

Применение запердельных волноводов для пирометрических измерений

А. В. МАМОНТОВ¹, В. Н. НЕФЁДОВ², С.А. ХРИТКИН²

¹Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий, Москва, Россия, e-mail: niipmt@mail.ru

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия, e-mail: 6034348@mail.ru

Рассмотрены вопросы измерения температуры объекта, нагреваемого в мощных микроволновых установках. Показаны преимущества использования для этих целей пирометров по сравнению с термометрическими измерителями температуры. Описана методика расчёта характеристик запердельных волноводов круглого поперечного сечения для их применения совместно с пирометрическими датчиками. Представлены графики для быстрого определения геометрических параметров круглого запердельного волновода в зависимости от требуемого вносимого затухания. Приведён пример использования круглого запердельного волновода вместе с пирометром КМ-1.

Ключевые слова: запердельный волновод, микроволновая установка, измерение температуры, пирометр.

The article deals with the temperature measurement of the heated object in high-power microwave devices. The advantages of using pyrometers for these purposes in comparison with thermocouple temperature meters are shown. The method of calculating the characteristics of below-cutoff circular waveguide for their use in conjunction with pyrometric sensors is presented. For a quick a circular below-cutoff waveguide geometrical parameters determination in dependence on the required insertion attenuation a graph is presented. An example of a circular below-cutoff waveguide use with a pyrometer KM-1 is given.

Key words: below-cutoff waveguide, microwave device, temperature measurement, pyrometer.

Современное развитие технологического микроволнового оборудования и его широкое применение в различных производственных процессах связано с совершенствованием вспомогательного оборудования, обеспечивающего необходимый уровень автоматизации, контроля и безопасности эксплуатации микроволновых установок [1–4]. Вспомогательное оборудование помогает контролировать такие параметры, как масса, влажность и температура обрабатываемого объекта [5–8]. Полученная информация используется для обратной связи при управлении технологической установкой, например для изменения мощности источников микроволновой энергии и (или) скорости движения ленты конвейера с обрабатываемым материалом, что необходимо для получения продукта надлежащего качества.

Одним из важнейших технологических параметров, подлежащих постоянному контролю во время процесса термообработки, является температура нагреваемого объекта, так как она непосредственным образом влияет на качество получаемого продукта. Измерить этот параметр в нагревательных микроволновых установках можно двумя способами – контактным (с помощью термометрических измерителей) и бесконтактным (посредством пирометров).

Термометрические измерители температуры относительно недороги, надёжны и обеспечивают необходимую точность измерений в широком диапазоне температур. Указанные измерители можно применять для контроля температуры не только поверхности нагреваемого объекта, но и в любой точке его объёма [9–11]. Однако использование термометрических измери-

телей температуры в устройствах микроволнового нагрева имеет ограничения, существенно сужающие область применения таких измерителей. Прежде всего, на время проведения измерений необходимо отключать источники микроволнового излучения, т. е. прерывать технологический процесс, так как нахождение датчика в электромагнитном поле необходимо исключить из-за возможного проявления антенного эффекта. Данный эффект заключается в появлении на концах проводников термометрической паразитной электродвижущей силы, наводимой электромагнитным полем. Такой фактор неизбежно приводит не только к значительным искажениям показаний регистрирующего прибора, но и к появлению искрения между проводниками, а в случае высокоинтенсивных сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных полей – к расплавлению проводников, которое происходит из-за омических потерь в них.

У пирометрических измерителей температуры отсутствуют недостатки, свойственные термометрам, поэтому эти измерители можно использовать для контроля температуры нагреваемого объекта в непрерывном режиме, без принудительного выключения источников микроволновой энергии. Это позволяет оператору управлять процессом нагрева с заданной точностью: регулировать темп нагрева объекта, его термостатирование, а также в требуемых пределах изменять скорость ленты транспортёра для конвейерных установок. Тем не менее, пирометрам присущи и недостатки, главными из которых являются зависимость достоверности их показаний от излучательной способности нагреваемого объекта и невозможность измерения температуры внутри него.

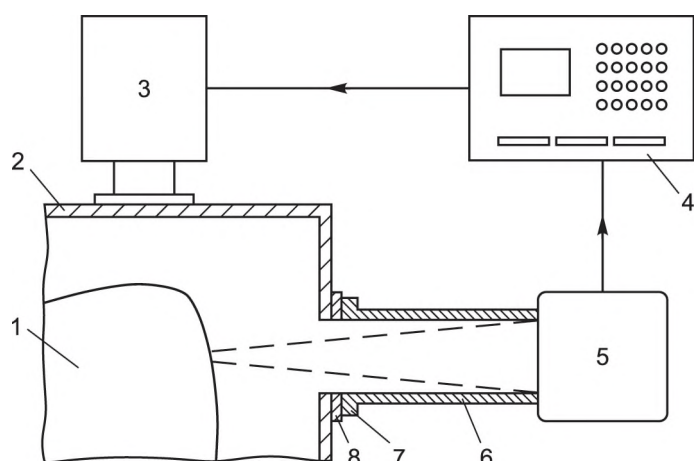


Рис. 1. Схема подсоединения пирометра к камере микроволнового нагрева:

1 – нагреваемый объект; 2 – камера микроволнового нагрева; 3 – источники микроволновой энергии; 4 – управляющее устройство; 5 – пирометрический датчик; 6 – запредельный волновод; 7 – фланец; 8 – уплотняющая прокладка

Первый недостаток можно устранить перепрограммированием пирометра в соответствии с излучательной способностью поверхности нагреваемого объекта. Такой возможностью обладают фактически все современные приборы, даже недорогие. Влияние второго недостатка сводится к минимуму при проведении несложных предварительных экспериментов, устанавливающих зависимость между температурами внутри

объекта и на его поверхности. Для большинства практических случаев указанная зависимость, как правило, приводит к приемлемой точности, удовлетворяющей требованиям технологического процесса.

Для измерений температуры нагреваемого (например, в лучевом СВЧ-устройстве) объекта с помощью пирометрических датчиков применяют запредельные волноводы прямоугольного или круглого сечения. Наибольшее распространение получили круглые волноводы, так как они наименее трудоёмкие в изготовлении. Запредельный волновод выполняет двойную функцию:

ослабляет электромагнитную волну до регламентируемых законодательно уровней, обеспечивая при этом необходимую безопасность эксплуатации микроволновой установки [12, 13];

создаёт требуемое поле зрения для пирометра.

На рис. 1 представлена схема типового включения пирометра в цепь управления микроволновой нагревательной установкой лучевого типа. На стенке камеры 2 микроволнового нагрева с помощью фланца 7, имеющего уплотняющую прокладку 8, крепится запредельный волновод 6 с пирометрическим датчиком 5. Данные с датчика поступают на управляющее устройство 4, которое регулирует время включённого состояния источников микроволновой энергии 3.

Чтобы рассчитать геометрические параметры круглого запредельного волновода, необходимо найти его длину и внутренний диаметр d в зависимости от требуемого ослабления и апертуры пирометрического датчика. Кроме того, при вычислениях следует учитывать длину рабочей волны λ и возможность распространения в круглом волновode волн типов E_{01} , H_{11} . Ослабление L , вносимое отрезком запредельного волновода длиной l , определяется отношением амплитуд напряжённости электрического поля на входе $E_{вх}$ и выходе $E_{вых}$ волновода [14, 15]:

$$L = 20 \lg(|E_{вх}|/|E_{вых}|) = 20 \lg e^{\alpha l} \approx 8,68 \alpha l;$$

$$\alpha = 2\pi / \left(\lambda_{кр} \left[1 - (\lambda_{кр}/\lambda)^2 \right]^{1/2} \right),$$

где α – коэффициент затухания; $\lambda_{кр}$ – критическая длина волны, для волны E_{01} имеем $\lambda_{кр} \approx 2,62R$, а для волны H_{11} – $\lambda_{кр} \approx 3,41R$; R – радиус запредельного волновода.

Приведённые вычисления характерны для волн типов H_{11} , E_{01} с частотой электромагнитных колебаний генераторов микроволновой энергии $f=2450$ МГц и длиной волны $\lambda=12,25$ см. Рассчитанные числовые данные сведены в графики, позволяющие определить требуемые параметры запредельного волновода по заданным значениям ослабления и апертуры пирометра. Апертура пирометра при этом должна быть равной, либо меньшей диаметра волновода.

На рис. 2, а, б показаны зависимости длины круглого запредельного волновода от вносимого ослабления для волн типов H_{11} , E_{01} при различных диаметрах d волновода. Для практического применения надо ориентироваться на длины волновода, обеспечивающие требуемое ослабление как для волны H_{11} , так и для волны E_{01} .

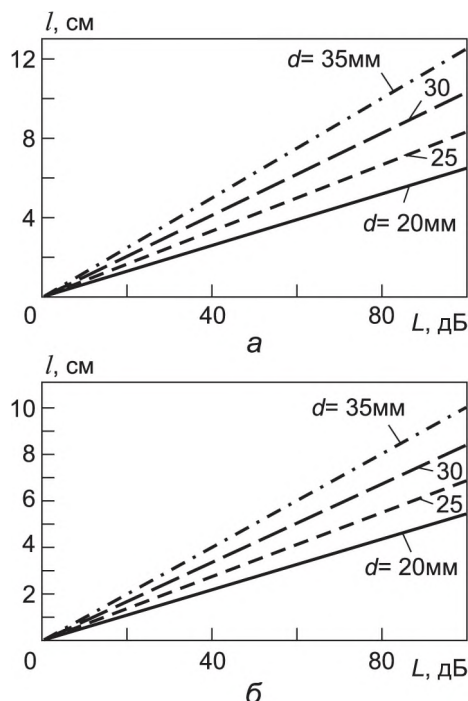


Рис. 2. Зависимость длины круглого запредельного волновода от вносимого ослабления для волн типов H_{11} (а) и E_{01} (б) при различных диаметрах d волновода

