

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.

В настоящей работе с помощью программ Ansoft HFSS и CST Microwave Studio исследовано распределение температуры по толщине диэлектрического материала с различной влажностью. Термообработка материала проводилась в СВЧ-устройствах лучевого типа с использованием двух типов излучателей: в виде раскрыва прямоугольного волновода и в виде щели в широкой стенке волновода. Кроме того, в работе приведено сравнение полученных результатов с результатами экспериментальных исследований [7].

В работе исследуемым материалом являлась древесина размером 100x300x100 мм и влажностью 7% ($\epsilon' = 2,9$; $\epsilon'' = 0,4$), 12% ($\epsilon' = 3,6$; $\epsilon'' = 0,52$) и 16% ($\epsilon' = 4,9$; $\epsilon'' = 0,75$), теплоёмкостью 1,7 кДж/(кг·К) и плотностью 470 кг/м³. Исследуемый материал располагался в центре камеры, имеющей размеры 600x600x600 мм, на расстоянии 150 мм от боковых стенок. Отражение падающего излучения от стенок камеры отсутствовало. Мощность источника СВЧ-энергии 600 Вт, частота 2,45 ГГц.

Геометрические модели камеры с излучателями в виде раскрывов двух прямоугольных волноводов размером 72x34 мм, построенные в программах Ansoft HFSS и CST Microwave Studio, изображены на рис. 1.

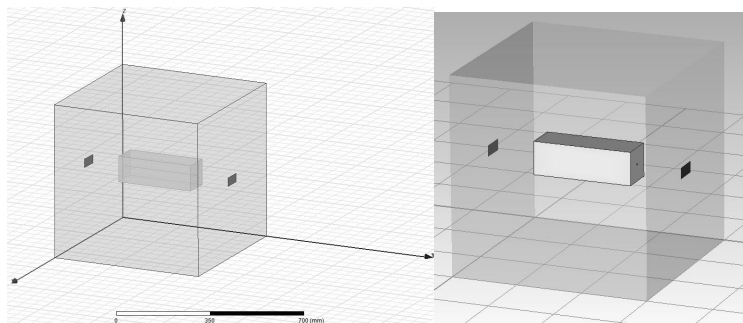


Рис. 1. Геометрическая модель камеры с излучателями в виде раскрывов двух прямоугольных волноводов 72x34 мм, построенная в программах Ansoft HFSS (слева) и CST Microwave Studio (справа)

Полученное распределение температуры было нормировано к максимальному значению температуры. На рис. 2 видно, что характер распределений температуры, полученных в результате моделирования в программах CST Microwave Studio и Ansoft HFSS, совпадает. В программе CST Microwave Studio величина разброса значений минимумов и максимумов достигает 4-5 раз, в программе Ansoft HFSS этот разброс не более двух раз. Среднее значение отношения T/T_0 для программы Ansoft HFSS

составило 0,7, для программы CST Microwave Studio – 0,3. Положения максимумов температуры в обеих программах практически совпадают. Разброс значений, полученных при моделировании, по сравнению с результатами экспериментального исследования для программы Ansoft HFSS не превысил 20%, для программы CST Microwave Studio – в отдельных точках доходит до 60%.

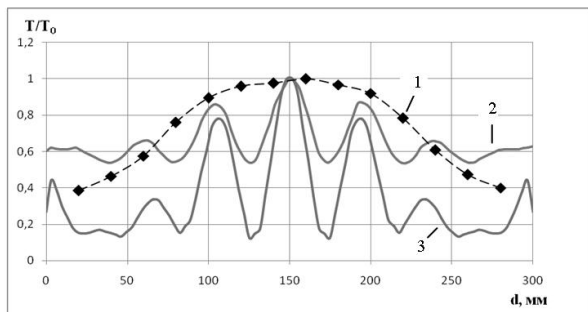


Рис. 2. Характеристики распределения температуры по толщине материала при значении относительной влажности 7% (1 – эксперимент; 2 – Ansoft HFSS; 3 – CST Microwave Studio)

При 12% влажности материала (рис. 3) полученная картина распределения температуры по толщине материала схожа в обеих программах. Среднее значение отношения T/T_0 для программы Ansoft HFSS составило 0,6, для программы CST Microwave Studio – 0,4. Положения максимумов температуры практически совпадают. Разброс значений температуры для программы Ansoft HFSS не превысил 25%, для программы CST Microwave Studio в отдельных точках доходит до 40%.

