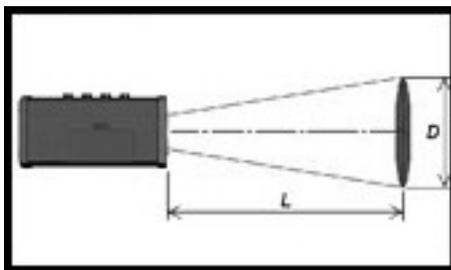


Рис. 5. Показатель визирования

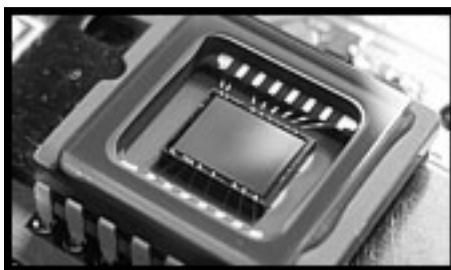


Рис. 6. ПЗС-матрица

Таким образом, возможна обработка изображений температурных полей локальных объектов полученных с помощью фотоаппарата. Такую обработку позволяет провести программный пакет *MathCAD*, который обладает вложенными функциями обработки изображений, вот некоторые из них [9, 10]:

1. *READIMAGE* – читает изображение в матрицу в серых полутонах;
2. *READBMP* – создает матрицу, описывающую изображение в формате BMP (в оттенках серого);
3. *READRGB* – создает матрицу, описывающую цветное изображение, исходя из RGB-модели;
4. *READ_HLS* – создает матрицу, описывающую цветное изображение, исходя из HLS-модели;
5. *READ_HSV* – создает матрицу, описывающую цветное изображение, исходя из HSV-модели;
6. *READ_RED* – возвращает матрицу красной составляющей изображения исходя из RGB-модели;
7. *READ_GREEN* – возвращает матрицу зеленой составляющей изображения исходя из RGB-модели;

8. *READ_BLUE* – возвращает матрицу синей составляющей изображения исходя из *RGB*-модели;

9. *READ_HLS_LIGHT* – возвращает матрицу составляющей освещенности изображения исходя из *HLS*-модели.

Ниже представлены графики, полученные с помощью этих функций, различных температурных полей (см. рис. 7) при нагревании стальной пластины толщиной 1мм, и габаритными размерами 15×15см.

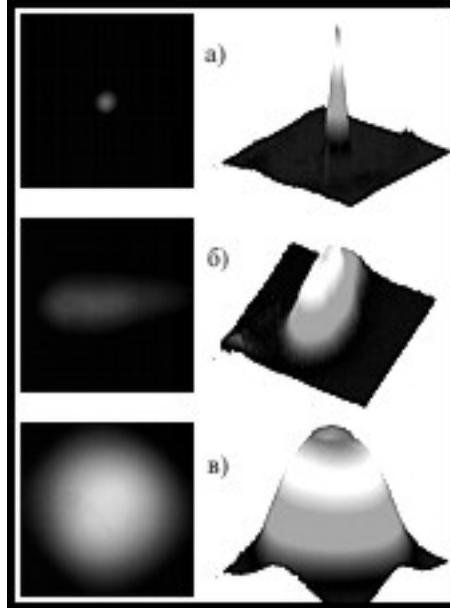


Рис. 7. Температурные поля локальных объектов:
а – точечный нагрев; б – линейный; в – общий

Обобщая приведенные в работе результаты, можно отметить, что бесконтактные методы измерения температуры локальных объектов обладают рядом преимуществ и недостатков по сравнению с контактными методами, а именно:

- высоким быстродействием, определяемым типом приёмника излучения и схемой обработки электрических сигналов. При использовании квантовых приёмников излучения (фотодиодов) и быстродействующих аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) постоянная времени может составлять $10^{-2} - 10^{-6}$ с ;

- возможностью измерения температуры движущихся объектов и элементов оборудования, находящихся под высоковольтным потенциалом;

– отсутствием искажения температурного поля объекта контроля, что особенно актуально при измерении температуры материалов с низкой теплопроводностью (дерево, пластик и др.), а также риска повреждения поверхности и формы в случае мягких (пластичных) объектов;

– возможностью измерения высоких температур, при которых применение контактных средств измерения либо невозможно, либо время их работы очень невелико;

– возможностью работы в условиях повышенной радиации и температуры окружающей среды (до 250°C) при разнесении приёмной головки и электроники пирометра с помощью оптоволоконного кабеля.

