

Методы измерения температуры в технологиях сверхвысокочастотного нагрева

Борис Алексеевич Лапшинов

Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий, Москва, Россия, lbaniipmt@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-8369-6837>

Аннотация. В промышленных технологических процессах, связанных с нагреванием обрабатываемого материала сверхвысокочастотным излучением, необходимо применение измерительной аппаратуры для контроля температуры объектов. Рассмотрены методы измерения температур в областях техники, использующих системы нагрева сверхвысокочастотным излучением. Определены основные возможности, недостатки и ограничения используемых контактных и бесконтактных (оптических) методов измерения. Перечислены требования, предъявляемые к системам измерения температур в условиях воздействия сильных электромагнитных полей. Особо отмечены возможности и преимущества метода спектральной пирометрии.

Ключевые слова: сверхвысокочастотный нагрев, температура, измерение, контактные методы, оптические методы

Для цитирования: Лапшинов Б. А. Методы измерения температуры в технологиях сверхвысокочастотного нагрева // Измерительная техника. 2021. № 6. С. 20–28. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-6-20-28>

Methods of temperature measurement in microwave heating technologies

Boris A. Lapshinov

Research Institute of Advanced Materials and Technologies, Moscow, Russia, lbaniipmt@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-8369-6837>

Abstract. In industrial technological processes associated with the heating of the processed material by microwave radiation, it is necessary to measure the temperatures of objects. Methods for measuring temperatures in the fields of technology using microwave heating systems are considered. The main possibilities, disadvantages and limitations of the used contact and non-contact (optical) measurement methods are determined. The requirements for temperature measurement systems under conditions of exposure to strong electromagnetic fields are listed. The possibilities of the spectral pyrometry method are especially noted.

Keywords: microwave heating, temperature, measurement, contact methods, optical methods

Введение. Многие промышленные технологические процессы связаны с нагреванием обрабатываемого материала. В обычном промышленном термическом оборудовании тепловая энергия генерируется электрическими токами или сжиганием топлива и передаётся нагретому материалу с помощью механизмов теплопроводности, конвекции, излучения или их сочетания. При этом вся необходимая тепловая энергия сначала поглощается поверхностью материала, а затем за счёт теплопроводности передаётся внутрь объекта. Скорость теплового потока внутри объекта полностью определяется физическими свойствами материала – теплопроводностью, удельной теплоёмкостью и массовой плотностью. При этом между поверхностью и внутренней областью объекта возникает градиент температуры. Кроме того, в процессе облучения объекта часть энергии теряется на нагрев промежуточной среды (например, горячего воздуха). Соответственно, время, требуемое для нагревания объекта, также увеличивается.

Вместо традиционного процесса нагрева во многих технологиях используется сверхвысокочастотный (СВЧ) нагрев. СВЧ-нагрев обеспечивает высокую эффективность преобразования электрической энергии в электромагнитную, что связано с высоким коэффициентом полезного действия современных магнетронов – 86 и 80 % на частотах соответственно 915 и 2450 МГц. В отличие от обычных методов нагрева, микроволновый нагрев – объёмный процесс, так как микроволновая энергия проникает внутрь объекта и равномерно нагревает его объём. Следовательно, поверхность и внутренняя область объекта нагреваются одновременно, что приводит к значительному сокращению энергопотребления и времени нагрева.

Преобразование электромагнитной энергии в тепловую энергию зависит от электромагнитных свойств материала – электрической проводимости, магнитной и абсолютной диэлектрической проницаемостей. С термодинамической точки зрения материал выступает в качестве источника теплоты.

СВЧ-излучение может взаимодействовать с веществами, находящимися в газообразном, жидком или твёрдом состояниях.

Однако микроволновый нагрев не всегда равномерен. В отличие от обычного нагрева, где распределение температуры достигает равновесия за определённое время, распределение температуры микроволнового нагрева изменяется в течение всего процесса нагрева из-за зависимости диэлектрических свойств нагреваемых материалов от температуры и неравномерности этих свойств в объёме материала. Существует ряд пространственно-распределённых горячих и холодных точек, их распределение обусловлено не только свойствами обрабатываемого материала, но и распределением электромагнитного поля внутри камеры печи.

Возможности СВЧ-нагрева ограничивает отсутствие перестройки в достаточно широком диапазоне частоты стандартных генераторов СВЧ-излучения – магнетронов. Частота генерации магнетронов строго определяется напряжённостью их магнитного поля и геометрическими размерами. Существует несколько стандартных промышленных частот, большинство исследователей используют серийные магнетроны с частотой 2,45 ГГц.

СВЧ-нагрев используется во многих отраслях науки и техники – в пищевой, химической (включая нефтепереработку) и деревообрабатывающей промышленности; в сельском хозяйстве; при спекании керамики и металлообработке и т. п. [1, 2]. Все технологические и исследовательские СВЧ-установки должны иметь дополнительную контрольно-измерительную аппаратуру, необходимую при управлении технологическими процессами.

Измерение температуры – одна из важнейших и неотъемлемых составляющих многих технологических процессов. Однако при воздействии на объект сильных электромагнитных полей измерение температуры затруднено и порой невозможно в связи с отсутствием нужных измерительных устройств. Традиционные температурные измерения, как правило, характеризуются известными объектами, процессами и отработанными методиками измерений для определённых условий выполнения измерений. Специальные температурные измерения затруднены многочисленными сочетаниями нестандартных объектов и условий исследования. Несмотря на разнообразие физических явлений, используемых в термометрии, существует разрыв между возможностями создания методов решения конкретных задач и реальным уровнем термометрии в исследованиях и технологическом контроле.

