

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕРМООБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ В СВЧ ПОЛЕ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Д.А. Лоик, Д.А. Мишин, И.В. Назаров, Т.А. Потапова, А.С. Черкасов  
 Московский государственный институт электроники и математики  
 E-mail: lmis@miem.edu.ru

The distribution of electromagnetic field in sheet materials placed in microwave devices based on one-dimensional periodic slow-wave structures are investigated. The influence of width and period variation of slow-wave structures on the distribution of temperature field are also investigated. The results obtained confirm the possibility of even heating of treated samples.

В настоящее время одним из перспективных направлений в области термообработки листовых диэлектрических материалов с различными электрофизическими параметрами является СВЧ нагрев с использованием замедляющих систем (ЗС) в режиме бегущей волны. Термообработку диэлектриков с большими потерями наиболее эффективно проводить с помощью одномерно-периодических ЗС, позволяющих сконцентрировать СВЧ энергию в объеме, непосредственно занимаемом нагреваемым материалом. При решении задачи обеспечения равномерного нагрева материала необходимо провести моделирование электродинамической системы [1–3].

Общая схема одномерно-периодической ЗС штыревого типа со связками представлена на рис. 1.

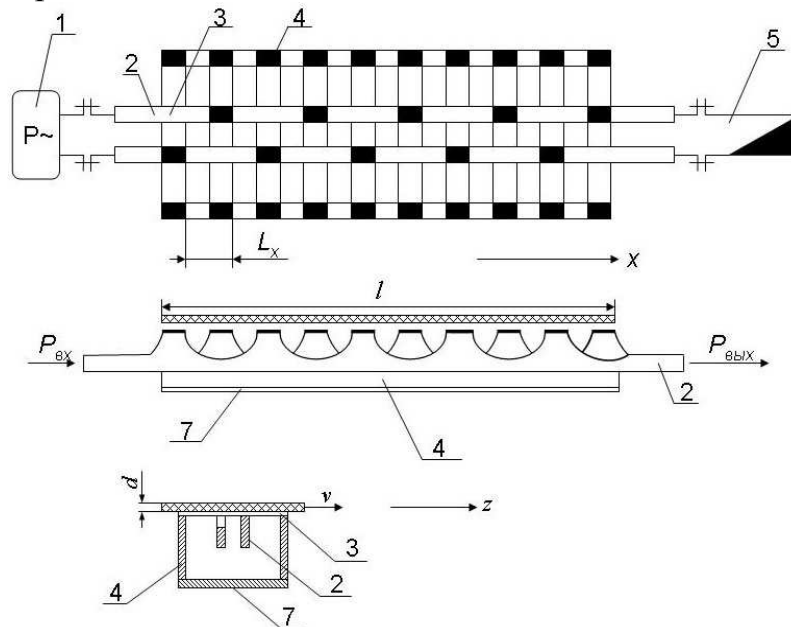


Рис. 1. Общая схема одномерно-периодической замедляющей системы  
 1 – источник СВЧ энергии, 2 – связка, 3 – проводник, 4 – закорачивающий элемент,  
 5 – водяная нагрузка, 6 – материал, 7 – экран,  $l$  – ширина материала,  $v$  – скорость движения материала

Геометрическая модель данной ЗС была разработана в системе трехмерного электромагнитного моделирования для проектирования СВЧ устройств в

программе Ansoft HFSS. Исследовалась система со следующими параметрами: частота излучения источника СВЧ энергии 2,45 ГГц, мощность источника СВЧ энергии 600 Вт, длина ЗС ( $\ell = 500$  мм), ширина ЗС составляет 50 мм, период пространства взаимодействия ЗС вдоль направления бегущей волны  $L_x=12$  мм. Характеристики материала: относительная диэлектрическая проницаемость материала  $\epsilon' = 5,4$ , тангенс диэлектрических потерь  $\text{tg} \delta = 0,24$ , плотность материала  $400 \text{ кг/м}^3$ , теплоемкость материала  $800 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$

В результате проведенного моделирования получено распределение электромагнитного поля для нижней поверхности диэлектрического материала, расположенного на одномерно-периодической ЗС с переменными параметрами. В качестве переменных параметров ЗС использовались шириной системы и период пространства взаимодействия. Для расчета распределения температуры в исследуемом материале использовался рассчитываемый в системе HFSS коэффициент удельной поглощенной мощности.

Как показано в работах [2–5], для уменьшения неравномерности температуры необходимо обеспечить максимальную линейность спада температуры. На рис. 2 представлены зависимости скорости нагрева вдоль центральной линии на нижней поверхности диэлектрического материала.

