

of the 13th International Conference on Microwave and HF Heating (AMPERE 2011). Toulouse. France. 2011. P. 303-306.

4. Симметричные электрические колебания П-образного цилиндрического резонатора с частичным заполнением емкостного зазора / В.В. Загоруйкин, Н.Н. Перестюк, В.В. Сенченко, А.Т. Фиалковский // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1979. № 2. С. 106-107.

5. New results for coaxial re-entrant cavity with partially dielectric filled gap / W. Xi, W. R. Tinga, W.A. Voss, B.Q. Tian // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1992. Vol. 40. № 4. P. 747-753.

УДК 621.385.6.6

М.Ю. Беклемишев, И.В. Назаров, В.Н. Нефёдов

Московский государственный институт электроники и математики
(Технический университет), e-mail: lmis@miem.edu.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ-УСТРОЙСТВ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

M.Yu. Beklemishev, I.V. Nazarov, V.N. Nefedov

Moscow State Institute of Electronics and Mathematics (Technical University)

MODELING OF MICROWAVE DEVICES FOR HEAT TREATMENT OF DIELECTRIC ROD-SHAPED MATERIALS

The comparative analysis of computer modelling and experimental investigations results for temperature distribution in dielectric rod-shaped materials are presented.

Одним из основных технологических процессов в различных отраслях промышленного производства является термообработка материалов. Научные исследования, направленные на сокращение длительности термообработки, показали эффективность использования энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот (энергии микроволнового излучения), так как достигаемый при этом объемный нагрев материалов позволяет значительно интенсифицировать процесс термообработки.

В работе [1] показано, что микроволновый метод обеспечивает равномерный нагрев диэлектрического стержня во всем объеме и снимает внутренние термические напряжения в процессе реакции полимеризации. Объемный характер нагрева диэлектрических стержней приводит к полноте реакции полимеризации и высоким прочностным характеристикам получаемых изделий.

В работе [2] представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по термообработке диэлектрических стержневых материалов.

В настоящей работе представлены результаты сравнения проведённых ранее экспериментальных исследований микроволновой термообработки диэлектрических стержневых материалов [2] с результатами аналогичных исследований, полученными с помощью специального программного обеспечения. Целью работы являются результаты сравнительного анализа компьютерного моделирования и экспериментальных исследований распределения температуры в стержневых материалах.

СВЧ-устройство для равномерного нагрева стержневых материалов состоит из двух секций (рис. 1), имеющих взаимодополняющее распределение температуры по поперечному сечению обрабатываемого материала.

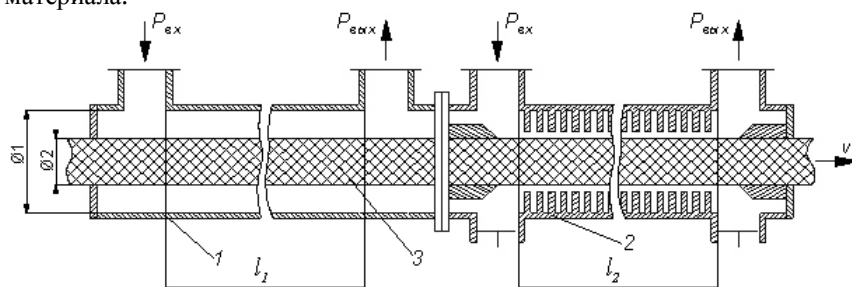


Рис. 1. СВЧ-устройство для равномерного нагрева стержневых материалов:
1 – круглый волновод; 2 – диафрагмированный волновод; 3 – диэлектрический стержень

Первая электродинамическая система в виде круглого волновода, работающего на основном типе волны E_{01} , обеспечивает максимальную температуру в центре диэлектрического стержня и ее спад по радиусу к внешней поверхности стержня. Вторая электродинамическая система, например, замедляющая система типа диафрагмированного волновода, обеспечивает максимальную температуру на внешней поверхности стержня и ее спад по радиусу к оси диэлектрического стержня. Результирующее распределение температуры по сечению диэлектрического стержня от двух секций СВЧ-устройства должно обеспечить распределение температуры по поперечному сечению стержня, удовлетворяющее требованиям технологического процесса.