Согласно [3] идеальный метод термометрии, предназначенный для измерений в сложных экспериментальных условиях, должен обладать следующими свойствами:

отсутствие необходимости теплового равновесия чувствительного элемента (датчика) с объектом, т. е. при измерении не требуется тепловой контакт датчика с поверхностью;

отсутствие гальванической связи датчика с регистрирующим прибором, что устраняет электромагнитные помехи при измерениях;

результат измерения не зависит от наличия или отсутствия фонового излучения любой интенсивности в реакторе и от состояния оптических окон;

температурная чувствительность не ниже, чем у традиционных методов;

измеряемый сигнал достаточен для надёжной регистрации и существенно не изменяется в широком диапазоне температур;

высокое быстродействие, которое позволяет измерять нестационарные температуры поверхности в импульсных процессах;

возможны как локальные измерения, так и термография поверхностей;

возможна термометрия любых материалов (металлов, полупроводников, диэлектриков) независимо от состояния поверхности (шероховатость, тонкие плёнки и т. д.);

возможно применение метода как для единичных, так и для рутинных измерений;

возможно применение метода для термометрии как неподвижных, так и движущихся объектов.

Цель статьи – описать основные возможности, недостатки и ограничения существующих методов измерения температуры объектов в условиях СВЧ-нагрева.

Методы измерения температуры в СВЧ-технологиях.

Методы измерения температуры объектов под действием электромагнитных полей разделяются на контактные и бесконтактные.

Контактные методы. *Использование термопар.* Термопары часто используются для измерения температуры в СВЧ-процессах. В ходе экспериментов разных авторов [4, 5] установлено, что для корректного применения термопары необходимо ориентировать её проводники строго перпендикулярно вектору электрического поля СВЧ-волны и защищать термопару заземлённым экраном, чтобы избежать токов вдоль проводников и вызываемых СВЧ-полем разрядов. Это требование фактически ограничивает область применения термопар однофазными системами, в которых направление электрического поля известно заранее. Термопары, являясь проводниками, искажают распределение электрического поля. Кроме того, из-за высокой теплопроводности термопары могут эффективно выносить тепловую энергию из нагреваемого образца. По этой причине термопары пригодны для измерения температуры лишь крупных образцов. Причём для измерения температуры необходим тепловой контакт термопары с исследуемым веществом, что затруднительно при нагревании порошков, керамик и других материалов с низкой плотностью. Перечисленные факторы часто вносят погрешности в результаты измерений и приводят к противоречиям в интерпретации этих результатов. Методом термопар можно измерять температуры до 2000 °С.

Во многих СВЧ-технологиях используют экранированные термопары. Экранирование позволяет избежать следующих нежелательных процессов: нагревания металлических компонентов в СВЧ-полях; появления кратковременных высоковольтных разрядов; попадания искры через металлические провода на легковоспламеняющиеся и взрывоопасные среды. Кроме того, металлические провода влияют на нагрев среды за счёт переотражений СВЧ-излучения от проводов, что вызывает перераспределение теплового поля.

Вследствие высокой теплопроводности, металлические провода в точках измерения могут значительно изменять температуру, что приводит к искажению результатов измерения.

Микроволновой нагрев как разновидность технологии очистки материалов давно используется в металлургии. В [6] предложен способ использования СВЧ-нагрева в металлургии цинка. Для измерения температуры использовалась термопара, подключенная к компьютерной системе, в комплекте со специальным тонким ленточным защитным экраном из алюминия. Такая система позволяла измерять температуру с погрешностью 2°C в диапазоне температур до 800°C .

В [7] СВЧ-нагрев применялся для регенерации гранулированного активированного угля. Эксперименты по регенерации проводились в установке с переменной мощностью $1,2\text{ кВт}$ (магнетрон 2450 МГц). Партии исходного материала помещались в кварцевый реактор высотой 290 мм и наружным диаметром 45 мм . Реактор снабжался входом и выходом газа, а также отверстиями для ввода термопар. Температура измерялась с помощью термопар типа К, экранированных нержавеющей сталью. В ходе экспериментов удалось уменьшить помехи до разрешения термопары $\pm 1,5^\circ\text{C}$ при нагреве до $650\text{--}750^\circ\text{C}$. Авторы [7] рекомендовали использовать экранированные удлинительные кабели, заземлённые на схему усилителя термопары, удалять схему как можно дальше от зоны высокого напряжения и исключать в схеме (при проектировании) электромагнитные помехи от высоковольтной цепи.

В сложных исследованиях влияния микроволнового нагрева на диэлектрические свойства оксида цинка ZnO и феррита цинка ZnFe_2O_4 методами дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрии [8] в диапазоне температур $20\text{--}1400^\circ\text{C}$ также использовалась термопара типа К с экраном из нержавеющей стали. Данные о точности измерения температуры в исследовании не приводились.

В некоторых технологиях, например при изготовлении песчаных форм для литья [9], для измерения температуры с помощью термопары используется её быстрый ввод в область нагрева после отключения СВЧ-излучения для предотвращения взаимодействия термопары с полем.

В исследовании [10] при СВЧ-нагреве термопара помещалась в кварцевую трубку толщиной 1 мм . Однако кварц не экранировал микроволновое поле, поскольку его относительной диэлектрической проницаемости недостаточно для ослабления микроволнового поля на расстоянии 1 мм .

В [4] для измерения температуры предложена и реализована контактная диагностика – зонд из керамики на основе оксида бериллия (BeO) контактирует с нагреваемым образцом. Зонд передает тепловую энергию за счёт теплопроводности за пределы волновода, где электрическое СВЧ-поле пренебрежимо мало и можно использовать термопары. Керамика BeO , помещённая в волновод, почти не нагревалась под действием микроволнового излучения (вследствие высокой теплопроводности $270\text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ и слабого поглощения СВЧ-волн), но эффективно передавала тепловую энергию от нагреваемого образца, что позволяло судить о его температуре внутри волновода в процессе нагрева. Оказалось,

что при термопаре, вынесенной за пределы волновода на 5 см , изменение температуры образца корректно оценивалось по показаниям термопары примерно через 30 с . Таким образом, если характерные времена процессов, происшедших с образцом при нагреве, составляли более 30 с , то применение описываемого керамического зонда для измерения температуры образца оказывалось правомерным. Для измерения зависимости температуры образца от времени использовали медь-константановую термопару с рабочим диапазоном температур $0\text{--}400^\circ\text{C}$.