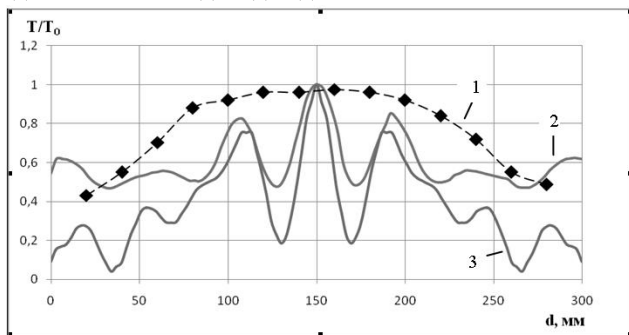


Рис. 3. Характеристики распределения температуры по толщине материала при значении относительной влажности 12% (1 – эксперимент; 2 – Ansoft HFSS; 3 – CST Microwave Studio)

Таким образом, результаты моделирования материала с влажностью 7 и 12 %, полученные в программе Ansoft HFSS, ближе к результатам экспериментального исследования.

При влажности образца 16% (рис. 4) картины распределения температуры по объёму материала в программах Ansoft HFSS и CST Microwave Studio имеют некоторое сходство, но положения локальных максимумов друг с другом не совпадают.

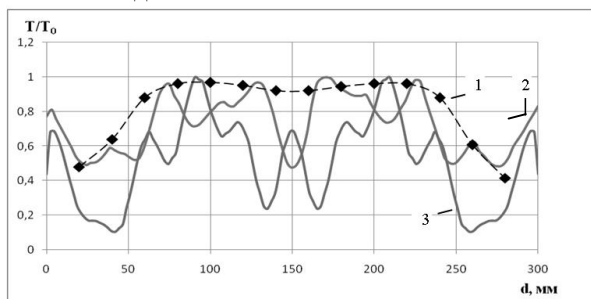


Рис. 4. Характеристики распределения температуры по толщине материала при значении относительной влажности 16% (1 – эксперимент; 2 - Ansoft HFSS; 3 – CST Microwave Studio)

Среднее значение отношения T/T_0 для программы Ansoft HFSS составило 0,75, для программы CST Microwave Studio – 0,5. При сравнении результатов моделирования с реальным экспериментом картина распределения температуры симметрична относительно центра материала и имеет две области максимумов. Характер распределения температуры в центре материала несколько отличается. Разброс значений, полученных в ходе моделирования, по сравнению с результатами эксперимента для программы Ansoft HFSS не превысил 15%, для программы CST Microwave Studio в отдельных точках составил около 40%. Таким образом, и в данном случае результат, полученный в программе Ansoft HFSS, ближе к экспериментальным данным.

На рис. 5 приведены геометрические модели СВЧ-устройства лучевого типа с излучателем в виде щели в широкой стенке волновода.

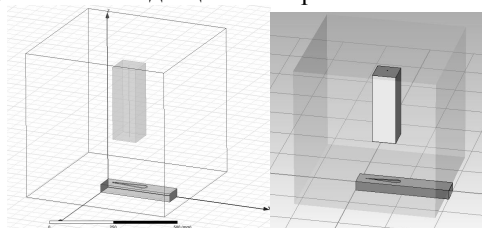


Рис. 5. Геометрическая модель, построенная в программах Ansoft HFSS (слева) и CST Microwave Studio (справа)

Геометрические размеры щелевого излучателя приведены на рис. 6.

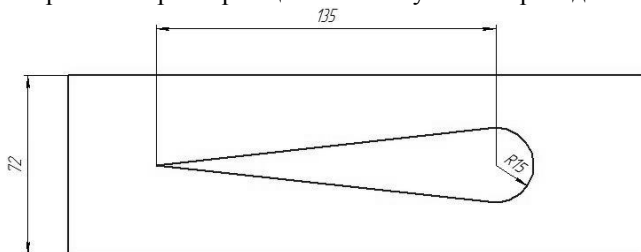


Рис. 6. Геометрические размеры щелевого излучателя

Результаты моделирования распределения температуры по толщине материалов от щелевого излучателя в середине широкой стенки волновода и результаты эксперимента приведены на рис. 7–9.

Из графиков видно, что результаты моделирования в программах не совпадают с полученными в ходе эксперимента зависимостями. В экспериментальном исследовании максимальная температура получена на поверхности материала при последнем измерении на глубине 80–100 мм. При моделировании распределение температуры повторяет характер экспериментального распределения температуры, но начиная с глубины 90–100 мм.

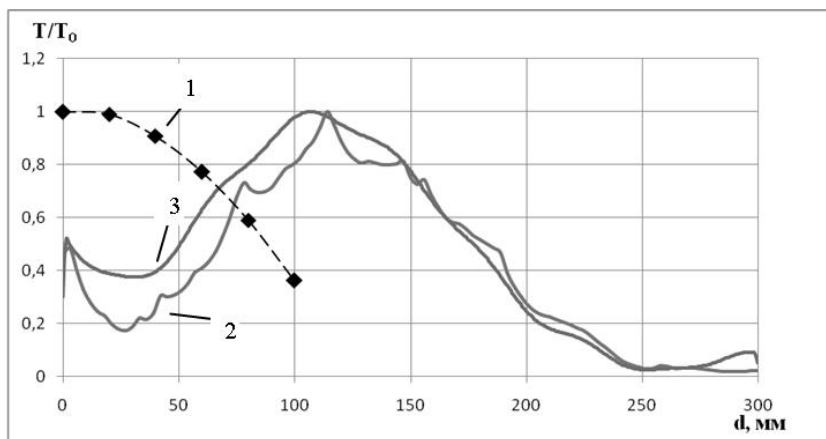


Рис. 7. Характеристики распределения температуры по толщине материала при значении относительной влажности 7% (1 – эксперимент; 2 – Ansoft HFSS; 3 – CST Microwave Studio)