Основными недостатками пирометрических измерений температуры являются трудности полного учёта связей между термодинамической температурой объекта и регистрируемой пирометром тепловой радиацией. Необходимо учитывать изменение излучательной способности поверхности от длины волны в регистрируемом спектральном диапазоне и от температуры в диапазоне измерений, наличие поглощения излучения в среде между пирометром и объектом контроля, геометрические параметры поля зрения пирометра и его оптической системы, температуру окружающей среды и корпуса прибора.

Следует отметить, что функция распределения $j(x)$, если рассматривать срез температурного поля только вдоль оси x , имеет нормальный характер, что подтверждает статистическая обработка в *MathCAD* (рис. 8). Следовательно, функцию $j(x)$ можно привести к следующему виду (7):

$$j(x) = A \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2s^2}\right), \quad (7)$$

где A – коэффициент масштабирования; x – координата точечной оценки температуры, мм; m – мат. ожидание функции распределения $j(x)$; s – СКО функции распределения $j(x)$.

По виду закона распределения также можно судить о теплофизических свойствах металла и степени его нагретости. Ещё одним преимуществом, является то, что температурные картины, полученные после обработки в *MathCAD*, позволяют обнаружить дефекты, как на поверхности металла, так и скрытые нарушения однородности. На рис. 9 видны всплески температуры в точках нарушения поверхности исследуемого стального листа толщиной 1 мм.

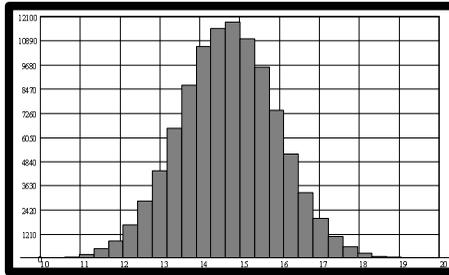


Рис. 8. Гистограмма функции распределения $j(x)$

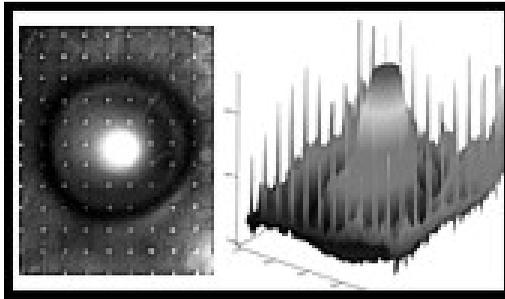


Рис. 9. Дефекты поверхности металла

Список литературы: 1. *Поскачей А.А., Чубаров Е.П.* Оптико-электронные системы измерения температуры. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 248с. 2. *Крикунцов Л.З., Падалко Г.А.* Тепловизоры: Справочник. – К.: Техніка, 1987. – 166с. 3. *Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., и др.* Применение ЭВМ для решения задач теплообмена. – М.: Высш. шк., 1990. – 207 с. 4. *Карслоу Г., Егер Д.* Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 302с. 5. *Чихунов Д.А.* Практика применения пирометров и тепловизоров.// В мире НК №1(27), 2005. – с. 61-63 6. *Неделько А.Ю.* Преимущества и недостатки бесконтактного измерения температуры.// ОАО НПП «Эталон», 2007. – 3с. 7. *Литвин А.М.* Теоретические основы теплотехники. – М.: «Энергия», 1969. – 328с. 8. *Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., и др.* Тепло-технические измерения и приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 232 с. 9. *Гурский Д.А., Турбина Е.С.* Вычисления в MathCAD12. – СПб.: Питер, 2006. – 544с. 10. *Преображенский В.П.* Теплотехнические измерения и приборы. – М.: «Энергия», 1978. – 704с. 11. *Госсорг Ж.* Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. – М.: Мир, 1988. – 416с.

Поступила в редколлегию 17.12.08