Таким образом, при сильных электромагнитных полях, в том числе СВЧ-диапазона, в традиционных устройствах измерения температуры на основе термопар, помещённых непосредственно в электромагнитное поле, обычно применяются сложные системы экранирования.

Использование термоиндикаторов. Термоиндикатор – это вещество (или смесь веществ), изменяющее свой внешний вид (цвет, яркость свечения, форму) при определённой температуре [11].

Для измерения температуры используются следующие вещества: термоиндикаторы плавления, цвет которых изменяется при критической температуре в связи с плавлением одного или нескольких составляющих компонентов; термоиндикаторные краски на основе продуктов, чувствительных к температуре и при изменении температуры способных изменять цвет; жидкокристаллические термоиндикаторы, содержащие жидкокристаллическое вещество, которое в определённом интервале температур изменяет свою структуру так, что падающий на него свет белого источника отражается с изменением цвета, которое зависит от температуры. Однако эти индикаторы подвержены влиянию СВЧ-полей и их применение в промышленности ограничено. Термоиндикаторные краски обеспечивают точные измерения в диапазоне температур $30\text{--}1280^\circ\text{C}$. Цветовой переход термоиндикаторных красок составляет более $\pm 2^\circ\text{C}$ (краски фирмы ЭЛ-СКАДА, Россия).

Нанесение термоиндикаторов непосредственно на исследуемую поверхность не только исключает электрические помехи, но и полностью решает проблему теплового контакта. Трудоёмкость исследования с применением термоиндикаторов увеличивается из-за того, что необходимо наносить слой термочувствительного материала на изучаемую поверхность. Поэтому метод термометрии с применением термочувствительного слоя не всегда удобен для проведения систематических исследований и непригоден для технологического контроля (из-за дополнительной операции).

Бесконтактные оптические методы измерения температуры. При нагреве в сильных электромагнитных полях возникают помехи из-за металлических элементов традиционных температурных датчиков, поэтому используются измерительные устройства на основе оптических методов измерения температуры. Методы дистанционных измерений основаны на применении волоконно-оптических линий.

Для измерения температуры разработаны разнообразные оптические устройства на базе различных физических эффектов. По принципу действия все оптические методы

измерений делятся на четыре класса в соответствии с тем, какой из параметров распространяющейся световой волны $E_0 \sim \exp(i\omega t + \varphi)$ используется для получения информации о регистрируемом физическом воздействии: амплитуда электрического поля E ; фаза φ ; состояние и направление поляризации электрического вектора P ; частота ω . Наиболее распространёнными оптическими методами измерения температуры являются амплитудные (оптическая пирометрия, поглощение света полупроводниками, температурное тушение флуоресценции, изменение оптических потерь) и фазовые (оптическая интерферометрия).

Калибровка оптических средств измерений. Используемые экспериментальные СВЧ-установки обладают рядом особенностей. Во-первых, в состав СВЧ-установок входят кварцевые трубки или реакторы, а низкая теплопроводность кварца задерживает обнаружение тепловых эффектов в обрабатываемых образцах. Во-вторых, воздух, окружающий образец, остаётся холодным при комнатной температуре, что вызывает понижение температуры поверхности образца. Таким образом, результат измерения температуры поверхности кварцевого реактора оптическими приборами нельзя рассматривать как температуру образца (объёмную температуру), и для её определения требуется калибровать оптический прибор в определённом диапазоне температур.

Чтобы минимизировать погрешности и неопределённость метода калибровки, в [12] предложены четыре независимых метода калибровки с использованием обычного нагревателя, волоконно-оптических датчиков, спектрометра комбинационного рассеяния и чистых солей.

Нагреватель закрытого типа с регулируемой температурой помещался в кварцевую трубку, размещённую в микроволновой камере, а затем температура нагревателя сравнивалась с температурой поверхности трубки, измеренной инфракрасным термометром. Поскольку микроволны отключались во время процедуры калибровки, температура определялась с помощью металлической термопары для соответствующего диапазона температур. Калибровочная кривая снималась на калибровочных образцах из различных материалов – глинозёма, дистиллированной воды, карбида кремния и алюминия. Диапазон неопределённости температуры указанных материалов при нагреве до 1100 °С составлял менее $\pm 5,5$ °С (менее 2 %).

Альтернативой термопар для определения температуры тел при микроволновом нагреве являются волоконно-оптические датчики, которые не подвержены электромагнитным помехам и не требуют экранирования [13]. Однако верхний предел измерения температуры волоконно-оптическими датчиками обычно составляет не более 300 °С. При их калибровке температура нагреваемого образца, измеренная волоконно-оптическим датчиком, сравнивается с температурой поверхности образца, измеренной инфракрасным пирометром. Образцами служат дистиллированная вода и карбид кремния, которые поглощают микроволновую энергию и имеют различную теплопроводность.

При калибровке с применением чистых солей анализируются результаты непрерывного измерения диэлектрических

свойств чистых солей, например сульфата серебра Ag_2SO_4 , как функции температуры поверхности во время микроволнового нагрева [12]. Образец соли выливается в кварцевую трубку и нагревается микроволновым излучением, причём мощность нагрева регулируется с приблизительной скоростью 5 °С/мин.

Для идентификации тепловых эффектов используются эталонные материалы с известными комбинационными сдвигами [12], например, титанат висмута $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$, который принадлежит к золотосодержащему семейству и проявляет сегнетоэлектрические и пьезоэлектрические свойства даже при высоких температурах. Рамановский отклик титаната висмута отражает орторомбический фазовый переход в тетрагональный при объёмной температуре $(677,5 \pm 2,5)$ °С. Образец титаната висмута помещается в кварцевый держатель и подвергается микроволновому нагреву в реакторе, скорость нагрева образца около 10 °С/мин. Изменение диэлектрических свойств образца и температуры поверхности держателя сравнивают с комбинационным сдвигом. Вблизи температуры перехода диэлектрическая проницаемость уменьшается.

