

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ СВЧ ЭНЕРГИИ ДЛЯ РАВНОМЕРНОГО НАГРЕВА ЛИСТОВЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

С.Ю. Шахбазов¹, И.В. Назаров², В.Н. Нефедов², Ю.П. Меньшиков²,
А.С. Черкасов²

¹Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий;

²Московский государственный институт электроники и математики

E-mail: lmis@miem.ru

Questions of the even temperature field creation in sheet dielectric materials passing through two sections of one-dimensionally periodic and two-dimensionally periodic slow-wave structures are examined. A kind of these slow-wave structures consists in changes according to the certain law of their periods along the lines of electromagnetic energy spreading. Theoretical and experimental temperature field distribution in dielectric material has linear 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.

Рассмотрим распределение температурного поля относительно тонких листовых диэлектрических материалов, расположенных на поверхности периодических замедляющих систем. Экспериментальные исследования по термообработке листовых диэлектрических материалов были проведены на штыревой замедляющей системе со связками [1, 2], конструкция которой показана на рис. 1.

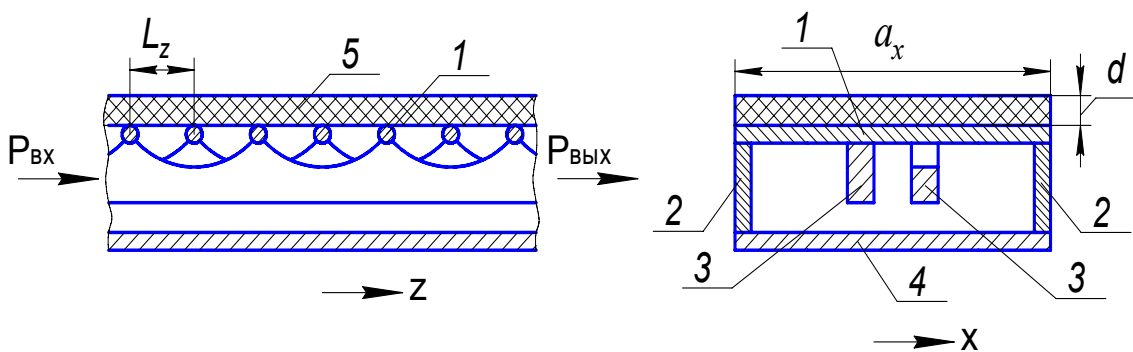


Рис. 1. Конструкция периодической замедляющей системы:

1- проводник; 2 – пластины; 3 – связки; 4 – экран; 5 – материал; d - толщина материала;

L_z - период замедляющей системы; a_x - ширина замедляющей системы.

Один из способов получения равномерного распределения температурного поля в материале связано с изменением периода замедляющей системы или расстояние между соседними проводниками замедляющей системы в направлении распространения бегущей волны $L(z)$. Фазовый сдвиг φ_z , приходящийся на период системы $L(z)$ в направлении распространения бегущей волны в экспериментальных исследованиях $\varphi_z \approx \pi$.

Распределение температурного поля в материале в направлении распространения бегущей волны при условии, что период системы $L(z)$ меняется по определенному закону можно записать в виде:

$$T(z) = T_{нач}(z) + \frac{0,239 \cdot P_{ex} \cdot k^2 \cdot L(z) \cdot \varepsilon'' \cdot \tau}{\pi \cdot a_x \cdot d \cdot c_d \cdot \rho_d} \cdot e^{-\frac{k^2 \cdot L(z) \cdot \varepsilon''}{\pi} \cdot z}, \quad (1)$$

где: k - волновое число свободного пространства $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ - длина волны источника СВЧ энергии ($\lambda = 12,24$ см); ε'' - комплексная составляющая относительной диэлектрической проницаемости материала ($\varepsilon'' = 0,12$); P_{ex} - выходная мощность источника СВЧ энергии ($P_{ex} = 600$ Вт); c_d и ρ_d - теплоемкость и плотность материала; τ - время обработки материала в СВЧ поле; $T_{нач}(z)$ - начальная температура материала; a_x - размер замедляющей системы в направлении оси "x".

Рассмотрим один из возможных методов создания равномерного распределения температурного поля в относительно тонких листовых диэлектрических материалах. Суть метода состоит в том, чтобы путем изменения периода замедляющей системы $L(z)$ в направлении распространения бегущей волны преобразовать экспоненциальную зависимость распределения температурного поля в материале в линейную. При сложении двух линейных функций, в СВЧ устройстве, состоящем из двух секций, получить постоянное распределение температурного поля в материале.

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

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

где ℓ - ширина обрабатываемого материала.

Распределение температурного поля в материале в случае линейного приближения имеет вид:

$$T(z) = T_{нач}(z) + \frac{0,239 \cdot k^2 \cdot \varepsilon'' \cdot P_{ex} \cdot L(z) \cdot \tau}{\pi \cdot a_x \cdot d \cdot c_d \cdot \rho_d} \cdot \left(1 - \frac{1 - e^{-\frac{k^2 \cdot \varepsilon'' \cdot L(\ell) \cdot \ell}{\pi}}}{\ell} \cdot z \right) \quad (3)$$

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 $L(0) = 12$ мм до значения $L(\ell) = 14,5$ мм на длине материала $\ell = 500$ мм.

