

МЕТОДЫ ВЫРАВНИВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТЕПЛООТДАЮЩЕЙ ПЛАСТИНЫ

**В.А. Кораблёв, кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
А.В. Шарков, доктор технических наук, профессор.**

**Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики.**

Д.А. Минкин, кандидат технических наук, доцент.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России

Проведен обзор методов выравнивания температурного поля для теплоотдающих изотермических объектов.

Ключевые слова: температурное поле, изотермическая поверхность, интенсивность теплообмена

METHODS FOR EQUALIZING OF THERMAL FIELD OF VERTICAL HEATED PLATE

V.A. Korablev; A.V. Sharkov.

Saint-Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics.

D.A. Minkin. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

Methods for equalizing of thermal field is suggested for heated isothermal objects.

Keywords: thermal field, isothermal surface, intensity of heat transfer

Задача формирования температурных полей объектов различного назначения решается авторами уже на протяжении многих лет, однако она не утратила своей актуальности. Совершенствование термометрических систем в части точности работы, мобильности, увеличение плотностей мощности тепловыделений в элементах радиоэлектронных устройств, развитие теплотрии, расширение рабочего диапазона рабочих температур приборов и устройств, областей их применения, специфика условий эксплуатации и т.п. – все эти факторы определяют необходимость разработки новых или совершенствования уже существующих методов формирования температурных полей. В ряде случаев важно обеспечить изотермические условия. В настоящей работе рассматриваются наиболее распространенные методы выравнивания температурных полей, применяемые в приборостроении.

Задача обеспечения равномерности температурного поля вертикальной пластины, находящейся в конвективно-лучистом теплообмене с окружающей средой, является распространенной, в частности в приборостроении: объекты такого типа часто встречаются в элементах конструкций различных приборов и устройств. Наиболее жесткие требования по уровню неизотермичности предъявляются к вертикальным плоским протяженным излучателям в калибровочных устройствах. Неравномерность температурного поля более $\pm 0,2$ °С проявляется уже при перегревах над температурой среды $10\div 15$ К, что является критичным для такого класса приборов.

Для метрологического обеспечения тепловизионных приборов разрабатываются специальные калибровочные устройства. Их основу представляет собой протяженный инфракрасный (ИК) излучатель в виде плоской нагретой поверхности [1], к которой предъявляются особые требования по следующим параметрам:

- коэффициенту излучения;
- точности поддержания температуры излучателя;

- температурному полю его поверхности;
- возможности перенастройки на требуемые режимы калибровки;
- времени выхода на режим.

Коэффициент черноты плоских излучателей меньше, чем у полостных моделей абсолютно черных тел (АЧТ), однако их часто называют моделями АЧТ. Степень черноты плоских излучателей порядка 0,95 достигается за счет нанесения покрытий.

В зависимости от вида проводимого метрологического обеспечения в комплект АЧТ входят тест-объекты, которые изготавливаются с определенной конфигурацией для контроля соответствующих поверяемых характеристик тепловизоров, выбираются геометрия излучателя и методы формирования его температурного поля. При этом формирование температурного поля необходимо проводить с точностью, превосходящей чувствительность калибруемых приборов.

Поддержание с заданной точностью требуемого уровня температуры излучателя калибровочного устройства и формирование его температурного поля реализуется разработчиками различными способами.

Фазовые переходы (плавление, затвердевание чистых веществ), как правило [2], используются в калибровочных устройствах для уровня температур порядка 800–2 500 °С, в диапазоне температур 0÷150 °С для поставленной задачи часто [2] применяются термобатареи и электронагреватели, жидкостные термостаты.

Термобатареи и электронагреватели позволяют значительно сократить время выхода излучателя на заданный тепловой режим по сравнению с жидкостными системами. Термобатареи в этом случае имеют преимущество перед подогревными системами, поскольку позволяют одинаково быстро перенастраиваться с более высокого на низкий уровень температуры и наоборот. Такие методы реализованы в ряде устройств импортного и отечественного производства. Среди них: АЧТ М315х4 фирмы Mikron (США) (в качестве примера приведен на рис. 1); IR-2106/301 фирмы SBIR (США); отечественные модели АЧТ-5И производства омского завода «Эталон» и др.



Рис. 1. Протяженный излучатель М315, «Mikron»

Во всех представленных выше моделях АЧТ применяется равномерное распределение плотности подводимого (отводимого) теплового потока по поверхности пластины излучателя. Экспериментальные исследования вертикальных поверхностей с таким распределением нагревательных (охладительных) элементов показали, что по высоте излучателя возникает неравномерность температурного поля, которую чувствуют современные измерительные тепловизионные системы. В ряде случаев это не позволяет проводить некоторые виды метрологического обеспечения тепловизоров с требуемой точностью.

