

ПРИМЕНЕНИЕ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ СВЧ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВОЛНОВОДАХ

А.В.Мамонтов, И.В. Назаров, В.Н. Нефедов, Т.А. Потапова, А.С. Черкасов
Московский государственный институт электроники и математики
E-mail: lmis@miem.ru

Theoretical and experimental results of temperature field distribution in sheet dielectric materials with waveguide type of electrodynamic system as heating element are presented. Analysis for waveguide type of electrodynamic system for the even thermal treatment of sheet materials is proposed. A kind of waveguide systems consists in changes according to the certain law of their wide walls along the lines of electromagnetic energy spreading. A method for waveguide wide walls geometric correction is suggested for the fundamental type of wave H_{10} . Total divergence in theoretical and experimental results is less than 5% for the temperature field distribution in sheet materials with different electrophysical parameters.

СВЧ устройства типа бегущей волны, предназначенные для термообработки листовых диэлектрических материалов, часто используют в качестве электродинамической системы прямоугольный волновод. Волновод работает на основной волне типа H_{10} , при этом обрабатываемый материал транспортируется через узкие щели, прорезанные вдоль волновода в середине широких стенок параллельно узким стенкам.

В работе предложен один из методов создания равномерного распределения температурного поля в материале для СВЧ устройств, состоящих из двух одинаковых по конструкции и параметров СВЧ секций, в которых энергия электромагнитного поля распространяется во взаимно-противоположных направлениях и перпендикулярно направлению движения материала. Каждая секция СВЧ устройства состоит из источника СВЧ энергии, волновода с прорезанной щелью в середине широкой стенки параллельно узкой стенки и согласованной водяной нагрузки, регистрирующей величину проходящей мощности для контроля технологического процесса.

Метод создания равномерного распределения температурного поля в листовых диэлектрических материалах состоит в том, что изменяя размер широкой стенки волновода $a(z)$, можно преобразовать экспоненциальную зависимость распределения температурного поля в материале в направлении распространения бегущей волны в линейную, а при сложении двух линейных функций, в СВЧ устройстве, состоящем из двух секций, получить постоянное распределение температурного поля в обрабатываемом материале.

Величина СВЧ мощности, распространяющаяся по волноводу затухает в материале по экспоненциальному закону:

$$P(z) = P_{ex} \cdot e^{-2 \cdot \alpha_z \cdot z}, \quad (1)$$

где: P_{ex} - выходная мощность источника СВЧ энергии; α_z - постоянная затухания в направлении распространения бегущей волны "z", которая определяется соотношением [1]:

$$\alpha_z = \frac{\pi^2 \cdot d \cdot \varepsilon''}{2 \cdot a \cdot \lambda \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2 \cdot a}\right)^2}}, \quad (2)$$

где: d - толщина обрабатываемого материала; ε'' - комплексная часть относительной диэлектрической проницаемости обрабатываемого материала; λ - длина волны источника СВЧ энергии; a - размер широкой стенки волновода.

Распределение мощности в материале при условии изменения размера широкой стенки волновода в направлении распространения бегущей волны определяется выражением:

$$P(z) = P_{ex} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot \varepsilon'' \cdot d}{a(z) \cdot \lambda \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2 \cdot a(z)}\right)^2}} \cdot z} \quad (3)$$

Распределение погонной мощности в материале [1, 2]:

$$P_{noz}(z) = \frac{P_{ex} \cdot \pi^2 \cdot d \cdot \varepsilon''}{\lambda} \cdot \frac{1}{q(z)} \cdot \left[1 - \frac{a(z) \cdot a'(z) \cdot z}{q^2(z)} \right] \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot d \cdot \varepsilon''}{\lambda \cdot q(z)} \cdot z} \quad (4)$$

где:

$$q(z) = a(z) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2 \cdot a(z)}\right)^2} \quad (5)$$

Удельная мощность тепловых потерь в материале определяется в виде:

$$P_{y\delta}(z) = \frac{P_{noz}(z)}{S_{non.сечен.}} = \frac{\pi^2 \cdot \varepsilon''}{\lambda \cdot b} \cdot \frac{P_{ex}}{q(z)} \cdot \left[1 - \frac{a(z) \cdot a'(z) \cdot z}{q^2(z)} \right] \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot d \cdot \varepsilon''}{\lambda \cdot q(z)} \cdot z}, \quad (6)$$

где: b - размер узкой стенки волновода.