Для оценки объёмной температуры образцов в микроволновой системе можно применять любой из четырёх описанных методов калибровки или их комбинацию. Согласно калибровочным кривым разница между поверхностной и объёмной температурами образца постепенно увеличивается с увеличением температуры, т. е. неадекватная калибровка может привести к ошибкам в определении объёмной температуры порядка 200 °С при высоких температурах.

Влияние газов на излучательную способность нагреваемого объекта. Многие процессы, в которых используется СВЧ-нагрев (химические процессы, нагрев материалов в защитной среде, карбонизация различных материалов и пр.), проводятся в присутствии или при протекании различных технологических газов. В [14] сообщается, что присутствие различных газов в реакторе воздействует на испускаемое инфракрасное излучение и в конечном итоге влияет на кажущуюся излучательную способность объекта. Такие газы, как N_2 , H_2 , CO , CO_2 , CH_4 и другие углеводороды, из-за их колебательных и вращательных движений в инфракрасном диапазоне имеют значительные полосы поглощения. В статье изучено влияние отдельных реагентов и их возможных комбинаций на излучательную способность в реальных условиях реакции в диапазоне температур 300–1000 °С.

Использование волоконно-оптических датчиков. Для измерения температуры в промышленных условиях разработаны различные приборы на основе оптических волокон. Такие приборы регистрируют вызванные температурой изменения флуоресценции или спектров поглощения определённых специальных веществ. Волоконно-оптические датчики абсолютно невосприимчивы к электромагнитным полям и помехам. Обычный диапазон измерения температур –60...+300 °С.

Волоконно-оптический датчик Fotemp-H (Optocon, Германия) для измерения температуры входит в состав промышленного аппликатора непрерывной СВЧ-деполимеризации

полиэтилентерефталата [15]. Наружная оболочка датчика выполнена из тефлона, на его наконечнике закреплён кристалл GaAs, который становится оптически полупрозрачным при длинах световых волн более 850 нм. Запрещённая зона полупроводника смещается примерно на 0,4 нм/К, поскольку её положение зависит от температуры. Высокая скорость измерений, повторяемость и воспроизводимость результатов обеспечиваются входящими в состав прибора источником света и устройством спектрального определения запрещённой зоны. По данным термодатчика, согласно соответствующему алгоритму, устанавливается временной контроль температуры по заданному температурному сценарию.

Волоконно-оптический датчик, основанный на эффекте температурной зависимости интенсивности люминесценции определённых веществ, описан в [16]. В данной работе рассмотрены методы измерения температуры *in situ* по температурной зависимости времени жизни фотолуминесценции зондовых молекул при микроволновом облучении для двух систем субмикрочастиц: частиц ядра – оболочка ($\text{BaTiO}_3 - \text{SiO}_2$) и слоистых частиц вольфрамата с внедрёнными катионами аммония ($\text{C}_{16}\text{N}^+ - \text{W}_2\text{O}_7^{2-}$).

Измерение температуры по показателю поглощения материала. Для проведения активной термометрии твёрдых тел используются данные температурных зависимостей оптических параметров материалов – показателя преломления, ширины запрещённой зоны и другие. Так комплексный показатель преломления любого материала зависит от длины волны λ падающего света и температуры T . В [17] исследовалась температурная динамика пластины кремния при её нагревании микроволновым излучением. Пластина размером 2×2 см локально нагревалась с помощью СВЧ-сверлильного устройства [18]. Оптическая система измерения температуры содержала два лазерных диода InGaAs, работающих на длинах волн 1,3 мкм и 1,5 мкм, коллиматор, фильтры и детекторы проходящего излучения. Показатель преломления $n(T)$ полированных образцов кремния измерялся интерферометрическим методом на основе эталонного эффекта Фабри-Перо. Этот метод позволяет оценить скорость изменения температуры $T(t)$ в зависимости от изменения показателя преломления $n(T)$, что связано с температурно-зависимым расширением решётки кремния и генерацией свободных носителей.

Температурно-зависимый показатель преломления кремния в диапазоне 300–800 К можно аппроксимировать для ближнего инфракрасного излучения:

$$n(T, \lambda) = n(T_0, \lambda) + A_n(T - T_0),$$

где $T_0 = 300$ К; $n(T_0, \lambda) = 3,44$ и $3,47$ для длины волн 1,5 и 1,3 мкм соответственно; $A_n = 2 \cdot 10^{-4}$ для указанных длин волн.

Число интерферометрических колебаний интенсивности света, обусловленных изменением температуры, составляет

$$\Delta N(T) = 2/\lambda [n(T, \lambda)h(T) - n(T_0, \lambda)h(T_0)],$$

где $h(T)$ – зависящая от температуры толщина пластины.

Определив зависимости $n(T)$, $h(T)$ с помощью зафиксированных интерференционных осцилляций проходящего излучения лазера, через плоскопараллельную пластину кремния, можно рассчитать изменение температуры пластины.

Бесконтактные методы пирометрии. Наиболее распространённым методом измерения температуры является пирометрический, суть которого состоит в определении эффективной температуры поверхности нагретого тела по его тепловому излучению в ближнем инфракрасном и видимом диапазонах длин волн. Достоинством этого метода является отсутствие прямого контакта с образцом, т. е. процесс измерения не возмущает картину электрического поля и не влияет на температуру образца.

Спектральная интенсивность I теплового излучения абсолютно чёрного тела (АЧТ) описывается формулой Планка:

$$I = C_1 \lambda^{-5} / [\exp(C_2 / \lambda T) - 1],$$

где $C_1 = 37418$ Вт·мкм⁴/см²; $C_2 = 14388$ мкм·К.

Спектры теплового излучения реальных объектов отличаются от спектра излучения АЧТ, эти отличия описываются вспомогательной функцией $0 \leq \varepsilon(\lambda, T) \leq 1$, зависящей, в общем случае, от длины волны и температуры и называемой коэффициентом излучения (или излучательной способностью, или коэффициентом черноты). В некоторых случаях зависимость $\varepsilon(\lambda, T)$ удаётся рассчитать, но чаще её измеряют экспериментально, при этом для измерения коэффициента излучения требуется независимый метод измерения температуры объекта.

