

СВЧ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ТЕРМООБРАБОТКИ ТРУБ С МАЛЫМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПОТЕРЯМИ

Д.А. Лоик, А.В. Мамонтов, В.Н. Нефедов, А.С. Черкасов, Д.С. Королев
Московский государственный институт электроники и математики
E-mail: lmis@miem.ru

Annotation

The construction of the batch operation microwave device working in the travelling wave mode of operation for the effective thermal treatment of pipes with low dielectric losses is examined. Microwave device uses two-dimensionally periodic slow-wave structure with a period changing according to the certain law in the travelling wave direction. The divergence between calculated and measured temperature field distribution in the pipe material does not exceed 5%.

В работе [1] предложена новая классификация диэлектрических материалов. По этой классификации к материалам с малыми диэлектрическими потерями относят радиопрозрачные материалы, которые не содержат свободной и связанной воды (пластические массы с различными наполнителями, полипропилен, полиэтилен, фторопласт и т.д.) и характеризуются значением комплексной части относительной диэлектрической проницаемости $\epsilon'' < 0,1$.

Показано [1], что наиболее эффективными электродинамическими системами для термообработки материалов с малыми диэлектрическими потерями являются двумерно-периодические замедляющие системы. Длина бегущей волны в двумерно-периодических замедляющих системах может составлять несколько длин волн источника СВЧ энергии:

$$\lambda_{\text{волн}} = (1,5 - 5,0) \cdot \lambda, \quad (1)$$

где λ - длина волны источника СВЧ энергии;

$\lambda_{\text{волн}}$ - длина волны в двумерно-периодической замедляющей системе.

СВЧ метод позволяет осуществить равномерный нагрев диэлектрической трубы в периодическом режиме. В работе [2] показано, что, изменяя период электродинамической системы в направлении распространения энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот по определенному закону можно обеспечить равномерный нагрев обрабатываемого материала в стационарном режиме.

На рис. 1 представлена конструкция СВЧ устройства периодического действия для эффективной термообработки труб с малыми диэлектрическими потерями.