Распределение температурного поля в материале:

$$T(z) = T_n(z) + 0,239 \frac{P_{ex} \cdot \pi^2 \cdot \varepsilon'' \cdot \tau}{\lambda \cdot b \cdot c_\delta \cdot \rho_\delta} \cdot \frac{1}{q(z)} \left[1 - \frac{a(z) \cdot a'(z) \cdot z}{q^2(z)} \right] \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot d \cdot \varepsilon''}{\lambda \cdot q(z)} \cdot z}, \quad (7)$$

где: c_δ - теплоемкость материала; ρ_δ - плотность материала; τ - время термообработки материала.

Ограничением размера широкой стенки волновода является критическая длина волновода.

Если выбрать размер широкой стенки волновода так, чтобы спад температуры в каждой секции имел линейный характер, то сложение двух характеристик дает постоянное распределение температурного поля в материале.

Для реализации линейного распределения температурного поля в материале необходимо, чтобы размер широкой стенки волновода в направлении распространения бегущей волны определялся в виде:

$$a(z) = \sqrt{\left(\frac{\frac{\pi^2 \cdot \varepsilon'' \cdot d \cdot z}{\lambda}}{\ln\left(\frac{\ell^2}{z^2 - 2 \cdot z \cdot \ell + \ell^2}\right)} \right) + \frac{\lambda^2}{4}} \quad (8)$$

На рис. 1 представлено СВЧ устройство волноводного типа с линейной аппроксимацией широкой стенки волновода.

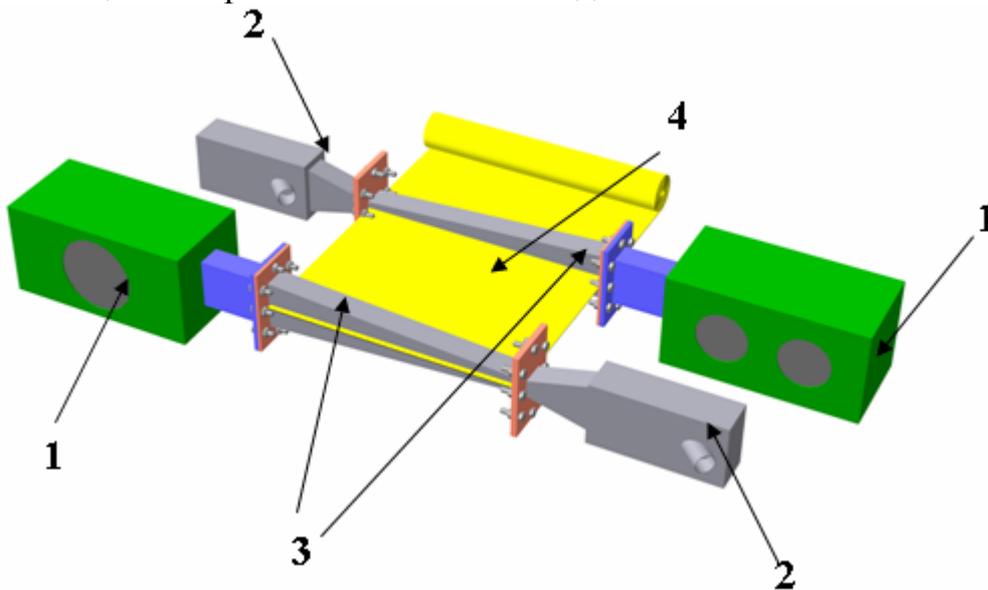


Рис. 1. СВЧ устройство волноводного типа с изменением по линейному закону размера широкой стенки волновода. 1 – источник СВЧ энергии; 2 – водяная согласованная нагрузка; 3 – волновод; 4 – обрабатываемый материал.

На рис. 2 представлены рассчитанные и экспериментальные зависимости температурного поля материала при линейном изменении размера широкой стенки волновода от значения $a(0) = 72 \text{ мм}$ до значения $a(\ell) = 67 \text{ мм}$ на длине волновода $\ell = 500 \text{ мм}$.

