

Применение метода спектральной пирометрии в условиях интенсивных сверхвысокочастотных электромагнитных полей

Б. А. Лапшинов, А. В. Мамонтов

Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий,
Москва, Российская Федерация, e-mail: lbaniipmt@mail.ru, a.v.mamontov@gmail.com

Рассмотрено практическое применение метода спектральной пирометрии для контроля температуры диэлектрического объекта, нагреваемого в высокоинтенсивном сверхвысокочастотном электромагнитном поле. Описаны преимущества использования метода спектральной пирометрии перед методами цветовой и яркостной пирометрии при регистрации высоких температур (от 500 °С и выше). Для устранения негативного влияния электромагнитного поля на оптоволоконный кабель, который принимает тепловое излучение от нагреваемого в сверхвысокочастотном поле объекта и в случае недопустимого нагрева может выйти из строя, предложено использовать заградительный волновод, размещённый не снаружи камеры сверхвысокочастотного нагрева, а внутри неё. Показано, что такое решение полностью устраняет негативное влияние электромагнитного поля на оптоволоконный кабель и позволяет расположить приёмный торец кабеля в непосредственной близости от нагреваемого объекта. Приведён расчёт геометрических параметров заградительного волновода для рабочей частоты электромагнитного поля 2450 МГц.

Ключевые слова: спектральная пирометрия, микроволновый нагрев, заградительный волновод.

Введение. Расширение сфер применения энергии микроволн в различных технологических процессах термообработки сопровождается совершенствованием как сверхвысокочастотных (СВЧ) составляющих технологического оборудования (генераторов микроволн, электродинамических систем), так и вспомогательных компонентов, обеспечивающих точность соблюдения технологических режимов. К таким компонентам относятся: системы контроля температуры, массы и влажности обрабатываемого объекта; устройства безопасности эксплуатации СВЧ-оборудования; системы контроля перемещения продукта в случае использования конвейерных линий; интеллектуальные системы управления и др.

Наиболее важными параметрами, характеризующими точность соблюдения режима термообработки, являются температура и её изменение в процессе нагрева. Выход за границы требуемого технологического температурного диапазона, также как и несоблюдение требуемой скорости нагрева, неизбежно влечёт за собой в лучшем случае недостижение ожидаемого эффекта термообработки, в худшем – безвозвратную потерю полезных свойств обрабатываемого объекта. Кроме того, принимая во внимание потенциально высокие скорости нагрева при СВЧ-термообработке, необходимо максимально быстро измерять температуру в минимально возможные промежутки времени. Именно поэтому проектированию систем контроля температурного режима и управления им в СВЧ-установках уделяется первостепенное внимание.

На сегодняшний день существуют разнообразные технические средства, позволяющие с требуемой точностью и быстротой контролировать температуру объекта, нагреваемого в высокоинтенсивном СВЧ электромагнитном поле. При этом всё большее применение находят пирометрические способы измерения, имеющие неоспоримые преимущества перед контактными способами [1]. Выпускаемые в настоящее время специализированные пирометры для работы в условиях высокоинтенсивных СВЧ-полей в связке с системой управления мощностью источников микроволновой энергии обеспечивают достаточно точное и быстрое управление процессом нагрева в диапазоне температур 0–400 °С.

Ситуация усложняется при необходимости контроля температур объектов, нагреваемых от 500 до 1000 °С и выше. Такие режимы термообработки необходимы во многих процессах, например спекание керамической шихты, отпуск механических напряжений в заготовках из оптического сигнала, карбонизации различных веществ и ряда других. При этом излучательная способность обрабатываемого объекта может изменяться в широких пределах (0,99–0,02), что при заранее неизвестном коэффициенте излучения может привести к значительной (до 20 %) недостоверности показаний пирометра.

