

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ СВЧ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ЛИСТОВЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

С.Ю. Шахбазов<sup>1</sup>, И.В. Назаров<sup>2</sup>, В.Н. Нефедов<sup>2</sup>, В.А. Филимонов<sup>2</sup>,  
Д.А. Лоик<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий*

<sup>2</sup> *Московский государственный институт электроники и математики*

E-mail: [lmis@miem.ru](mailto:lmis@miem.ru)

## Annotation

Questions of the even temperature field creation in sheet dielectric materials placed on the section of one-dimensionally periodic or two-dimensionally periodic slow-wave structure are examined. A kind of these slow-wave structures consists in changes according to the exponential law of their periods along the lines of electromagnetic energy spreading. Theoretical and experimental temperature field distribution in dielectric material for one-dimensionally periodic or two-dimensionally periodic slow-wave structure has constant character for each of these sections. Total divergence in theoretical and experimental results is less than 5% for the temperature field distribution in sheet materials with different electrophysical parameters.

В настоящей статье рассмотрен один из методов создания равномерного температурного поля в листовых диэлектрических материалах, расположенных на поверхности секций двумерно-периодических замедляющих систем. Экспериментальные исследования по термообработке листовых материалов с малыми диэлектрическими потерями были проведены на двумерно-периодической замедляющей системе типа многопроводной линии со связками и индуктивными диафрагмами [1]. Двумерно-периодическая система ограничена в направлении оси “ $x$ ” двумя электрическими стенками, расположенными в плоскостях симметрии системы. Между двумя электрическими стенками устанавливается стоячая замедленная волна. В направлении оси “ $z$ ” секция двумерно-периодической замедляющей системы с одной стороны согласована с источником СВЧ энергии, а с другой стороны с водяной нагрузкой, которая используется для регистрации неиспользованной мощности с целью контроля параметров технологического процесса. Размер секции в направлении оси “ $z$ ” определяется числом периодов системы  $N_z$  и равно  $N_z \cdot L_z = \ell$ , где  $\ell$  - ширина обрабатываемого материала, который движется в направлении оси “ $x$ ”, перпендикулярно направлению распространения энергии электромагнитного поля, а  $L_z$  - период системы в направлении оси “ $z$ ”.

Ширина секции двумерно-периодической системы между двумя электрическими стенками  $a_x$  определяется числом периодов системы  $N_x$  и равно  $a_x = N_x \cdot L_x$ , где  $L_x$  - период замедляющей системы в направлении оси “ $x$ ”.

Конструкция секции двумерно-периодической замедляющей системы образована проводниками одноступенчатой многопроводной линии,

расположенными параллельно друг другу, перпендикулярно направлению движения материала. На проводниках многопроводной линии в периодической последовательности расположены элементы конструкции “индуктивные диафрагмы”, между которыми расположены элементы типа “двойные связки”, как это показано на рис. 1.