Мощность теплового излучения нагретого тела

$$P = \varepsilon \sigma T^4,$$

где ε – коэффициент излучения материала, который заранее неизвестен и может изменяться в ходе нагрева и при химических превращениях и фазовых переходах в веществе; σ – постоянная Стефана-Больцмана; T – абсолютная температура тела.

Основных методов пирометрии два – радиационный и оптический.

Радиационный метод пирометрии основан на зависимости яркости и интенсивности энергетического излучения от температуры материального тела в ограниченном волновом диапазоне. Определение температуры по тепловому излучению чаще всего проводят в инфракрасном диапазоне на длинах волн 8–14 мкм и 3–5 мкм (в окнах прозрачности атмосферы), а также в области видимого света на длине волны 0,65 мкм. Приборы, реализующие такой метод, называются инфракрасными пирометрами, радиометрами или термометрами.

Основным элементом инфракрасного пирометра является специальный датчик (полупроводниковый датчик, термопара или термобатарея), который преобразует яркость тепловой энергии инфракрасного диапазона в электрический сигнал. Здесь яркость теплового луча фиксируется оптической системой и обрабатывается датчиком. Электрический сигнал датчика поступает в блок обработки

информации, после чего результат измерения выводится на дисплей. Особенностью современных инфракрасных пирометров является переключатель коэффициента излучения. Большинство производителей инфракрасных температурных датчиков поставляют в комплекте с прибором таблицы, где указаны коэффициенты излучения для наиболее часто исследуемых поверхностей.

Оптические методы пирометрии основаны на зависимости цвета излучения от температуры объекта. Существуют два основных типа оптической пирометрии – яркостная и цветовая.

Яркостная пирометрия основана на том, что интенсивность излучения АЧТ на выбранной длине волны определяется только температурой. Измеряется интенсивность излучения I в одном узком спектральном интервале $\Delta\lambda$, практически на одной длине волны λ_1 . Для АЧТ через полученную точку $I(\lambda_1)$ проходит только одна планковская кривая. Для определения температуры нечёрного тела необходимо знать коэффициент $\varepsilon(\lambda_1)$ излучения на выбранной длине волны. Яркостный пирометр определяет так называемую яркостную температуру нагретого тела, которая всегда меньше его действительной температуры. Действительная температура определяется предварительным делением на $\varepsilon_\lambda(\lambda, T)$ результата измерения сигнала приёмника излучения пирометра. При этом необходимо учитывать весь оптический путь светового луча от излучающей поверхности до приёмника излучения.

Относительная погрешность вычисления температуры пропорциональна относительной погрешности определения коэффициента излучательной способности, которая увеличивается с увеличением температуры и длины волны.

Цветовая пирометрия (метод спектрального отношения) основана на однозначном определении температуры по отношению интенсивностей излучения АЧТ на двух длинах волн λ_1, λ_2 .

Процедура определения температуры методом цветовой пирометрии заключается в измерении интенсивностей I_1, I_2 на двух длинах волн, коррекции отношения I_1/I_2 с помощью вычисленного или измеренного отношения $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ и нахождении температуры для планковской функции

$$Z = (I_2 \varepsilon_1) / (I_1 \varepsilon_2),$$

которая характеризует отношение интенсивностей излучения АЧТ на выбранных длинах волн. Если отношение $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ неизвестно, то вычисленная цветовая температура может существенно отличаться от действительной температуры.

Пирометры всех типов часто используются при СВЧ-нагреве в различных технологических и исследовательских процессах [19–21].

К недостаткам методов пирометрии относятся следующие. Во-первых, пирометр обычно используется для измерения сравнительно высоких температур, как правило, более нескольких сотен градусов Цельсия. Во-вторых, пирометр измеряет температуру поверхности, которая всегда меньше температуры внутри образца, и при интенсивном нагреве

эта разность может достигать сотен градусов. В-третьих, поверхность образца должна быть в прямой видимости, что накладывает определённые ограничения на конструкции СВЧ-камер.

Кроме того, для значительной части материалов, применяемых в технике и технологии, отсутствуют данные об излучательной способности, и постоянно появляются новые объекты и материалы с неизученными оптическими свойствами. Для определения излучательной способности объекта требуются сложные высокотемпературные измерения с применением специального оборудования. Таким образом, для методов оптической пирометрии характерно отсутствие информационной самодостаточности – нет достоверных данных об излучательной способности исследуемого объекта и неясно, носит ли излучение равновесный (температурный) характер. Отсутствие таких данных может привести к значительным ошибкам при измерении температуры, полученные данные носят скорее качественный характер.

Спектральная пирометрия. В последние десятилетия оптическая пирометрия получила новые измерительные возможности. Это связано с разработкой и внедрением малогабаритных дифракционных спектрометров, работа которых основана на использовании многоэлементных детекторов излучения – линеек на приборах с зарядовой связью (ПЗС-линеек). Такие спектрометры за единицы миллисекунд регистрируют широкий спектр излучения в определённом диапазоне длин волн – ближнем ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном. При каждой фиксации спектра излучения он сравнивается со спектром АЧТ и определяются участки, где эти спектры подобны, т. е. где объект является серым телом. Переход от измерений интенсивностей излучения на одной или двух длинах волн к измерению в сплошном спектре (1000–2000 длин волн) позволяет определять температуру объектов, об излучательной способности которых нет никаких данных [22]. Излучательная способность $\varepsilon(\lambda, T)$ реальных объектов сильнее зависит от длины волны, чем от температуры. Для твёрдых тел эта зависимость носит сравнительно плавный характер, а для газообразных – резко колеблется.