Методы пирометрии основаны на том, что интенсивность излучения абсолютно чёрного тела (АЧТ) на выбранной длине волны $I(\lambda_1)$ определяется только температурой. Для АЧТ

с коэффициентом излучения $\varepsilon_0 = 1$ через точку $I(\lambda_1)$ проходит только одна планковская кривая. Для определения температуры нечёрного (серого) тела в яркостной пирометрии необходимо знать его коэффициент излучения на выбранной длине волны $\varepsilon(\lambda_1)$ или в цветовой пирометрии – отношение коэффициентов излучения $\varepsilon(\lambda_1)/\varepsilon(\lambda_2)$. В обоих случаях без достоверных данных о коэффициенте излучения исследуемого объекта неопределённость температуры может достигать десятков процентов.

Для значительной части материалов, применяемых в технике, данные об излучательной способности отсутствуют. При этом класс новых объектов и материалов с неизученными оптическими свойствами быстро увеличивается. Для определения излучательной способности объекта требуется проведение сложных высокотемпературных измерений 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 (до 20 %) погрешностям при измерении температуры, и полученные данные носят скорее качественный характер [3].

Кроме этого, при калибровке пирометров возникают различного рода неопределённости, которые необходимо выявлять и учитывать в процессе измерений [4].

Цель работы – изучить использование метода спектральной пирометрии для контроля температуры объекта, нагреваемого в СВЧ-поле, как метода, позволяющего не учитывать в измерениях излучательную способность объекта.

Физические основы спектральной пирометрии. 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 – ПЗС-линеек. Такие спектрометры за единицы миллисекунд регистрируют широкий спектр излучения в определённом диапазоне длин волн – ближнем ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном. Это даёт возможность при каждой фиксации спектра излучения сравнивать его со спектром АЧТ и находить участки, где спектры подобны, т. е. считать, что объект является серым телом. Переход от измерений интенсивностей излучения на одной или двух длинах волн к измерению на 1000–2000 длин волн (сплошной спектр) позволяет определять температуру объектов с неизвестной излучательной способностью [5].

В соответствии с формулой Планка спектральная интенсивность теплового излучения реального объекта $I_{\lambda, T}$ с учётом коэффициента излучения $\varepsilon < 1$ определяется как

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

где $C_1 = 2\pi h c^2 = 37418 \text{ Вт} \cdot \text{мкм}^4 / \text{см}^2$, $C_2 = hc/k = 14388 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ – первая и вторая пирометрические константы соответственно;

h , k – постоянные соответственно Планка и Больцмана; c – скорость света в вакууме; λ – длина волны излучения.

Согласно формуле Планка (1) для каждой данной длины волны λ с увеличением температуры в различной степени возрастает и лучеиспускательная способность на всех участках спектра. Закон смещения Вина определяет максимум спектральной интенсивности $\lambda_{\max} = 2898/T \text{ К}$.

При $C_2/(\lambda T) \gg 1$ (область Вина) формула (1) принимает вид

$$\ln(\varepsilon C_1) - C_2/(\lambda T) = \ln(\lambda^5 I). \quad (2)$$

Значение $\varepsilon(\lambda, T)$ реальных объектов имеет более сильную зависимость от длины волны, чем от температуры. Для твёрдых тел эта зависимость носит сравнительно плавный характер, а для газообразных – характер резких колебаний.

В случае серого тела при $\varepsilon(\lambda, T) = \text{const}$ выражение (2) описывает прямую в координатах $x = C_2/\lambda$, $y = \ln(\lambda^5 I)$. Наклон прямой определяется температурой. По экспериментальному спектру в координатах (x, y) или его части, в которой спектр объекта совпадает со спектром АЧТ, можно определить температуру объекта без каких-либо данных о коэффициенте излучения.

Преимущества метода спектральной пирометрии. Метод спектральной пирометрии позволяет получать существенно больше первичной информации об объекте, чем это доступно при использовании традиционных методов. 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 данных об объекте, без которых традиционные методы работать не могут.

В спектральной пирометрии регистрируется абсолютный спектр излучения объекта в определённом интервале длин волн (ультрафиолетовом, видимом или ближнем инфракрасном), 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.