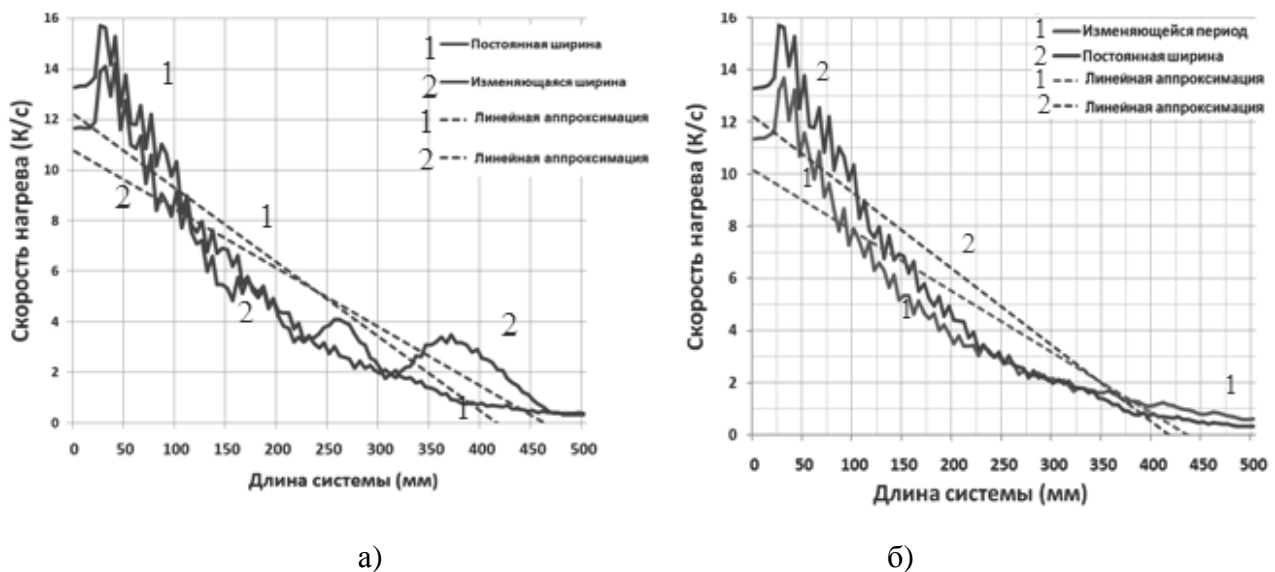


Рис. 2. Сравнение зависимостей скоростей нагрева в материале для ЗС: а) с постоянной и изменяющейся шириной, б) с постоянным и изменяющимся периодом

Наблюдается известный из теории экспоненциальный спад поглощенной мощности вдоль направления распространения волны. Путем изменения параметров ЗС можно оценить их влияние на изменение скорости нагрева материала вдоль длины системы с целью получения равномерного распределения температуры.

На рис. 2а ширина системы менялась от значения 50 мм до значения 27,5 мм. На графике изменения скорости нагрева наблюдается заметное ее увеличение к правому краю системы по сравнению с ЗС, с не изменяющейся шириной. Получено линейное приближение функции изменения скорости

нагрева, которое показывает уменьшение наклона графика (до 21%). При этом происходит уменьшение разброса температуры на краях материала, что позволяет достичь более равномерного нагрева материала. Аналогичная картина наблюдается и при изменении периода системы от значения 12 мм до значения 14,5 мм (рис. 2б).

Таким образом, при помощи моделирования можно получить необходимый закон изменения ширины ЗС или ее периода вдоль направления распространения волны с целью достижения равномерного нагрева обрабатываемого материала.

1. И.В. Лебедев. Техника и приборы СВЧ. – М.: Высшая школа, 1970, т. 1. – 289 с.
2. В.Н. Нефедов. Сверхвысокочастотные устройства для термообработки диэлектрических материалов больших площадей (обзор). // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, вып. 2. – 1998. – С. 32–35.
3. С.Ю. Шахбазов, И.В. Назаров, В.Н. Нефедов, А.С. Черкасов. Методика выбора электродинамических систем СВЧ устройств типа бегущей волны для термообработки материалов. // Труды VIII Межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», 19–20 ноября 2007 г. – С. 51–55.
4. А.В. Мамонтов, И.В. Назаров, В.Н. Нефедов, М.В. Нефедов, В.Н. Потапова. Измерение распределения температурных полей листовых диэлектрических материалов в волноводах. // Приложение к журналу «Измерительная техника» Метрология. – 2006. – № 3. – С. 26–33.
5. С.Ю. Шахбазов, И.В. Назаров, В.Н. Нефедов, Ю.П. Меньшиков, А.С. Черкасов. Использование концентрированных потоков энергии СВЧ энергии для равномерного нагрева листовых диэлектрических материалов. // Труды VIII Межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине», 19–20 ноября 2007 г. – С. 47–50.