Круглый волновод работает на основном типе волны E_{01} и распределение напряженности электрического поля в поперечном сечении стержня описывается функцией Бесселя нулевого порядка, имеющей максимум в центре волновода и спадающей по радиусу к краям волновода.

Диафрагмированный волновод представляет собой замедляющую систему, степень концентрации напряженности электрического поля к

поверхности замедляющей системы определяется коэффициентом замедления.

Для расчёта в программах Ansoft HFSS и CST Microwave Office была построена модель СВЧ-устройства для равномерного нагрева стержневых материалов (рис. 2 и 3). Для упрощения расчёта сечения круглого и диафрагмированного волноводов моделировались отдельно.

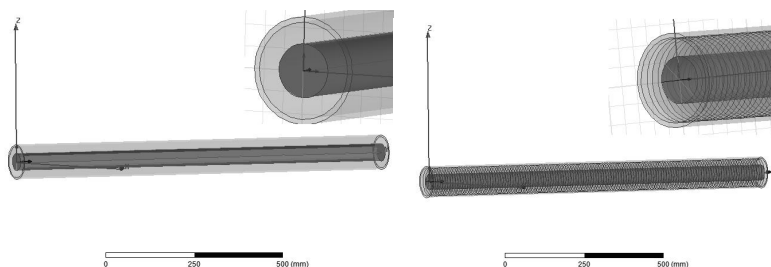


Рис. 2. Модели сечения круглого (слева) и диафрагмированного (справа) волноводов с помещённым в них диэлектрическим стержнем, полученные в Ansoft HFSS

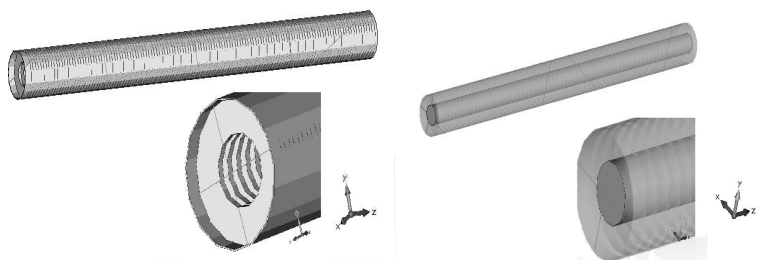


Рис. 3. Модели сечения круглого (слева) и диафрагмированного (справа) волноводов с помещённым в них диэлектрическим стержнем, полученные в CST Microwave Office

Источник СВЧ-энергии в модели имеет мощность 600 Вт, а диаметры соответственно 50 и 100 мм, длины секций – 1200 мм. Помещённый внутри каждой секции СВЧ-устройства диэлектрический стержень радиусом 25 мм и длиной 1200 мм имеет следующие характеристики:

$$T_n = 20^\circ \text{C}, \quad \text{tg} \delta = 0,12, \quad \epsilon = 4,0, \quad c_\theta = 0,8 \frac{\text{Дж}}{\text{з} \cdot ^\circ \text{C}}, \quad \rho_\theta = 2,0 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$

Основной задачей настоящей работы является построение распределения температуры в диэлектрическом стержневом материале в программах Ansoft HFSS и CST Microwave Office.

На рис. 4–7 приведены распределения температуры в продольных и поперечных сечениях диэлектрического стержня в круглом и диафрагмированном волноводах.

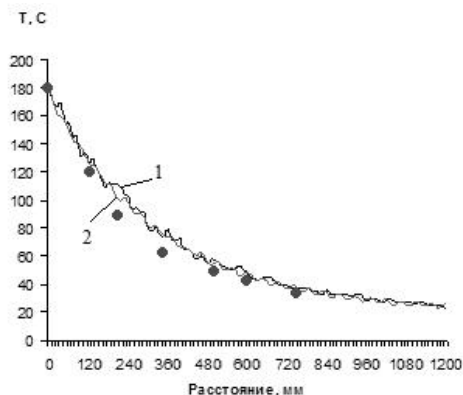


Рис. 4. Характеристики распределения температуры по центру стержня в направлении оси z на длине 1200 мм в стационарном режиме для секции круглого волновода, полученные в Ansoft HFSS (1) и CST Microwave Office (2), точками показаны результаты эксперимента