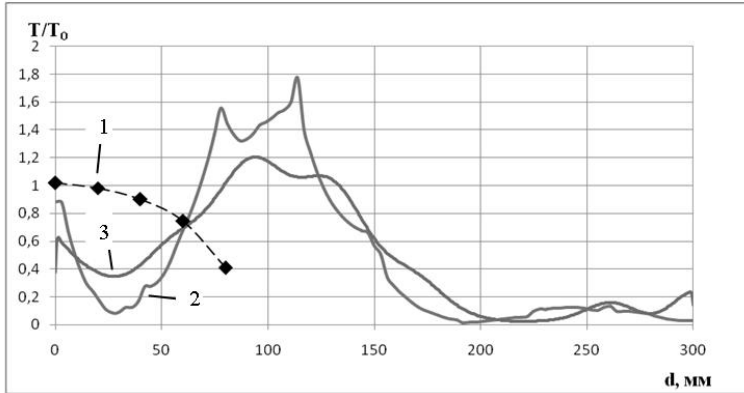


Рис. 8. Характеристики распределения температуры по толщине материала при значении относительной влажности 12% (1 – эксперимент; 2 – Ansoft HFSS; 3 – CST Microwave Studio)

Причины такого различия характеристик распределения температуры могут быть объяснены допущениями модели, использованными в ходе моделирования, а именно:

1. Стенки камеры были полностью открытыми, т.е. падающее излучение от стенок камеры абсолютно не отражалось.
2. Поверхность волновода со щелью в середине широкой стенки являлась идеально проводящей.
3. Не учитывалось изменение диэлектрических параметров с ростом температуры образца.
4. Теплопроводность обрабатываемого материала также не учитывалась.

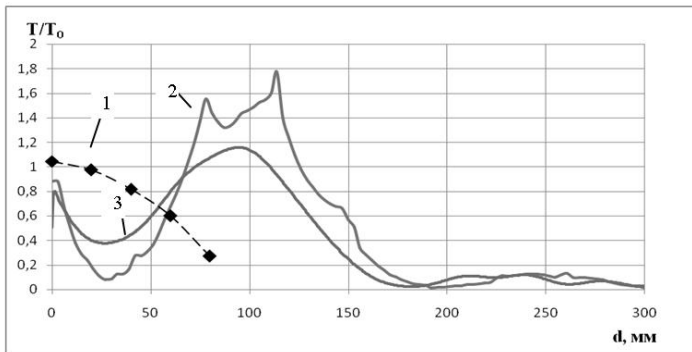


Рис. 9. Характеристики распределения температуры по толщине материала при значении относительной влажности 16% (1 – эксперимент; 2 – Ansoft HFSS; 3 – CST Microwave Studio)

Таким образом, в программах Ansoft HFSS и CST Microwave Studio проведено исследование распределения температуры по толщине диэлектрического материала с влажностью 7, 12 и 16%:

1. При использовании двух раскрывов волновода 72x34 мм в качестве излучателя результат расчётов в программе Ansoft HFSS оказался ближе к экспериментальной характеристике, разброс значений составил не более 25%.
2. При использовании щелевого излучателя в форме капли результаты программного моделирования не совпадают с экспериментальными зависимостями, что может быть объяснено допущениями геометрической модели электродинамической системы.

Библиографический список

1. Низкоинтенсивные СВЧ–технологии (проблемы и реализация) / под ред. Г.А. Морозова и Ю.Е. Седельникова. М.: Радиотехника, 2003. 112 с.
2. Архангельский Ю.С. СВЧ–электротермия / Ю.С. Архангельский. Саратов: СГТУ, 1998. 408 с.
3. Микроволновое технологическое оборудование и приборы / Г.Г. Гонтарев, Б.Н. Глазырин, Г.В. Лысов и др. // Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. М.: ЦНИИ «Электроника», 1992. Вып. 10 (1681). 74 с.
4. 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.
5. Окресс Э. СВЧ–энергетика: в 3 т. / Э.Окресс. М.: Мир, 1971. Т. 2. 272 с.
6. Микроволновые технологии / А.В. Мамонтов, И.В. Назаров, В.Н. Нефедов, Т.А. Потапова. М.: ГНУ НИИ ПМТ, 2008. 308 с.
7. Нефедов М.В. Исследование и разработка СВЧ устройств лучевого типа для термообработки материалов: дис.... канд. техн. наук / М.В. Нефедов. М., 2005. 164 с.