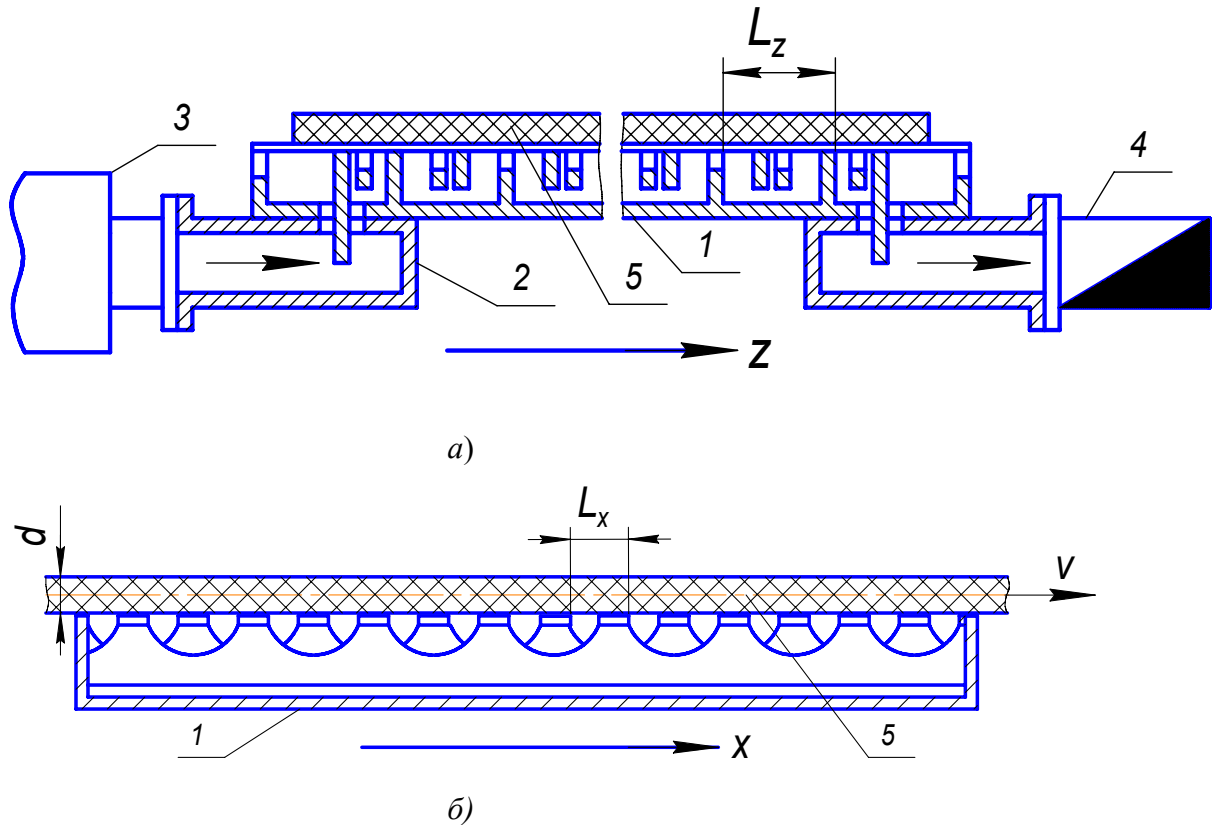


Рис. 2. Продольное (а) и поперечное (б) сечение СВЧ устройства термообработки листовых диэлектрических материалов:

1 – секция двумерно-периодической замедляющей системы; 2 – волновод;  
 3 – источник СВЧ энергии; 4 – нагрузка; 5 – обрабатываемый материал;  $L_z$  – период замедляющей системы в направлении распространения бегущей волны;  $\ell$  – ширина обрабатываемого материал;  $L_x$  – период замедляющей системы в направлении оси “x”;  $d$  – толщина обрабатываемого материала;  $V$  – скорость движения материала.

В направлении оси “x” устанавливается замедленная стоячая волна, которая прижимает электромагнитное поле к поверхности секции двумерно-периодической замедляющей системы. В качестве рабочего вида колебаний используется  $\varphi_x = \pi$  – вид или ближайший к нему по поперечному замедлению. При этом коэффициент замедления замедляющей системы, который используется в настоящей работе  $k_{зам} = 5$ .

В продольном направлении вдоль оси “z” устанавливается режим бегущей волны.

Рассмотрим распределение температурного поля относительно тонких листовых диэлектрических материалов. Под относительно тонкими листовыми

диэлектрическими материалами в технике СВЧ нагрева понимают такие материалы, в которых распределение температурного поля по толщине можно не учитывать. Для распределения температурного поля таких материалов достаточно рассчитать его на поверхности материала, например, на уровне замедляющей системы.

Один из методов решения поставленной проблемы состоит в том, что изменяя период замедляющей системы  $L(z)$ , можно преобразовать экспоненциальную зависимость распределения температурного поля в материале в направлении распространения энергии электромагнитного поля в линейную, а при сложении двух линейных функций, в СВЧ устройстве, состоящем из двух секций, получить постоянное распределение температурного поля в материале.

Распределение температурного поля в материале  $T(z)$  при условии изменения периода двумерно-периодической замедляющей системы можно записать в виде:

$$T(z) = T_n(z) + \frac{0,239 \cdot P_{ex} \cdot k^2 \cdot L(z) \cdot \varepsilon'' \cdot \tau}{\varphi_z \cdot N_x \cdot L_x \cdot d \cdot c_d \cdot \rho_d} \cdot e^{-\frac{k^2 \cdot L(z) \cdot \varepsilon'' \cdot z}{\varphi_z}}, \quad (1)$$

где:  $\ell$  - ширина обрабатываемого материала;  $k$  - волновое число свободного пространства  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $\lambda$  - длина волны источника СВЧ энергии ( $\lambda = 12,24 \text{ см}$ );  $\varepsilon''$  - комплексная составляющая относительной диэлектрической проницаемости материала ( $\varepsilon'' = 0,02$ );  $\varphi_z$  - фазовый сдвиг ( $\varphi_z = 0,25\pi$ ), приходящийся на период системы  $L(z)$ ;  $P_{ex}$  - выходная мощность источника СВЧ энергии ( $P_{ex} = 600 \text{ Вт}$ );  $c_d$  и  $\rho_d$  - теплоемкость и плотность материала;  $\tau$  - время обработки материала в СВЧ поле;  $T_n(z)$  - начальная температура материала.

