

ПРИМЕНЕНИЕ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В РЕЖИМЕ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ

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

Questions of the even temperature field creation in sheet dielectric materials passing consistently through two sections of one-dimensionally periodic and two-dimensionally periodic slow-wave structures are examined. A kind of the slow-wave structures consists in changes according to the exponential law of their dimensions 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.

Сконцентрировать электромагнитное поле непосредственно в объеме обрабатываемого листового диэлектрического материала позволяет использование в качестве нагревательных элементов СВЧ устройств, различные конструкции замедляющих систем.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований, которые были проведены на секциях различных конструкций замедляющих систем:

- одномерно-периодической замедляющей системы штыревого типа со связками, конструкция которой представлена на рис. 1;

- двумерно-периодической замедляющей системы типа многопроводной линии со связками и индуктивными диафрагмами, конструкция которой представлена на рис. 2.

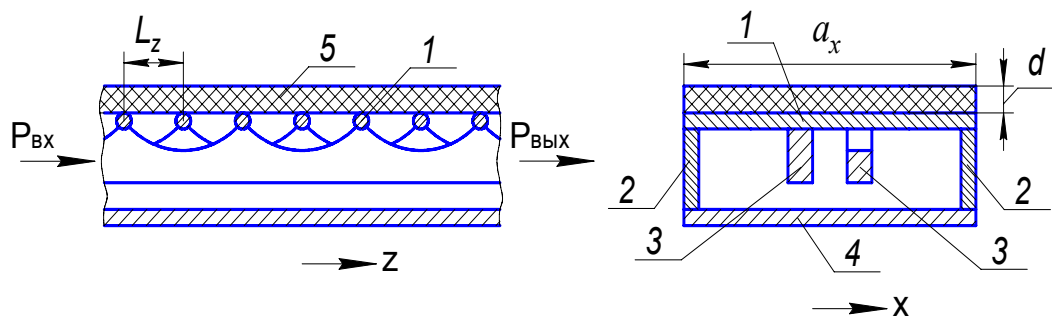


Рис. 1. Конструкция одномерно-периодической замедляющей системы:

1- проводник; 2 – пластины; 3 – связки; 4 – экран; 5 – материал; d - толщина материала; L_z - период замедляющей системы; a_x - ширина замедляющей системы.