Методы спектральной пирометрии позволяют получать существенно больше первичной информации об объекте, чем традиционные методы. Вместо одного или двух значений интенсивности света регистрируется несколько сотен или тысяч значений (сплошной спектр) с помощью спектрометров с полупроводниковой ПЗС-линейкой. Это позволяет компенсировать недостаток исходных знаний об объекте, без которых традиционные методы работать не могут. Поскольку в спектрометре отсутствует перестройка по длинам волн, каждый пиксел детектора каждый раз регистрирует излучение на одной и той же длине волны. На практике для определения температуры используется не весь зарегистрированный спектр излучения, а только некоторый участок, на котором исследуемый материал является серым или его излучательная способность слабо зависит от длины волны.

В спектральной пирометрии регистрируется абсолютный спектр излучения объекта в определённом интервале

длин волн, т. е. количество световой энергии, падающей в единицу времени на единицу площади поверхности. Такой поверхностью является торец оптического волокна (зонда), воспринимающего излучение объекта и передающего его в спектрометр. Для определения температуры по абсолютно-му спектру объекта используется спектральный пирометр, содержащий блоки сбора и обработки информации и подробно описанный в [23, 24]. В блок сбора информации входит малогабаритный спектрометр и оптическое волокно для доставки излучения объекта в спектрометр. Блок управляется с помощью программного обеспечения, соответствующего используемому спектрометру. Блок обработки спектральной информации построен на применении специализированной программы "Spectral Pyrometry" (Тимченко Н. И. Программа для ЭВМ "SPECTRAL PYROMETRY" v.3.1. Номер гос. регистрации 2016661057 от 28.09.2016). Данная программа вычисляет температуры по спектру для спектральных пирометров HR2000⁺ ультрафиолетового (200–420 нм), видимого (350–800 нм), ближнего инфракрасного (650–1080 нм) диапазонов и NIR Qwest (900–2500 нм) (Ocean Optics, США). Время накопления спектров (от единиц миллисекунд до двадцати секунд) позволяет регистрировать тепловые спектры объектов малой интенсивности и отслеживать динамику температурного процесса. При этом количество зафиксированных спектров ограничивается только объёмом памяти компьютера. С помощью малогабаритного спектрального пирометра можно определять температуру излучающих объектов от 600 до $(8-10) \cdot 10^3$ К.

Основными источниками погрешностей спектральной пирометрии являются зависимость коэффициента излучательной способности исследуемого материала от длины волны и оптические элементы (окна, линзы, зеркала) в тракте измерения, которые не учитывались при калибровке. Отсутствие информации об излучательной способности не является серьезным препятствием для измерения температуры поверхности. При регистрации спектра в коротковолновой области (200–400 нм) погрешность составляет менее 1 % для температуры 2500 К, а при более низких температурах (1000–1500 К) – менее 0,5 %. На практике измерение температуры спектральным пирометром в основном производится в видимом диапазоне излучения, в котором погрешность измерения больше и составляет 5 и 2,5 % для температур 2500 и 1500 К соответственно. Меньшая погрешность результатов измерения по спектру в коротковолновой области обусловлена сильной зависимостью $I(\lambda)$, когда интенсивность излучения растёт с увеличением длины волны намного быстрее, чем изменяется коэффициент излучения [22].

Использование на практике преимуществ спектральной пирометрии в условиях высокоинтенсивных СВЧ-полей сопряжено с рядом особенностей.

Во-первых, высококачественные волоконно-оптические кабели (Ocean Optics, США), используемые для работы с соответствующими спектрометрами, имеют стандартные металлические разъёмы SMA905. Размещение такого разъёма в СВЧ-камере (в непосредственной близости

от нагреваемого объекта) неизбежно вызывает его нагрев и, возможно, искрение.

Во-вторых, для получения данных о температуре с максимальной периодичностью и в минимально возможные промежутки времени необходимо размещать торец оптоволоконного кабеля как можно ближе к нагреваемому объекту, в зоне максимальной яркости его свечения.

В-третьих, в реальных условиях нагреваемый в СВЧ-камере объект находится, как правило, не в открытом пространстве, а заключён в оболочку (реактор) из термостойкого материала, обычно из кварцевого стекла. Кварцевое стекло имеет ограниченное пропускание излучения в области ближнего ультрафиолета, а в видимой и ближней инфракрасной областях спектра (до 2500–3000 нм) является практически полностью прозрачным, поэтому не может внести существенных изменений в спектры, регистрируемые спектрометрами. Определённые трудности могут возникнуть только при фиксации спектров объектов, нагретых до достаточно высоких температур (выше 2000–2500 К).

Практическое решение проблем изоляции металлического наконечника оптического кабеля от интенсивных электромагнитных СВЧ-полей и размещения этого наконечника в непосредственной близости от нагреваемого объекта возможно с применением заградительного волновода, направленного внутрь СВЧ-камеры. Особенности такого технического решения задач измерения температуры нагреваемого в СВЧ-устройствах объекта подробно описаны в [25].

Обсуждение результатов обзора и выводы. Основными требованиями, предъявляемыми к устройствам измерения температуры в системах с воздействием сильных электромагнитных полей являются: отсутствие собственной проводимости; простота и универсальность компонентов; малые размеры; возможность проведения измерений на расстоянии. Различные подходы к измерению температуры имеют различные эксплуатационные характеристики в практических применениях.

Традиционные устройства измерения температуры, такие как термодпары, термисторы, терморезисторы и т. д., в системах с воздействием сильных электромагнитных полей можно применять только совместно со сложными системами экранировки, так как возникают помехи, связанные с взаимодействием металлических компонентов измерительных устройств с сильными электромагнитными полями. Указанное взаимодействие вызывает искажение электромагнитного поля, тепловую нестабильность и СВЧ-пробой. Однако экранирующие системы зачастую невозможно использовать по конструктивным и технологическим причинам.

Область применения волоконно-оптических датчиков шире, чем термодпар, поскольку данные датчики могут использоваться без экрана или без предварительной обработки. Главная проблема использования волоконно-оптических датчиков заключается в их большой временной задержке при измерении температуры. Время между включением СВЧ-мощности и фиксированием изменения температуры объекта нестабильно и составляет 8–10 с. Эта временная задержка создаёт дополнительные трудности

как для управления системой, так и для измерения температуры. Кроме того, волоконно-оптические датчики ограничены максимальной рабочей температурой, что связано со структурой волокна.