Условие линейности характеристики распределения температурного поля в материале в направлении распространения энергии электромагнитного поля для секции замедляющей системы имеет вид:

$$\ell \cdot e^{-\frac{k^2 \cdot L(z) \cdot \varepsilon'' \cdot z}{\varphi_z}} - z \cdot e^{-\frac{k^2 \cdot \varepsilon'' \cdot L(\ell) \cdot \ell}{\varphi_z}} = \ell - z, \quad (2)$$

Следовательно, линейное приближение для распределения температурного поля  $T(z)$  в материале имеет вид:

$$T(z) = T_n(z) + \frac{0,239 \cdot k^2 \cdot \varepsilon'' \cdot P_{\text{вх}} \cdot L(z) \cdot \tau}{\varphi_z \cdot N_x \cdot L_x \cdot d \cdot c_d \cdot \rho_d} \cdot \left( 1 - \frac{1 - e^{-\frac{k^2 \cdot \varepsilon'' \cdot L(\ell) \cdot \ell}{\varphi_z}}}{\ell} \cdot z \right) \quad (3)$$

На рис. 2 показана конструкция СВЧ устройства, а на рис. 3 приведены рассчитанные и измеренные характеристики распределения температурного поля в материале при изменении периода замедляющей системы от значения  $L(0) = 20 \text{ мм}$  до значения  $L(\ell) = 25 \text{ мм}$  на длине электродинамической системы  $\ell = 500 \text{ мм}$ .

Листовой материал имел следующие параметры:

$$\varepsilon'' = 0,02; c_d = 0,8 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot ^\circ\text{C}}; \rho_d = 2,4 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}; d = 1 \text{ мм}; \ell = 500 \text{ мм}.$$