Программно-аппаратная реализация метода спектральной пирометрии. Для определения температуры по абсолютному спектру объекта используется спектральный пирометр, который функционально состоит из двух блоков – сбора информации и обработки информации [6]. Блок сбора информации содержит малогабаритный спектрометр и оптическое волокно для доставки излучения от объекта к спектрометру. Блок работает под управлением программного обеспечения, соответствующего используемому спектрометру. Блок обработки спектральной информации построен на использовании специализированной программы вычисления температуры по спектру. Разработанная в ФГБНУ «НИИ ПМТ» программа Spectral Pyrometry (Тимченко Н. И. Программа для ЭВМ «SPECTRAL PYROMETRY» v.3.1. Номер гос. регистрации 2016661057 от 28.09.2016) для спектральных пирометров HR2000+ ультрафиолетового (200–420 нм),

видимого (350–800 нм), ближнего инфракрасного (650–1080 нм) диапазонов и спектрометра NIR Qwest (900–2500 нм) (производство Ocean Optics, США) позволяет [8]:

сравнивать экспериментальный и рассчитанный спектры АЧТ и выявлять максимально совпадающие области спектра; удалять участки спектра с линиями и полосами;

рассчитывать температуру по абсолютному спектру излучателя в указанном диапазоне длин волн: по методу наименьших квадратов вычисляется уравнение прямой $y = ax + b$, откуда температуру можно найти как $T = a^{-1}$.

Программа позволяет оперативно в интерактивном режиме обрабатывать огромные массивы данных спектров в интересующих исследователя диапазонах длин волн. Время накопления спектров данными спектрометрами лежит в пределах от единиц миллисекунд до 20 с, что позволяет регистрировать тепловые спектры объектов малой интенсивности и следить за динамикой температурного процесса. При этом количество зафиксированных спектров ограничивается только объёмом памяти компьютера. Применение данного спектрального пирометра позволяет вычислять температуру излучающих объектов от примерно 600 К до $(8...10) \cdot 10^3$ К. Калибровка всех спектрометров выполняется с использованием излучения АЧТ и калибровочные файлы хранятся в программе.

Блок-схема спектрального пирометра и алгоритм вычисления температуры представлена на рис. 1.

Перед регистрацией абсолютного спектра исследуемого объекта необходимо компенсировать искажения информационного сигнала, которые возникают в процессе его преобразования в оптоэлектронном тракте спектрометра, связанные с падением чувствительности фотоприёмника (ПЗС-линейки) как в области коротковолнового, так и в области длинноволнового края. Эта процедура заключается в калибровке спектрометра по температурному эталону с известным тепловым спектром, например АЧТ с заданной температурой, и вычислении откорректированного сигнала.