Вышеупомянутые проблемы использования термопар и волоконно-оптических датчиков легко преодолеть с помощью бесконтактных методов измерения температуры – инфракрасных и оптических пирометров. Временная задержка пирометров настолько мала, что на практике ей можно пренебречь. Сложности инфракрасной и оптической пирометрии связаны с необходимостью прямой видимости излучающего объекта оптикой пирометра, что предъявляет определённые требования к конструкции СВЧ-камеры. Кроме того, необходима достоверная информация о коэффициенте излучения объекта. Чувствительность оптической измерительной системы к коэффициенту излучения обрабатываемого материала обуславливает последовательное техническое обслуживание и периодическую повторную калибровку приборов для обеспечения оптимальной точности измерений.

Использование спектральной пирометрии позволяет преодолеть и эти трудности, поскольку сигнал от излучающего объекта к измерительному прибору (спектрометру) передаётся по гибкому оптическому волокну, приёмный торец которого можно расположить на нужном расстоянии от объекта. Кроме того, данный метод не зависит от значения коэффициента излучения объекта и позволяет следить за динамикой процесса нагревания.

В [21] приведена таблица с некоторыми обобщёнными сведениями об основных контактных и бесконтактных (оптических) методах измерения температуры в условиях СВЧ-нагрева.

Заключение. Обзор основных методов измерения температур, применяемых в технологиях СВЧ-нагрева, показал принципиальную возможность использования как контактных, так и бесконтактных методов при соблюдении основных требований, при этом бесконтактные пирометрические методы имеют преимущество перед традиционным использованием термопар. Среди пирометрических методов наиболее перспективным является метод спектральной пирометрии, позволяющий определять температуру объекта без привлечения данных о его коэффициенте излучения. Кроме этого, метод спектральной пирометрии позволяет фиксировать динамику изменения температуры образца при любом способе его нагревания.

Список литературы

1. Морозов О., Каргин А., Савенко Г., Требух В., Воробьев И. Промышленное применение СВЧ-нагрева // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 3. С. 2–6.
2. *Advances in induction and microwave heating of mineral and organic materials*, ed. Stanislaw Grundas, 2010, In Tech Publ., 752 p. <https://doi.org/10.5772/562>
3. Магунов А. Н. Лазерная термометрия твёрдых тел. М.: Физматлит, 2001. 224 с.
4. Аржанников А. В., Ахметов Т. Д., Калинин П. В. Стенд для исследований по СВЧ нагреву и превращению веществ. Новосибирск: ИЯФ им. Г. И. Будкера, 2004. 19 с.
5. Kappe C. O., *Chemical Society Reviews*, 2013, vol. 42, no. 12, pp. 4977–4990. <https://doi.org/10.1039/c3cs00010a>
6. Yongguang Luo, Tianqi Liao, Xia Yu, Jing Li, Libo Zhang and Yunhao Xi, *Green Processing and Synthesis*, 2020, vol. 9, no. 1, pp. 97–106. <https://doi.org/10.1515/gps-2020-0011>
7. Bradshaw S. M., van Wyk E. J., de Swardt J. B., Microwave heating principles and the application to the regeneration of granular activated carbon, *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 1998, iss. July/August, pp. 201–210.
8. Omran M., Fabritius T., Heikkinen E.-P., Chen G., *Royal Society open science*, 2017, no. 4. <https://doi.org/10.1098/rsos.170710>
9. Wiedenmann O., Ramakrishnan R., Saal P., Kilic E., Siart U., Eibert T. F., Volk W., *Advances in Radio Science*, 2014, vol. 12, pp. 21–28. <https://doi.org/10.5194/ars-12-21-2014>
10. Longzhi Li, Xiaowei Jiang, Huigang Wang, Jianwei Wang, Zhanlong Song, Xiqiang Zhao, Chunyuan Ma, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2017, vol. 125, pp. 318–327. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.03.009>
11. Дивин А. Г., Пономарев С. В. Методы и средства измерений, испытаний и контроля. Ч. 3. Тамбов: изд-во Тамбовского государственного технического университета, 2013. 116 с.
12. Garcia-Banos B., Reinosa J., Penaranda-Foix F. L., Fernandez J. F., Catala-Civera J. M., *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, 10809. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47296-0>
13. Волоконно-оптические датчики. Под ред. Э. Удда: Пер. с англ. Москва: Техносфера, 2008. 518 с.
14. Ramirez A., Hueso J., Mallada R., Santamaria J., *Chemical Engineering Journal*, 2017, vol. 316, pp. 50–60. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.077>
15. Ramopoulos V., Link G., Soldatov S., Jelonnek J., *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2018, vol. 10, iss. 5–6, pp. 709–716. <https://doi.org/10.1017/S1759078718000727>
16. Ano T., Kishimoto F., Sasaki R., Tsubaki S., Maitani M. M., Suzukia E., Wada Y., *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2016, vol. 18, pp. 13173–13179. <https://doi.org/10.1039/c6cp02034h>
17. Herskowitz R., Livshits P., Stepanov S., Aktushev O., Ruschin S., Jerby E., *Semiconductor Science and Technology*, 2007, vol. 22, no. 8, pp. 863–869. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/22/8/006>
18. Jerby E., Dikhtyar V., Aktushev O., Groszlick U., *Science*, 2002, vol. 298, iss. 5593, pp. 587–589. <https://doi.org/10.1126/science.1077062>
19. Amini A., Ohno K., Maeda T., Kunitomo K., *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, 15023. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33460-5>
20. Mondal A., Shukla A., Upadhyaya A., Agrawal D., *Science of Sintering*, 2010, vol. 42, iss. 2, pp. 169–182. <https://doi.org/10.2298/SOS1002169M>
21. Hamzehlouia S., Chaouki J., *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 2018, vol. 52, iss. 2, pp. 201–210. <https://doi.org/10.22059/JCHPE.2018.270160.1257>
22. Магунов А. Н. Спектральная пирометрия. М.: Физматлит, 2012. 248 с.