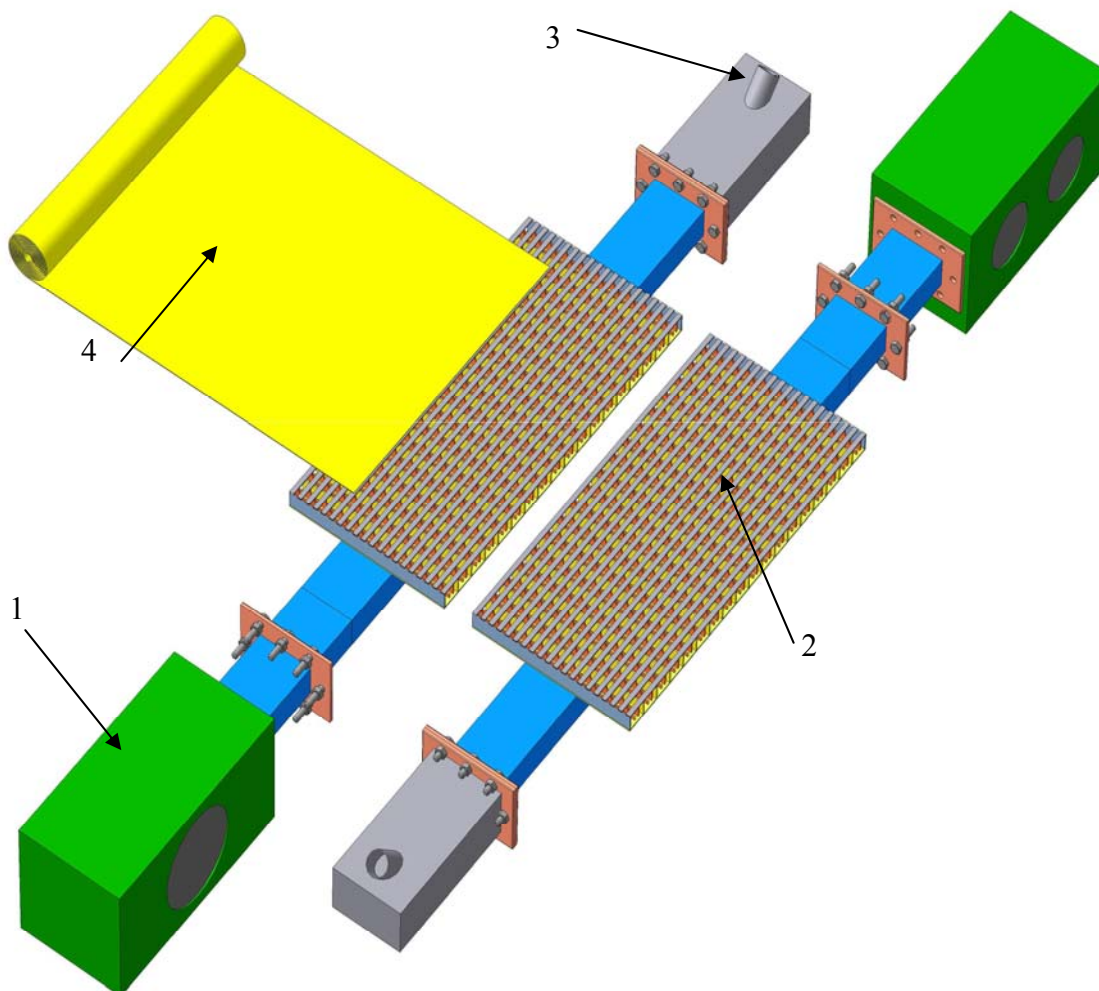


Рис. 2. Конструкция СВЧ устройства на основе секций двумерно-периодических замедляющих систем с изменяющимся периодом системы в направлении распространения бегущей волны. 1 – источник СВЧ энергии; 2 – секция двумерно-периодической замедляющей системы; 3 – нагрузка; 4 – обрабатываемый материал.

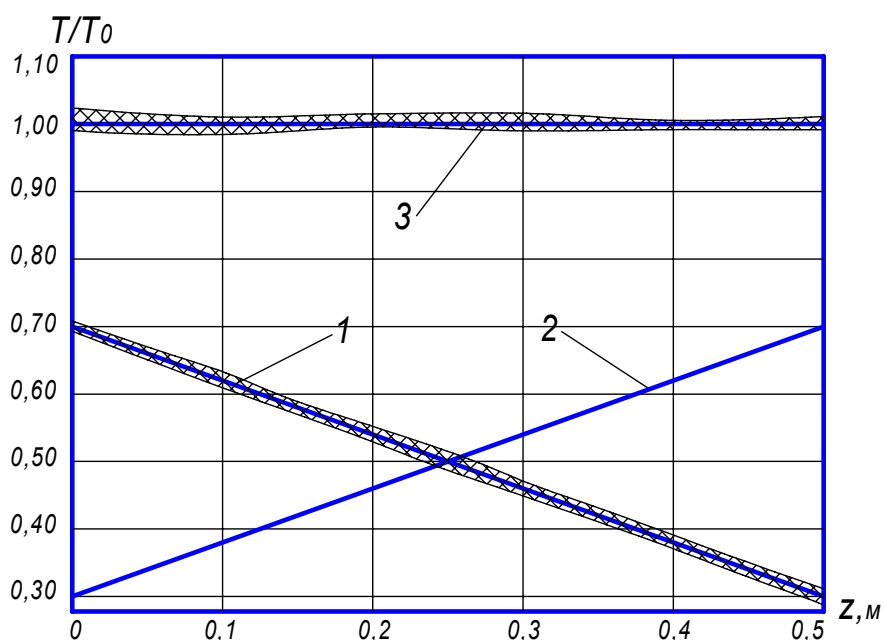



Рис. 3. Теоретические и экспериментальные характеристики распределения температурного поля в листовом материале для секции (1, 2) и для СВЧ устройства (3), конструкция которого представлена на рис.2.  - фоном обозначена область экспериментальных значений при изменении периода замедляющей системы от значения  $L(0)=20$  мм до значения  $L(\ell)=25$  мм на длине электродинамической системы  $\ell = 500$  мм.

Разброс температурного поля не превышает 4%. Расхождение рассчитанных и измеренных характеристик распределения температурного поля в материале не превышает 5%.

1. А.В. Мамонтов, И.В. Назаров, В.Н. Нефедов, А.С. Черкасов. Использование концентрированных потоков микроволновой энергии в замедляющих системах для термообработки листовых диэлектрических материалов. Труды VII Межвузовской научной школы молодых специалистов "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине". МГУ, 2006 г., стр. 124-128.
2. В.Е. Мясников. Дисперсионные свойства многоэтажной замедляющей системы. Электронная техника. Серия 1, Электроника СВЧ, вып. 3, 1969 г., стр. 51-62.