В статье [3] показаны результаты исследования поверхности плоского излучателя модели АЧТ-5И с равномерным распределением термоэлектрических элементов. Неравномерность температурного поля по высоте излучателя диаметром 110 мм при уровне температур 35 °С составила $\pm 0,1$ °С.

Одним из самых простых в реализации методов выравнивания температурного поля – выбор геометрии и материала излучателя: изготовить пластину излучателя из материала, обладающего высокой теплопроводностью, при этом саму пластину выполнить толщиной несколько сантиметров. В устройстве 150TE американской фирмы Optical Energy Technologies установлена такая утолщенная высокотеплопроводная пластина излучателя размером 4'x4'', охлаждаемая/нагреваемая термоэлектрически в диапазоне температур 0÷150°С, (рис. 2). Неравномерность температурного поля такого излучателя по данным производителя составляет ± 1 °С. Это значительно превышает допустимый уровень неизотермичности при калибровке современных тепловизоров. К недостаткам реализованного метода также можно отнести высокую инерционность излучателя.

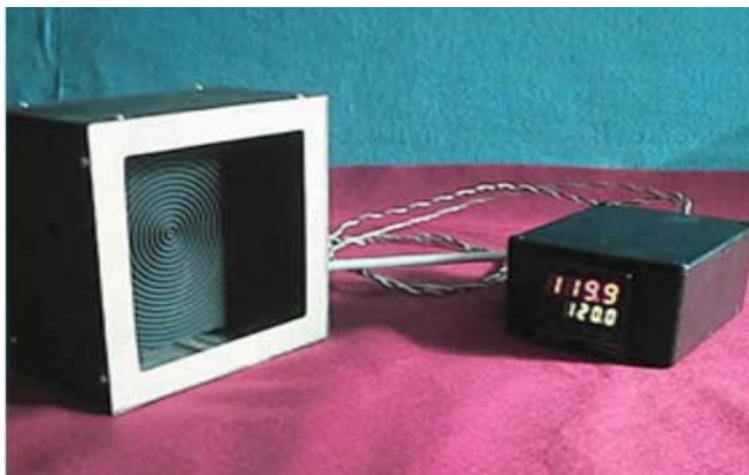


Рис. 2. Утолщенный протяженный излучатель 150 TE, «Optical Energy Technologies»

В ходе исследований протяженных излучателей в работе [4] так же была выявлена неоднородность распределения температуры по его поверхности. Максимальный градиент при температуре излучателя 30 °С составил 0,2 °С/см. Для устранения градиентов в устройстве [4] применена жидкостная система термостатирования. На тыльной поверхности излучателя устанавливается ванна жидкостного термостата. При этом сам излучатель выполняет функцию стенки ванны термостата. Обеспечение высокой изотермичности обеспечивается за счет интенсификации вынужденной конвекции на его тыльной поверхности – активного перемешивания теплоносителя по всему объему ванны. Описанная система термостатирования позволила снизить градиент температур по излучателю до 0,05 °С/см. По такому принципу построен ряд устройств Омского завода «Эталон». В качестве примера на рис. 3 приводится ПЧТ-540/40/100 – протяженное черное тело для калибровки тепловизоров. Основным недостатком использования этого метода формирования температурного поля излучателя – длительное время выхода устройства на заданный тепловой режим (30 мин), значительный вес и громоздкость устройств.

Для обеспечения изотермичности протяженных объектов приборостроения в ряде случаев удобно подводить переменную по поверхности плотность теплового потока в зависимости от условий теплообмена на разных ее участках. Это позволяет повысить точность регулирования температуры, сократить время выхода на заданный тепловой режим. Существует ряд примеров реализации такого метода.



Рис. 3. Протяженный излучатель ПЧТ-540/40/100, «Эталон»

В диссертации А.В. Соболева [5] решается задача обеспечения максимальной равномерности распределения температуры в рабочем пространстве многозонного термического объекта. Автором предлагается неравномерность температурного поля снижать за счет использования оптимального управления. Для реализации такого управления использованы многоканальные системы регулирования температуры. Такие системы позволяют обеспечить высокую точность поддержания заданного значения температуры по сравнению с системами, содержащими один канал управления. В работе проведена значительная доля исследований в области многозонного регулирования: разработан способ дискретного согласованного распределения мощностей по зонам регулирования; разработана методика оценки точности регулирования температуры; создана математическая модель многозонной электропечи; разработан способ оптимального управления процессом нагрева в многозонной печи; получен ряд новых технических решений.