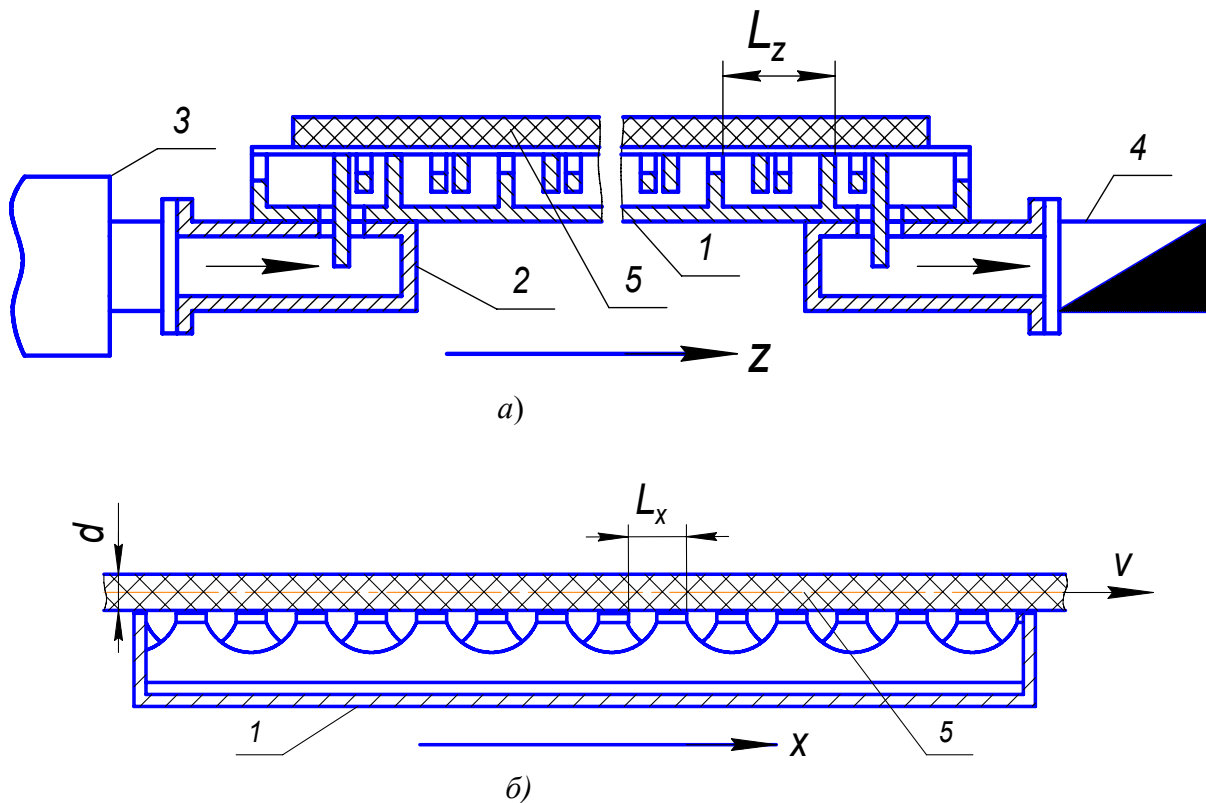


Рис. 2. Продольное (а) и поперечное (б) сечение СВЧ устройства термообработки листовых диэлектрических материалов:

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; ℓ - ширина обрабатываемого материала; L_x - период замедляющей системы в направлении оси “х”; d – толщина обрабатываемого материала; V - скорость движения материала; d – толщина обрабатываемого материала.

Условие постоянства температуры $T(z)$ в материале в направлении распространения энергии электромагнитного поля получено при условии, что период одномерно или двумерно-периодической $L(z)$ замедляющей системы в направлении распространения бегущей волны меняется по определенному закону [1]:

$$T(z) = T_n(z) + \frac{P_{\text{вх}} \cdot k^2 \cdot L(z) \cdot \varepsilon'' \cdot \tau}{\pi \cdot a_x \cdot d \cdot c_d \cdot \rho_d} \cdot e^{-\frac{k^2 \cdot L(z) \cdot \varepsilon''}{\pi} \cdot z} = \text{const} \quad (1)$$

$$T(z) = T_n(z) + \frac{P_{\text{вх}} \cdot k^2 \cdot L(z) \cdot \varepsilon'' \cdot \tau}{\varphi_z \cdot N_x \cdot L_x \cdot d \cdot c_d \cdot \rho_d} \cdot e^{-\frac{k^2 \cdot L(z) \cdot \varepsilon''}{\varphi_z} \cdot z} = \text{const} \quad (2)$$

Здесь: 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 обрабатываемого материала;

c_d и ρ_d - теплоемкость и плотность материала; τ - время обработки материала; φ_z - фазовый сдвиг, приходящийся на период системы $L(z)$; N_x - число периодов замедляющей системы в направлении оси "x"; P_{ex} - выходная мощность источника СВЧ энергии; $T_n(z)$ - начальная температура материала.

Для удовлетворения этого условия необходимо и достаточно, чтобы:

$$\frac{L(z)}{L(0)} \cdot e^{-\frac{k^2 \cdot L(z) \cdot \varepsilon''}{\pi} \cdot z} = 1 \quad (3)$$

$$\frac{L(z)}{L(0)} \cdot e^{-\frac{k^2 \cdot L(z) \cdot \varepsilon''}{\varphi_z} \cdot z} = 1 \quad (4)$$

Уравнение (3) описывает одномерно-периодическую замедляющую систему, которая характеризуется значением $\varphi_z = \pi$, а уравнение (4) описывает двумерно-периодическую замедляющую систему, которая характеризуется значением $\varphi_z = (0,2 - 0,25)\pi$.

На рис. 3 представлен общий вид СВЧ устройства на основе секции двумерно-периодической замедляющей системы, аналогичный вид имеет и секция СВЧ устройства на основе одномерно-периодической замедляющей системы.

Листовой материал имел следующие параметры:

$\varepsilon'' = 0,02$ - для двумерно-периодической замедляющей системы;

$\varepsilon'' = 0,12$ - для одномерно-периодической замедляющей системы;

$c_d = 0,8 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot ^\circ\text{C}}$; $\rho_d = 2,4 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$; $d = 1\text{мм}$; $\ell = 250\text{мм}$.