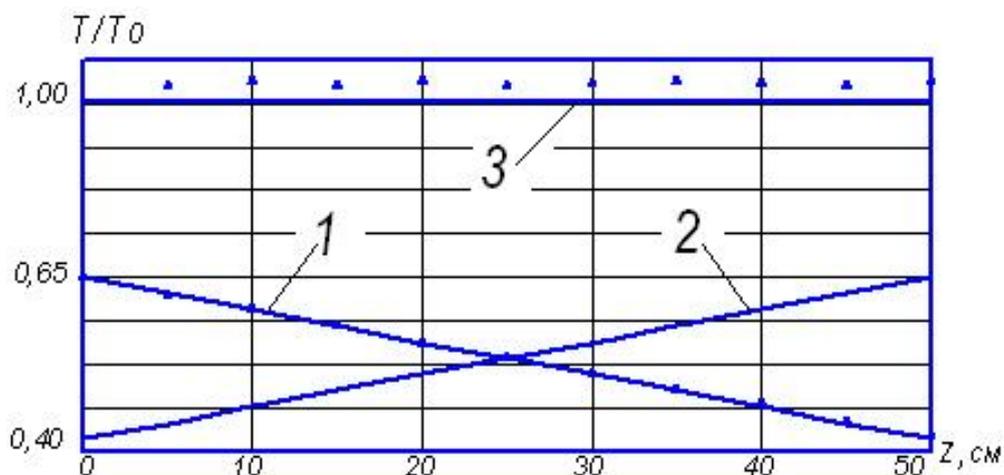


Рис. 2. Рассчитанные и измеренные характеристики температурного поля диэлектрического материала от секции (1, 2) и после прохождения двух секций (3) при изменении размера широкой стенки волновода по линейному закону от значения 72 мм до значения 67 мм на длине волновода 500 мм.

Видно, что при этом достигается практически равномерное распределение температурного поля по ширине обрабатываемого материала. Количество экспериментов по определению распределения температурного поля в каждой серии по волноводным системам составляло не менее 10.

На рис. 3 показана область разброса распределения температурного поля для СВЧ устройства с линейным изменением размера широкой стенки волновода после прохождения листовым диэлектрическим материалом двух секций.

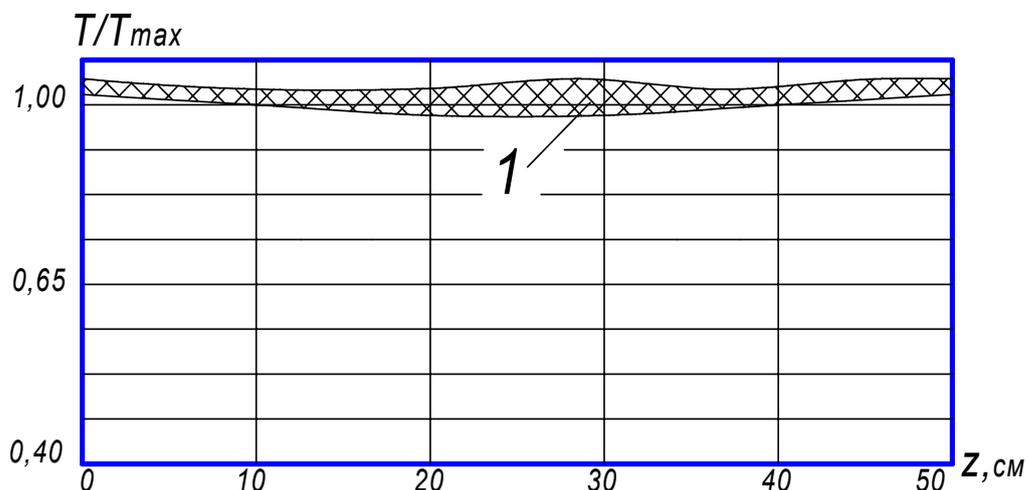


Рис. 3. Разброс температурного поля листового диэлектрического материала после прохождения им двух секций при изменении размера широкой стенки волновода по линейному закону от значения 72мм до значения 67 мм на длине волновода 500 мм.

Разброс температурного поля в материале составил не более 7°C, а расхождение между рассчитанными и измеренными характеристиками

распределения температурного поля в материале не превышает 6°C при нагреве материала до температуры 180°C .

Листовой материал имел следующие параметры:

$$\varepsilon'' = 0,12; c_{\theta} = 0,8 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot ^{\circ}\text{C}}; \rho_{\theta} = 2,4 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}; d = 6\text{мм}; \ell = 500\text{мм}.$$

На рис. 4 представлен общий вид секции экспериментальной СВЧ установки волноводного типа.



Рис. 4. Общий вид секции экспериментальной установки волноводного типа.

1. А.В. Мамонтов. Разработка и исследование СВЧ устройств для термообработки диэлектрических материалов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2005.
2. Т.А. Потапова. Исследование и разработка СВЧ устройств для формирования равномерного температурного поля диэлектрических материалов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва. 2006.