В доказательство сказанному выше был выполнен эксперимент. Авторы использовали пирометр КМ-1 (Россия), имеющий следующие характеристики: диапазон рабочих температур $-20 \dots 50$ °С; разрешение по температуре 1 °С; погрешность измерения температуры $\pm(1,00+0,01 \%)$ °С; показатель визирования 100:1; время установления показаний 1 с; диапазон установки излучательной способности 0,01–1,00; апертура 32 мм. Для этого пирометра был изготовлен круглый запердельный волновод длиной 130 мм и внутренним диаметром $d=35$ мм. Данный волновод обеспечивал затухание волны на уровне 100 дБ. Проведённые испытания в лучевой камере с общей подводимой мощностью источников микроволновой энергии, равной 4,8 кВт на частоте 2450 МГц, подтвердили отсутствие около волновода какого-либо излучения, отличного от фонового. Измерения выполняли с помощью анализатора плотности потока энергии электромагнитного поля ПЗ-33М (Россия).

Проведённые исследования позволили сделать вывод, что запердельные волноводы можно применять в технологических микроволновых установках не только для измерения температуры нагреваемых объектов, но и для организации загрузки и выгрузки нагреваемых материалов (сыпучих, жидких, стержневой формы), отверстий для вентиляции, смотровых окон, окон подсветки и др.

Представленная работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания № 11.12227.2017/8.9.

Л и т е р а т у р а

1. Нефёдов В. Н., Мамонтов А. В., Симонов В. П., Афанасьев В. В. Отверждение труб из полимерных композиционных материалов с использованием микроволнового излучения // *Электронная обработка материалов*. 2017. Т. 53. № 4. С. 74–77.
2. Нефёдов В. Н., Мамонтов А. В., Симонов В. П., Афанасьев В. В. Измерение температуры листовых материалов в микроволновых установках типа бегущей волны // *Измерительная техника*. 2015. № 10. С. 53–55.
3. Нефёдов В. Н., Мамонтов А. В., Симонов В. П. Измерение температуры стенок композитных труб при термообработке в СВЧ-установках типа бегущей волны // *Измерительная техника*. 2016. № 8. С. 45–48.

4. Шахбазов С. Ю., Нефёдов М. В., Никишин Е. В., Доик Д. А., Никишев А. О. Измерение распределения температурного поля материалов в резонаторах сложной формы // *Измерительная техника*, 2008. № 6. С. 56–59.

5. Мамонтов А. В., Нефёдов В. Н., Тув А. Л., Языков Д. А. Исследование возможности плавления базальта с помощью СВЧ-энергии // *Измерительная техника*. 2012. № 9. С. 49–51.

6. Архангельский Ю. С., Гришина Е. М. Многочастотные установки СВЧ диэлектрического нагрева // *Вопросы электро-технологии*. 2014. № 2. С. 59–63.

7. Григорьев А. В., Галиуллин Т. А., Седельников Ю. Е. Измерение температуры объектов радиометрическими методами // *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 9-й науч.-техн. международной Крымской микроволновой конференции КрыМиКо–99*. Т. 2. Севастополь, 1999, С. 399–400.

8. Морозов Г. А., Седельников Ю. Е. Низкоинтенсивные СВЧ-технологии (проблемы и реализации). М.: Радиотехника, 2003.

9. Архангельский Ю. С., Огурцов К. Н., Гришина Е. М. Камеры лучевого типа сверхвысокочастотных электротехнических установок. Саратов : Полиграфия Поволжья, 2010.

10. Коломейцев В. А., Кузьмин Ю. А., Никуйко Д. Н., Семёнов А. Э. Экспериментальные исследования уровня неравномерности нагрева диэлектрических материалов и поглощённой мощности в СВЧ-устройствах резонаторного типа // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2013. Т. 18. № 12. С. 25–31.

11. Данилин А. А. Измерения в технике СВЧ. М.: Радиотехника, 2008.

12. ГОСТ Р 54372–2011. Безопасность электротермического оборудования. Ч. 6. Технические условия по безопасности промышленного сверхвысокочастотного нагревательного оборудования.

13. Постановление 848–70. Санитарные нормы и правила при работе с источниками электромагнитных полей высоких, ультравысоких и сверхвысоких частот.

14. Пименов Ю. В., Вольман В. И., Муравцов А. Д. Техническая электродинамика. М.: Радио и связь, 2000.

15. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. Т. 1. М.: Высшая школа, 1970.

Дата принятия: 10.04.2018.