На рис. 4 и 5 представлены теоретические и экспериментальные характеристики распределения температурного поля в листовом материале, полученные на секции одномерно и двумерно-периодической замедляющей системы $L(z)$ устройства СВЧ нагрева при условии изменения периода системы в направлении распространения бегущей волны вдоль оси z :

от значения $L(0) = 12\text{мм}$ до значения $L(\ell) = 20\text{мм}$ на длине $\ell = 250\text{мм}$ - для одномерно-периодической замедляющей системы;

от значения $L(0) = 20\text{мм}$ до значения $L(\ell) = 35\text{мм}$ на длине $\ell = 250\text{мм}$ - для двумерно-периодической замедляющей системы.

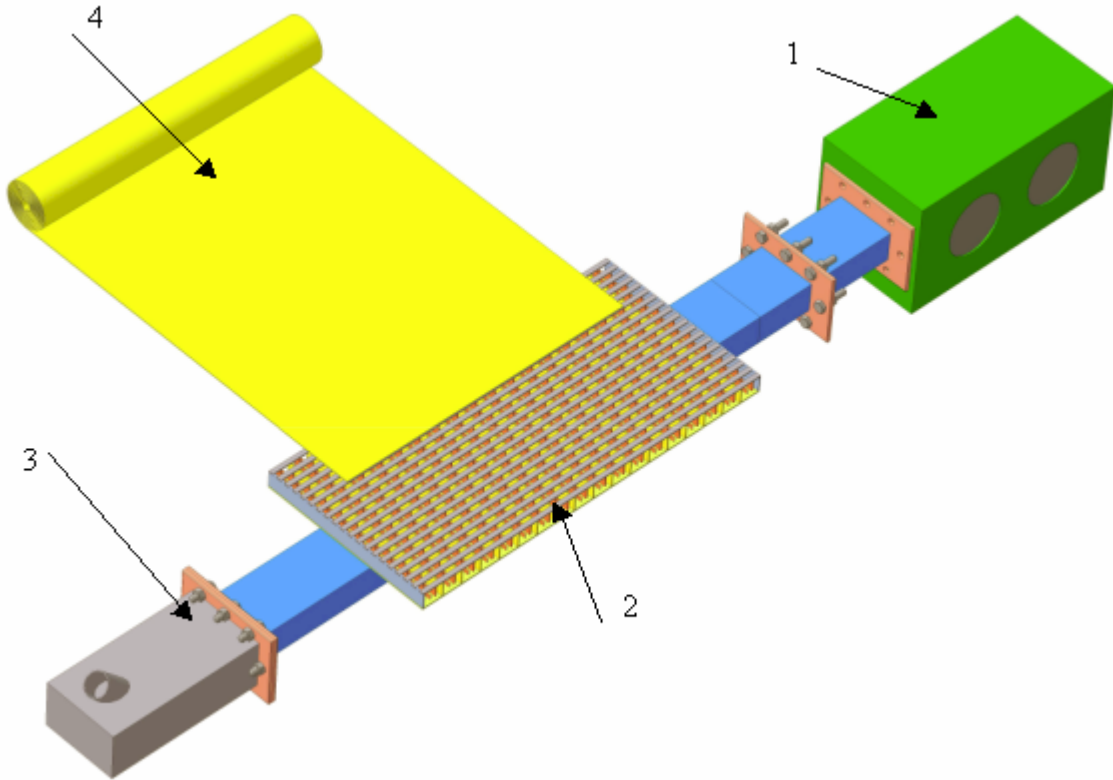


Рис. 3. Конструкция секции СВЧ устройства на основе двумерно-периодической замедляющей системы для термообработки материалов с малыми диэлектрическими потерями.

1 – источник СВЧ энергии; 2 – секция двумерно-периодической замедляющей системы; 3 – нагрузка.