23. Магунов А. Н., Лапшинов Б. А., Суворинов А. В. Разработка приборов для измерения температуры объектов с неизвестной излучательной способностью. *Инновации*. 2015. № 4 (198). С. 13–16.

24. Лапшинов Б. А., Суворинов А. В., Тимченко Н. И. Определение температуры излучающего объекта методом спектральной пирометрии // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2018. № 6. С. 116–119.

25. Лапшинов Б. А., Мамонтов А. В. Применение метода спектральной пирометрии в условиях интенсивных сверхвысокочастотных электромагнитных полей // *Измерительная техника*. 2020. № 9. С. 54–59.
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-9-54-59>

References

1. Morozov O., Kargin A., Savenko G., Trbekh V., Vorobyev I., Industrial Application of Microwave Heating, *Electronics: Science, Technology, Business*, 2010, no. 3, pp. 2–6. (In Russ.)

2. *Advances in induction and microwave heating of mineral and organic materials*, ed. Stanislaw Grundas, 2010, In Tech Publ., 752 p. <https://doi.org/10.5772/562>

3. Magunov A. N., *Lazernaja termometrija tverdyh tel* [Laser thermometry of solids], Moscow, Fizmatlit Publ., 2001, 224 p. (In Russ.)

4. Arzhannikov A. V., Akhmetov T. D., Kalinin P. V., *Stend dlja issledovanij po SVCh nagrevu i prevrashheniju veshhestv* [Stand for research on microwave heating and transformation of substances], Novosibirsk, Budker Institute of Nuclear Physics, 2004, 19 p. (In Russ.)

5. Kappe C. O., *Chemical Society Reviews*, 2013, vol. 42, no. 12, pp. 4977–4990. <https://doi.org/10.1039/c3cs00010a>

6. Yongguang Luo, Tianqi Liao, Xia Yu, Jing Li, Libo Zhang and Yunhao Xi, *Green Processing and Synthesis*, 2020, vol. 9, no. 1, pp. 97–106. <https://doi.org/10.1515/gps-2020-0011>

7. Bradshaw S. M., van Wyk E. J., de Swardt J. B., Microwave heating principles and the application to the regeneration of granular activated carbon, *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 1998, iss. July/August, pp. 201–210.

8. Omran M., Fabritius T., Heikkinen E.-P., Chen G., *Royal Society open science*, 2017, no. 4. <https://doi.org/10.1098/rsos.170710>

9. Wiedenmann O., Ramakrishnan R., Saal P., Kilic E., Siart U., Eibert T. F., Volk W., *Advances in Radio Science*, 2014, vol. 12, pp. 21–28. <https://doi.org/10.5194/ars-12-21-2014>

10. Longzhi Li, Xiaowei Jiang, Huigang Wang, Jianwei Wang, Zhanlong Song, Xiqiang Zhao, Chunyuan Ma, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2017, vol. 125, pp. 318–327.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.03.009>

11. Divin A. G., Ponomarev S. V., *Metody i sredstva izmerenij, ispytaniy i kontrolja, ch. 3*. [Methods and means of measurement, testing and control. Part 3], Tambov State Technical University Publ., 2013, 116 p. (In Russ.)

12. Garcia-Banos B., Reinosa J., Penaranda-Fox F. L., Fernán-dez J. F., Catala-Civera J. M., *Scientific Reports*, 2019, vol. 9, 10809. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47296-0>

13. *Fiber Optic Smart Structures*, ed. Etic Udd, Wiley-Interscience, 1995, 688 p.

14. Ramirez A., Hueso J., Mallada R., Santamaria J., *Chemical Engineering Journal*, 2017, vol. 316, pp. 50–60.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.077>

15. Ramopoulos V., Link G., Soldatov S., Jelonnek J., *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2018, vol. 10, iss. 5–6, pp. 709–716.
<https://doi.org/10.1017/S1759078718000727>

16. Ano T., Kishimoto F., Sasaki R., Tsubaki S., Maitani M. M., Suzukia E., Wada Y., *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2016, vol. 18, pp. 13173–13179. <https://doi.org/10.1039/c6cp02034h>

17. Herskowitz R., Livshits P., Stepanov S., Aktushev O., Ruschin S., Jerby E., *Semiconductor Science and Technology*, 2007, vol. 22, no. 8, pp. 863–869. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/22/8/006>

18. Jerby E., Dikhtyar V., Aktushev O., Groszlick U., *Science*, 2002, vol. 298, iss. 5593, pp. 587–589.
<https://doi.org/10.1126/science.1077062>

19. Amini A., Ohno K., Maeda T., Kunitomo K., *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, 15023. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33460-5>

20. Mondal A., Shukla A., Upadhyaya A., Agrawal D., *Science of Sintering*, 2010, vol. 42, iss. 2, pp. 169–182.
<https://doi.org/10.2298/SOS1002169M>

21. Hamzehlouia S., Chaouki J., *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 2018, vol. 52, iss. 2, pp. 201–210.
<https://doi.org/10.22059/JCHPE.2018.270160.1257>

22. Magunov A. N., *Spektral'naja pirometrija* [Spectral pyrometry], Moscow, Fizmatlit Publ., 2012, 248 p. (In Russ.)

23. Magunov A. N., Lapshinov B. A., Suvorinov A. V., Development of instruments for measuring the temperature of objects with unknown emissivity, *Innovations*, 2015, no. 4 (198), pp. 13–16. (In Russ.)

24. Lapshinov B. A., Suvorinov A. V., Timchenko N. I., Determination of the radiating object temperature by spectral pyrometry method, *Electronics: Science, Technology, Business*, 2018, no. 6, pp. 116–119. (In Russ.)

25. Lapshinov B. A., Mamontov A. V., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, pp. 741–746.
<https://doi.org/10.1007/s11018-021-01848-x>

Статья поступила в редакцию 02.03.2021; принята к публикации 22.04.2021.