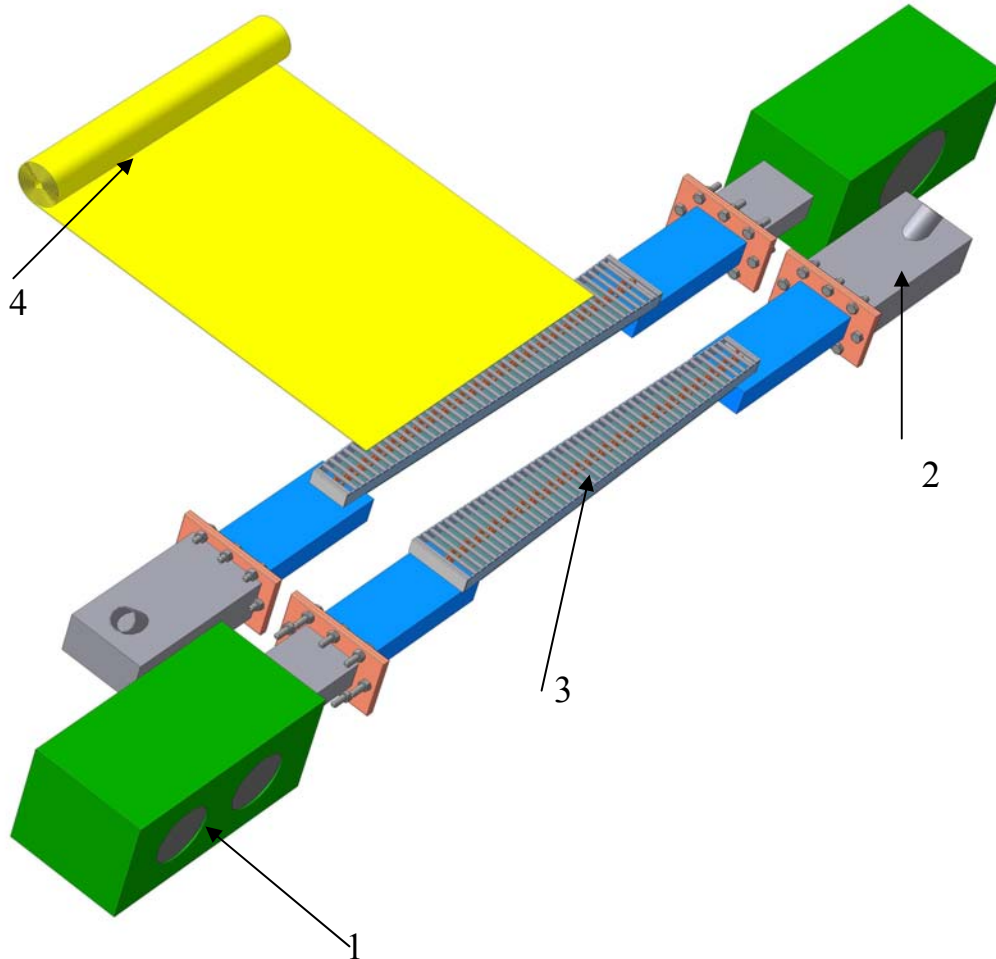


Рис. 2. СВЧ устройство на основе секций замедляющих систем для равномерного нагрева листовых материалов:

- 1 – источник СВЧ энергии; 2 – согласованная водяная нагрузка;
- 3 – замедляющая система с переменным периодом $L(z)$;
- 4 – обрабатываемый листовый материал.

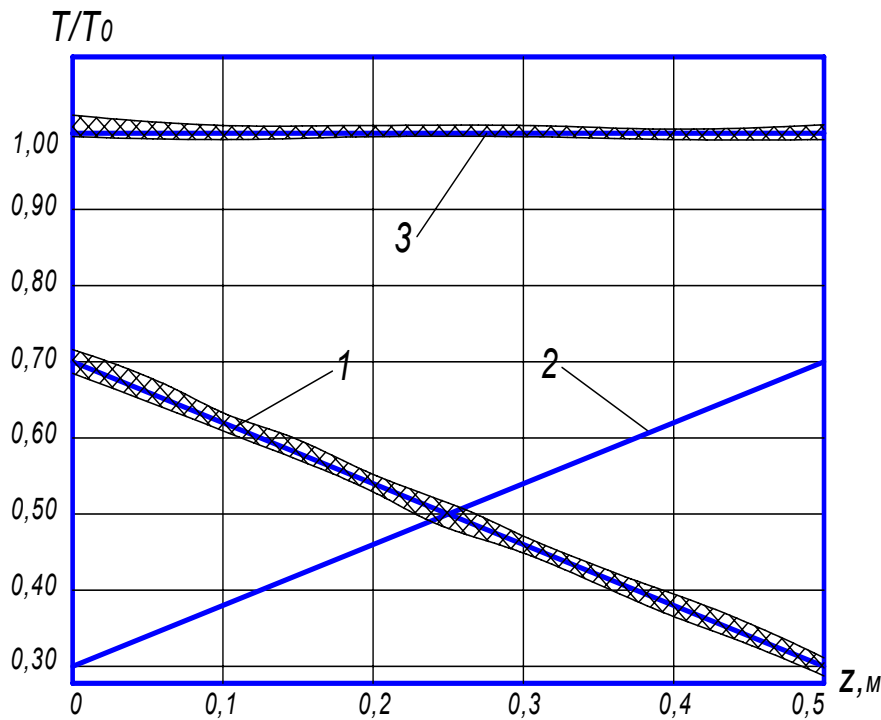


Рис. 3. Теоретические и экспериментальные характеристики распределения температурного поля в листовом материале для секции (1, 2) и для СВЧ устройства (3), конструкция которого представлена на рис. 2.

▨ - фоном обозначена область экспериментальных значений при изменении периода замедляющей системы от значения $L(0) = 12$ мм до значения $L(\ell) = 14,5$ мм на длине материала $\ell = 500$ мм.

Параметры диэлектрического материала:

$$\varepsilon'' = 0,12; c_{\partial} = 0,8 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot ^{\circ}\text{C}}; \rho_{\partial} = 2,4 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}; d = 1\text{мм}; \ell = 500\text{мм}.$$

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.