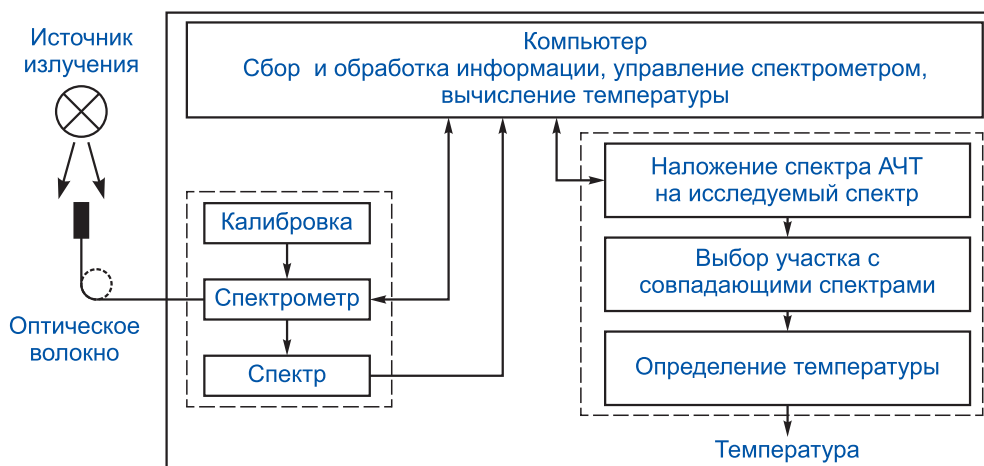


Рис. 1. Блок-схема спектрального пирометра:
ПО – программное обеспечение

Fig 1. Spectral pyrometer block diagram

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

Во-первых, высококачественные волоконнооптические кабели производства Ocean Optics имеют стандартные металлические разъёмы SMA905: диаметр разъёма – 8 мм, длина 32 мм. Размещение такого разъёма в СВЧ-камере (в непосредственной близости от нагреваемого объекта) неизбежно вызовет его нагрев, в самом крайнем случае сопровождающийся искрением. Кроме того, предварительно проведённые эксперименты показали, что и диэлектрический материал оболочки оптоволоконного кабеля обладает высокими диэлектрическими потерями, вызывающими его интенсивный нагрев до температур, выходящих за разрешённый эксплуатационный диапазон.

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 его максимальной яркости свечения. Весь спектр в ПЗС-спектрометре регистрируется одновременно, время накопления единичного спектра составляет $1 \cdot 10^{-3}$ –20 с. Спектрометры при минимальном времени накопления позволяют зарегистрировать за 1 с до 1000 спектров излучения, что необходимо при изучении температурной динамики объекта. Однако из-за недостаточной яркости объекта и низкой светосилы спектрометров с волоконно-оптическим входом не всегда можно использовать максимальное быстродействие спектрометров (обычно 1 мс), поскольку за это время не удаётся накопить спектр достаточной интенсивности. Как следствие, приходится увеличивать время накопления сигнала (время интеграции), что может отрицательно сказаться на оперативности получения данных о температуре и, что иногда важнее, о её динамике.

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 с низкими диэлектрическими потерями, например кварцевого или электровакуумного стекла. Реакторы в СВЧ-камерах служат для выполнения двух задач: изоляции нагреваемого объекта от окружающего пространства; подвода технологических газов, например инертных, и отвода газообразных продуктов реакций. Материалы, из которых изготавливаются реакторы (в большинстве случаев используется кварцевое стекло), имеют ограниченное пропускание излучения в области ближнего ультрафиолета, а в видимой и ближней инфракрасной областях спектра

(до 2500–3000 нм) являются практически полностью прозрачными, поэтому не могут внести существенных изменений в спектры, регистрируемые спектрометрами.

Для определения пропускающей способности стенок реактора были проведены экспериментальные исследования, показавшие реальную картину пропускания излучения кварцевым стеклом в исследуемом диапазоне длин волн. В эксперименте регистрировались спектры теплового излучения объекта (автомобильная лампа накаливания, подключённая к регулируемому стабилизированному источнику питания), находящегося вне и внутри кварцевой трубы с толщиной стенки 4 мм. Измерения показали, что значительного различия в зафиксированных спектрах нет. Температуры, определённые по этим спектрам, составляли 1488 К для объекта вне реактора и 1467 К внутри реактора. Результаты измерений представлены на рис. 2.

Таким образом, в диапазоне длин волн 600–1100 нм теплового излучения объекта, нагреваемого в СВЧ-поле, кварцевое стекло не вносит каких-либо существенных изменений в спектр излучения.

Практическая реализация метода спектральной пирометрии в условиях интенсивного СВЧ электромагнитного поля. Практическое и одновременное решение указанных выше задач изоляции металлического наконечника оптического кабеля от интенсивных электромагнитных СВЧ-полей и задачи размещения этого наконечника в непосредственной близости от нагреваемого объекта возможно с применением запредельного волновода. Особенности применения такого технического решения для задач измерения температуры нагреваемого в СВЧ-устройствах объекта обычными пирометрическими средствами подробно описаны в [1].