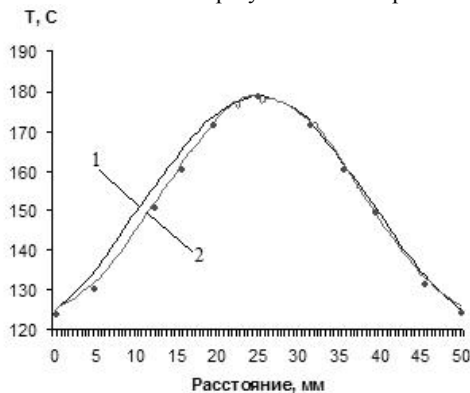


Рис. 5. Характеристики распределения температуры по поперечному сечению стержня в стационарном режиме для секции круглого волновода при $z=0$, полученные в Ansoft HFSS (1) и CST Microwave Office (2), точками показаны результаты эксперимента

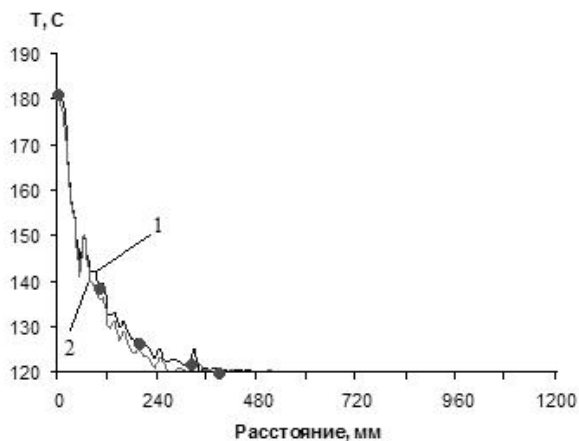


Рис. 6. Характеристики распределения температурного поля по внешней поверхности диэлектрического стержня вдоль электродинамической системы типа диафрагмированного волновода в стационарном режиме, полученные в Ansoft HFSS (1) и CST Microwave Office (2), точками показаны результаты эксперимента



Рис. 7. Характеристики распределения температуры по поперечному сечению стержня для замедляющей системы типа диафрагмированного волновода в стационарном режиме в сечении $z = 0$, полученные в Ansoft HFSS (1) и CST Microwave Office (2), точками показаны результаты эксперимента

Анализ полученных результатов показал совпадение характера рассчитанных и экспериментальных температурных зависимостей, расхождение с экспериментом составило до 15%, что, скорее всего, связано с неточностями в геометрической модели, а также конкретными методами расчёта.

Библиографический список

1. Архангельский Ю.С. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов / Ю.С. Архангельский, И.И. Девяткин. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983. 140 с.

2. Использование СВЧ энергии для полимеризации стержневых материалов / Д.А. Лоик, А.В. Мамонтов, В.Н. Нефедов, А.С. Черкасов // Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине: тр. IX межвуз. науч. школы молодых специалистов. М.: МГУ, 2008 . С. 63-66.

УДК 621.385.6.6

Д.В. Холопов, Т.А. Потапова, В.Н. Нефёдов

Московский государственный институт электроники и математики

(Технический университет), e-mail: lmiem@miem.edu.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ-ТЕРМООБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

D.V. Kholopov, T.A. Potapova, V.N. Nefedov

Moscow State Institute of Electronics and Mathematics (Technical University)

DIELECTRIC MATERIALS' MICROWAVE THERMAL TREATMENT MODELLING USING DIFFERENT TYPES OF RADIATORS

The comparative analysis of computer modeling and experimental investigations results for temperature distribution in dielectric materials using different types of radiators are presented.

Анализ научных публикаций в области исследования современных сверхвысокочастотных технологий термообработки диэлектрических материалов показывает [1-6], что наибольшее внимание уделяется поиску принципиально новых технических решений, позволяющих формировать заданное распределение температуры по объему обрабатываемого материала.

Практический опыт применения различных конструкций СВЧ-устройств с целью реализации равномерного нагрева объемных диэлектрических материалов позволяет утверждать, что наиболее перспективными в этом направлении являются СВЧ-устройства лучевого типа [4].

Наиболее распространённой электродинамической системой, используемой для термообработки объемных диэлектрических материалов, является прямоугольная камера, на стенках которой в определенном порядке расположены излучатели СВЧ-энергии.