Предложенный А.В. Соболевым метод формирования температурного поля можно отнести к универсальному. Выгодность его использования очевидна в тех случаях, когда в объекте термостатирования необходимо перенастраивать и создавать температурные поля разных профилей. Недостатки заключаются в том, что он дорог и сложен в реализации, создание многоканальных систем управления термическим объектом позволит поддерживать требуемую температуру только в месте расположения датчика, а в области между соседними датчиками могут возникать искажения в температурном поле, превосходящие допустимый уровень неравномерности.

Другим распространенным методом формирования температурного поля объекта является перераспределение источников тепловыделения в нем. В качестве примеров реализации такого метода можно привести работы [6, 7]. В них рассматривалась проблема неизотермичности конфорок электроплит [6] и теплонагруженного электронного модуля [7].

Оптимизация конструкции термических объектов в этих работах направлена на уменьшение расстояния между соседними тепловыделяющими элементами в местах с относительно низкой температурой и увеличение расстояния в местах с относительно высокой температурой. Для этого сначала рассчитывались температурные поля объектов с помощью метода конечных элементов. Далее, по результатам численного моделирования варьировалось расстояние между тепловыделяющими элементами и расчет температурного поля повторялся. Пример построенной модели приведен на рис. 4. Таким образом, методом нескольких последовательных итераций были получены рекомендуемые варианты

расположения тепловыделяющих элементов исследуемых термических объектов. При этом количество тепловыделяющих элементов в рассматриваемых объектах не превышало трех.

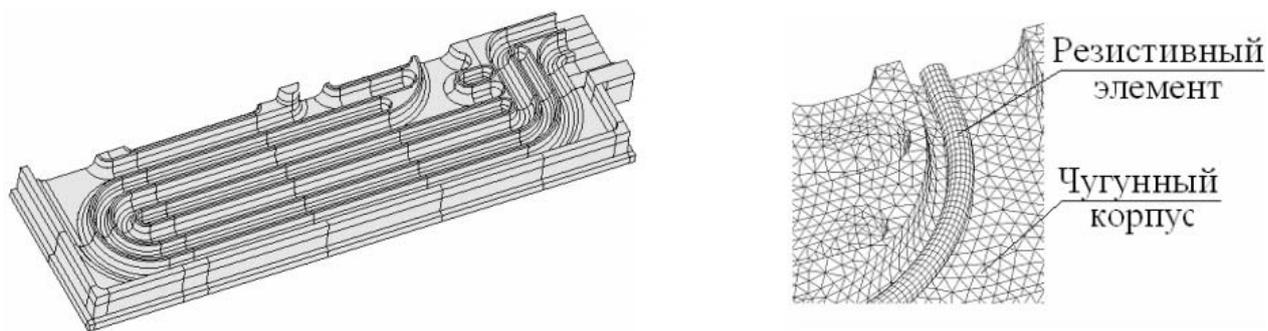


Рис. 4. Модель нагревательного элемента в электроплите

Предложенные в работах [6, 7] методы выравнивания температурного поля обладают существенным недостатком, который заключается в том, что при количестве витков нагревателя больше 6–8 предложенный авторами алгоритм итераций трудно реализуем для формирования требуемого температурного поля.

Можно сделать вывод, что из приведенных в обзоре методов формирования температурного поля наибольший интерес представляет метод перераспределения источников тепловыделений, так как по сравнению с другими обладает рядом преимуществ. В частности: простота реализации, широкий диапазон рабочих температур, высокая надежность, меньший вес и цена технических решений. В проведенном обзоре источников не были найдены методы расчета и выбора параметров для реализации в приборах и устройствах. Задача формирования равномерного температурного поля решаются авторами эмпирически.

Литература

1. ГОСТ Р 8.619–2006 ГСИ. Приборы тепловизионные измерительные. Методика поверки // Электронный фонд правовой и нормативно-технической информации. URL: <http://www.docs.cntd.ru> (дата обращения: 16.12.2015).
2. Волков С.П., Никоненко В.А. Метрологическое обеспечение неконтактных средств измерения температуры // Сфера Нефть-газ. 2007. № 2.
3. Курбатова Н.А., Троценко Д.П. Методика калибровки тепловых излучателей для определения характеристик оптико-электронных приборов: сб. трудов VI Всерос. межвуз. конф. молодых ученых ИТМО. 2009. С. 45–47.
4. Никоненко В.А., Сильд Ю.А., Иванов И.А. Разработка системы метрологического обеспечения измерительных тепловизионных приборов // Измерительная техника. 2004. № 4. С. 48–51.
5. Соболев А.В. Повышение точности регулирования температурного поля путем совершенствования алгоритма управления многозонным термическим объектом: дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2004.
6. Солдусова Е.А. Совершенствование конструкций резистивных конфорок электроплит предприятий общественного питания с использованием методов численного имитационного моделирования: дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 129 с.
7. Колпаков А. Совершенствование силовых электронных модулей. Проблемы и решения // Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2005. № 5.