Традиционно запредельные волноводы выводятся за пределы стенок камер СВЧ-нагрева во избежание искажений распределения электромагнитного СВЧ-поля, вносимых металлической трубкой волновода. Это вполне приемлемо при использовании средств яркостной или цветовой пирометрии. При использовании же спектральной пирометрии такое решение нельзя считать удачным, так как в этом случае приёмник оптического сигнала в виде торца оптического кабеля вынужденно располагается на максимально возможном расстоянии от нагреваемого объекта, что самым отрицательным образом сказывается на скорости получения данных о температуре.

Реальным выходом из такой ситуации является нетрадиционное размещение запредельного волновода по направлению внутрь камеры, а не наружу. Такое решение можно считать вполне оправданным, учитывая небольшой внешний диаметр металлического наконечника оптического кабеля (8 мм) и, соответственно, диаметр трубки запредельного волновода, в которую и помещается кабель. Для расчёта длины запредельного волновода его внутренний диаметр был принят равным 10 мм при необходимом затухании, вносимым волноводом, в 50 дБ (100000 раз по ослаблению

мощности электромагнитной волны). Расчёт, приведённый в [7], показал, что требуемое затухание достигается при длине запредельной трубки в 20 мм.

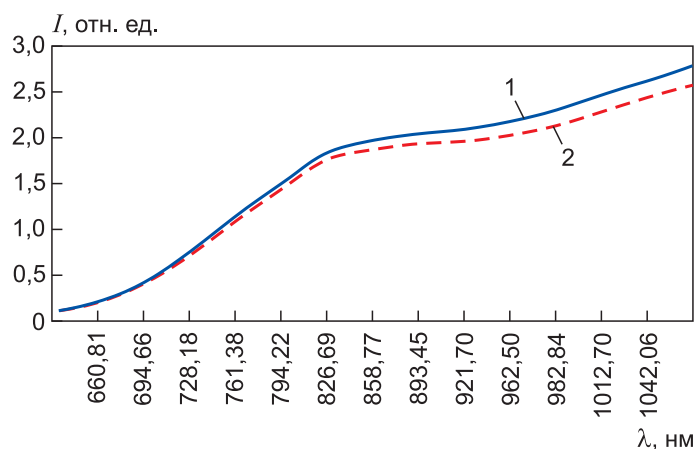


Рис. 2. Спектры излучения объекта, находящегося вне кварцевой трубы (1) и внутри неё (2)

Fig. 2. Radiation spectra of an object located outside the quartz tube (1) and inside it (2)

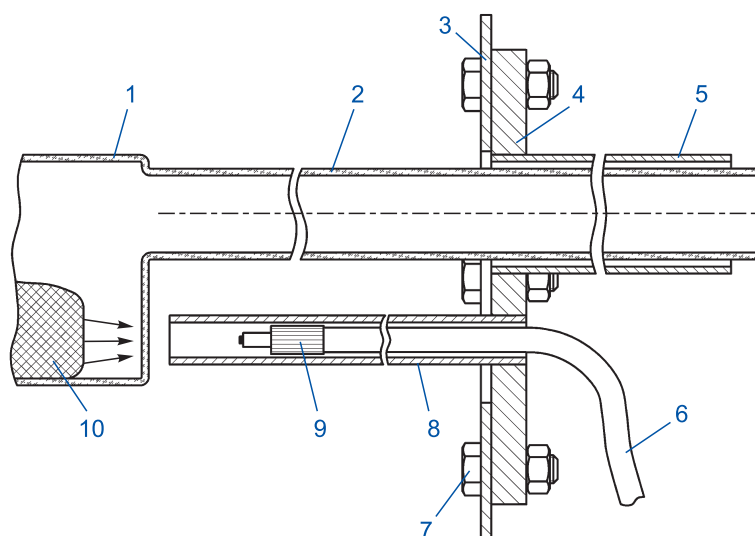


Рис. 3. Расположение запредельных волноводов на стенке камеры СВЧ-нагрева:

1 – реактор из кварцевого стекла; 2 – газоотводящая трубка; 3 – боковая стенка СВЧ-камеры; 4 – фланец; 5, 8 – внешний и внутренний запредельные волноводы соответственно; 6 – оптоволоконный кабель; 7 – крепежные элементы; 9 – наконечник оптоволоконного кабеля; 10 – нагреваемый объект

Fig. 3. Cutoff waveguides location on the wall of the microwave heating chamber: 1 – quartz glass reactor; 2 – suction pipe; 3 – microwave chamber side wall; 4 – flange; 5, 8 – outer and inner cutoff waveguides respectively; 6 – fiber optic cable; 7 – fasteners; 8 – inner cutoff waveguide; 9 – optical fiber cable connector; 10 – heated object

Рассчитанная длина волновода является минимально необходимой для получения требуемого затухания электромагнитной волны на частоте колебаний 2450 МГц. Именно на таком расстоянии от открытого конца трубки запредельного волновода следует располагать торец оптического кабеля с гарантированной его изоляцией от электромагнитного поля. Общая же длина запредельного волновода может быть в разы больше. Это позволит в небольших пределах корректировать угол обзора оптического приёмника, изгибая трубку в нужном направлении.

Практическая реализация предлагаемого конструктивного решения представлена на рис. 3. Запредельные волноводы монтируются на стенку СВЧ-камеры с помощью фланцевой пластины, на которой они закреплены сваркой либо с помощью резьбового соединения; фланец на стенке камеры фиксируется болтами. Конструкция имеет два разнонаправленных запредельных волновода: внутренний изолирует оптоволоконный кабель от СВЧ-поля, внешний служит для вывода газообразных продуктов из реактора за пределы СВЧ-камеры через кварцевую трубку. Практическое использование такого решения показало его полную функциональность, обеспечивающую требуемые характеристики.

Заключение. Метод спектральной пирометрии как метод, имеющий преимущества перед методами цветовой и яркостной пирометрии при регистрации высоких температур (от 500 °С и выше) для контроля температуры диэлектрического объекта, нагреваемого в высокоинтенсивном сверхвысокочастотном электромагнитном поле, можно применять не только в системах контроля параметров технологических процессов СВЧ-нагрева (например, при спекании керамических порошков и карбонизации различных материалов), но и в исследовательских лабораторных установках микроволнового нагрева.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России FNER-2020-0002.

Список литературы

1. Мамонтов А. В., Неведов В. Н., Хриткин С. А. Применение запредельных волноводов для пирометрических измерений // Измерительная техника. 2018. № 7. С. 55–57. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-7-55-57>
2. Батанов Г. М., Бережецкая В. А., Копьев В. А., Косый И. А., Магунов А. Н. Эволюция температуры в смеси титан-бор при иницировании самораспространяющегося высокотемпературного синтеза импульсным микроволновым разрядом // Химическая физика. 2013. Т. 32. № 4. С. 52–59.
3. Ходунков В. П. Скрытые неопределенности измерений температуры при калибровке пирометров // Измерительная техника. 2018. № 11. С. 68–72. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2018-11-68-72>
4. Магунов А. Н. Спектральная пирометрия. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012.

5. 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.
6. Лапшинов Б. А., Суворинов А. В., Тимченко Н. И. Определение температуры излучающего объекта методом спектральной пирометрии // Электроника НТБ. 2018. № 6. С. 116–119.
7. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Т. 1. М.: Высшая школа, 1970.
8. Дивин А. Г., Пономарев С. В. Средства измерений температуры, оптических и радиационных величин. Ч. 3.: учебное пособие. Тамбов: Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2013. 116 с.
9. Garcia-Banos B., Reinosa J. J., Peñaranda-Foix F. L., et al., *Scientific Reports* 9, 10809 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47296-0>
10. Архангельский Ю. С., Девяткин И. И. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1983.
11. Окресс Э. СВЧ-энергетика. Т. 2. Применение энергии сверхвысоких частот в промышленности / Пер. с англ. М.: Мир, 1971, 272 с.
12. Bolasodun B., Nesbitt A., Wilkinson A., Day R., Effect Of Curing Method On Physical And Mechanical Properties Of Araldite DLS 772 / 4 4 DDS Epoxy System, *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 2, no. 2, pp. 12–18.