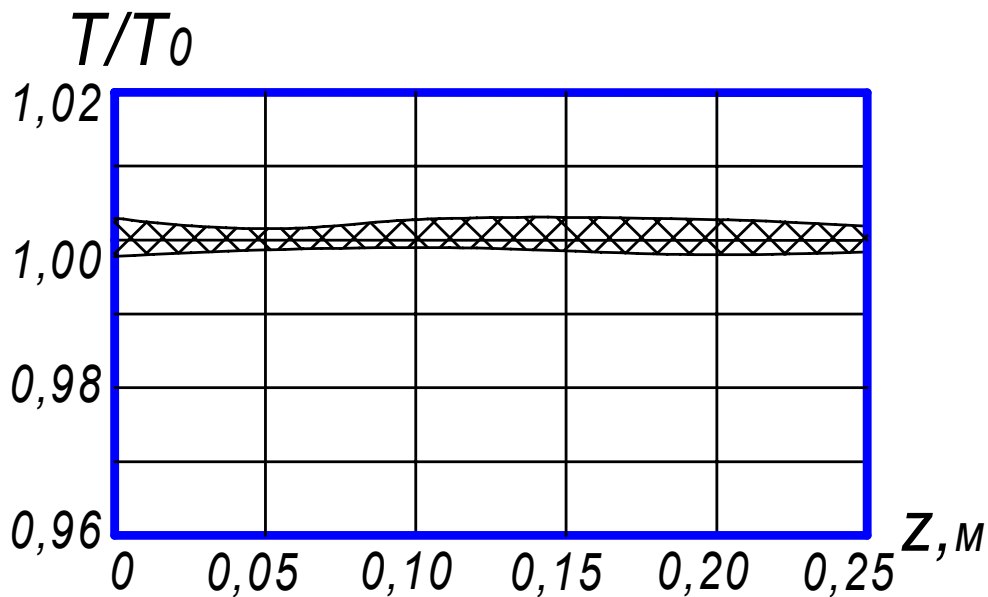


Рис. 4. Теоретические и экспериментальные характеристики распределения температурного поля в листовом материале для СВЧ устройства, конструкция которого представлена на рис.3. При этом период системы изменяется от значения $L(0) = 20$ мм до значения $L(\ell) = 35$ мм на длине 250 мм, $\times \times \times \times$ - фоном обозначена область изменения экспериментальных значений.

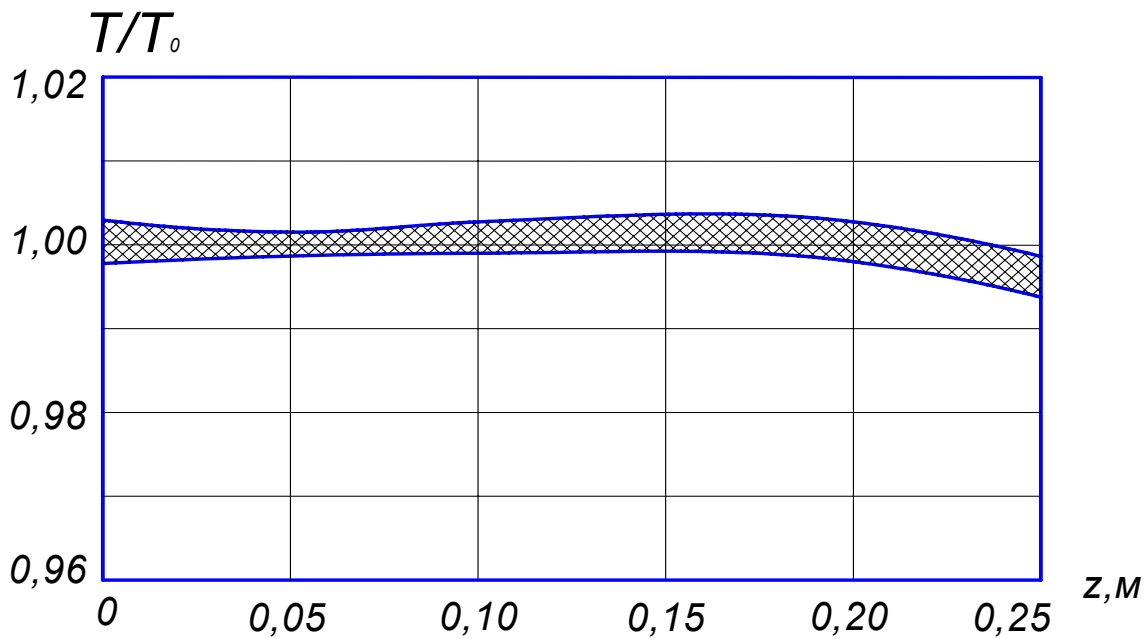
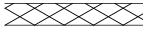


Рис. 5. Теоретические и экспериментальные характеристики распределения температурного поля в листовом материале для секции одномерно-периодической замедляющей системы СВЧ устройства. При этом период системы изменяется от значения $L(0) = 12$ мм до значения $L(\ell) = 20$ мм на длине 250 мм,  - фоном обозначена область изменения экспериментальных значений

С физической точки зрения, изменяя по заданному закону период замедляющей системы, поддерживается постоянная величина напряженности электрического поля в направлении распространения СВЧ энергии в материале.

Разброс температурного поля составил не более 5%, а расхождение рассчитанных и измеренных характеристик распределения температурного поля в материале не превышало 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.