References

1. Mamontov A. V., Nefedov V. N., Khritkin, S. A., *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, pp. 723–726. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1491-5>
2. Batanov G. M., Berezhetskaya V. A., Kop'ev V. A., Kosyi I. A., Magunov A. N., *Russian Journal of Physical Chemistry B: Focus on Physics*, 2013, vol. 32, no. 4, pp. 52–59.
3. Khodunkov V. P., *Measurement Techniques*, 2019, vol. 61, pp. 1126–1133. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01559-4>
4. Magunov A. N., *Spektral'naya pirometriya*, Moscow, Fizmatlit Publ., 2012, 248 p. (in Russian).
5. Magunov A. N., Lapshinov B. A., Suvorinov A. V., *Innovatsii*, 2015, no. 4 (198), pp. 13–16 (in Russian).
6. Lapshinov B. A., Suvorinov A. V., Timchenko N. I., *Elektronika NTB*, 2018, no. 6, pp. 116–119 (in Russian).
7. Lebedev I. V., *Tekhnika i pribory SVCh*, vol. 1, Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970, 376 p. (in Russian).
8. Divin A. G., Ponomarev S. V., *Sredstva izmerenii temperatury, opticheskikh i radiatsionnykh velichin*, Tambov, Izdatel'stvo FGBOU VPO "TG TU" Publ., 2013, vol. 3, 108 p. (in Russian).
9. Garcia-Banos B., Reinosa J. J., Peñaranda-Foix F. L., et al., *Scientific Reports* 9, 10809 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47296-0>
10. Arkhangel'skii Yu. S., Devyatkin I. I., *Sverkhvysokochastotnye nagrevatel'nye ustanovki dlya intensifikatsii*

tekhnologicheskikh protsessov, Saratov, Izd-vo Saratovskogo universiteta Publ., 1983, 140 p. (in Russian).

11. Ernest C. Okress, *Microwave Power Engineering*, Academic Press, New York and London, 1968.

12. Bolasodun B., Nesbitt A., Wilkinson A., Day R., Effect Of Curing Method On Physical And Mechanical Properties

Of Araldite DLS 772 / 4 4 DDS Epoxy System, *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 2, no. 2, pp. 12–18.

Дата поступления: 03.06.2020.

Дата принятия: 03.07.2020.

High-temperature spectral thermometry in conditions of intense microwave electromagnetic fields

Boris A. Lapshinov, Alexandr V. Mamontov

Research Institute of Advanced Materials and Technology,
Moscow, Russian Federation, e-mail: lbaniipmt@mail.ru, a.v.mamontov@gmail.com

In this paper, a practical application variant of the high-temperature spectral thermometry method for controlling the temperature of a dielectric object heated in a high-intensity microwave electromagnetic field is proposed. The advantages of using the spectral pyrometry method over the methods of color and brightness pyrometry when registering high temperatures (from 500 °C and above) are described. The optical fiber cable used in this method, which receives thermal radiation from an object heated in the microwave field, is subject to the negative influence of the electromagnetic field, which leads to its unacceptable heating and failure. To eliminate this phenomenon, a non-standard use of an cutoff waveguide placed not outside, but inside the microwave heating chamber is proposed. It is shown that this solution completely eliminates the negative influence of the electromagnetic field on the fiber optic cable and allows placing the receiving end of the cable in close proximity to the object being heated. The calculation of geometric parameters of the cutoff waveguide for the operating frequency of the electromagnetic field of 2450 MHz is given.

Key words: spectral pyrometry, microwave heating, cutoff waveguide.