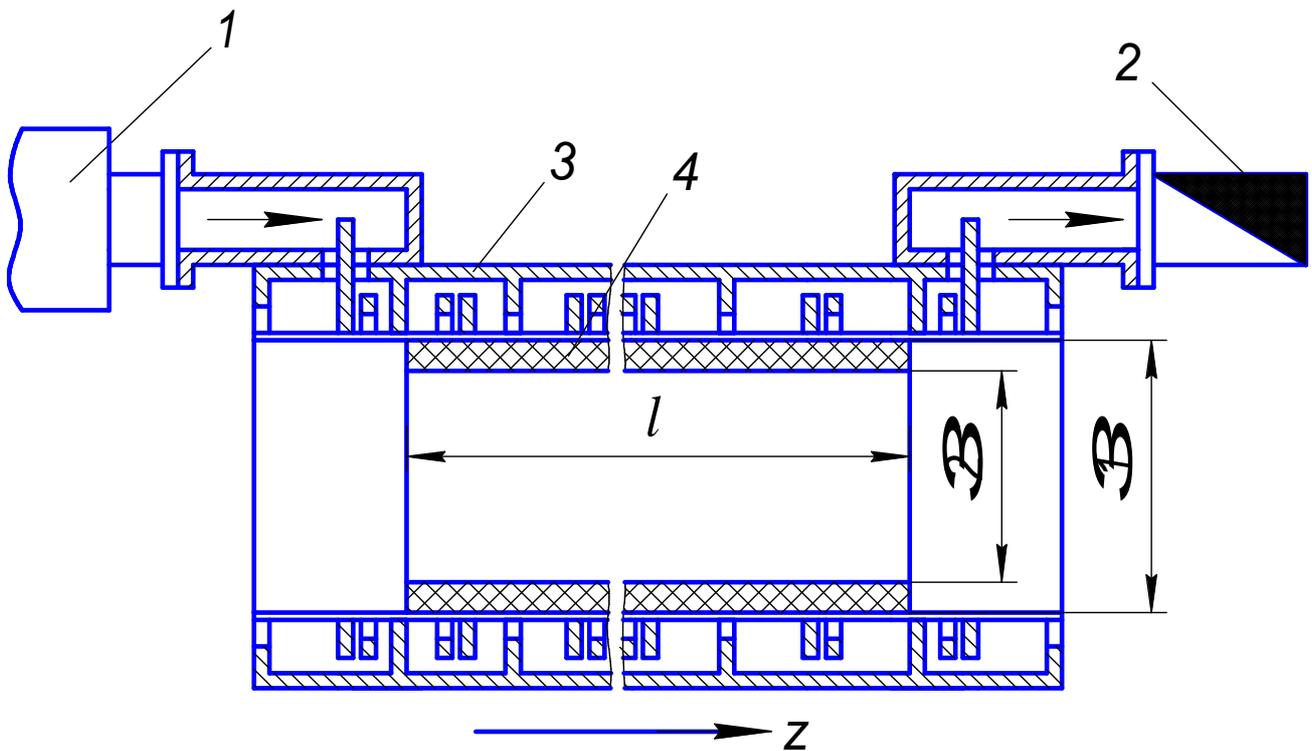


Рис. 1. Конструкция СВЧ устройства периодического действия для термообработки диэлектрических труб. 1 – источник СВЧ энергии, 2 – водяная нагрузка, 3 – двумерно-периодическая замедляющая система, 4 – обрабатываемый материал, $\Phi 1$ – внешний диаметр трубы, $\Phi 2$ – внутренний диаметр трубы, l – длина диэлектрической трубы.

В качестве электродинамической системы используется замкнутая в цилиндр конструкция двумерно-периодической замедляющей системы. Основу конструкции двумерно-периодической замедляющей системы составляют проводники многопроводной линии, расположенные параллельно друг другу по образующей цилиндра. На проводниках многопроводной линии в определенной последовательности расположены емкостные (двойные связки) и индуктивные (индуктивные диафрагмы) элементы, обеспечивающие необходимые дисперсионные характеристики и зависимость волнового сопротивления от частоты.

В азимутальном направлении электродинамическая система характеризуется постоянным периодом L_ψ . В этом направлении устанавливается стоячая замедленная волна, которая характеризуется коэффициентом замедления $k_{зам}$.

В осевом направлении, вдоль оси z , которое характеризуется периодом электродинамической системы L_z , распространяется ускоренная волна, фазовая скорость которой в несколько раз больше скорости света.

Модель расчета распределения температуры в материале трубы СВЧ устройства типа бегущей волны выбрана в виде нагруженной длинной линии.

Условие постоянства температуры $T(z)$ в материале в направлении распространения энергии электромагнитного поля получено при условии, что

период двумерно-периодической замедляющей системы L_z в направлении распространения бегущей волны меняется по определенному закону:

$$T(z) = T_{нач}(z) + \frac{P_{ex} \cdot k^2 \cdot L(z) \cdot \varepsilon'' \cdot \tau}{\varphi_z \cdot 2\pi \cdot (R_\delta^2 - r_\delta^2) \cdot c_\delta \cdot \rho_\delta} \cdot e^{-\frac{k^2 \cdot L(z) \cdot \varepsilon''}{\varphi_z} \cdot z} = const \quad (2)$$

где: $T_{нач}(z)$ - начальная температура диэлектрической трубы;

P_{ex} - выходная мощность источника СВЧ энергии;

τ - время термообработки материала в СВЧ устройстве;

φ_z - фазовый сдвиг, приходящийся на период системы $L(z)$;

k - волновое число свободного пространства $\left(k = \frac{2\pi}{\lambda}\right)$;

c_δ - удельная теплоемкость материала трубы;

ρ_δ - плотность материала трубы;

ε'' - комплексная составляющая относительной диэлектрической проницаемости материала трубы;

R_δ - внешний диаметр трубы;

r_δ - внутренний диаметр трубы.

Для удовлетворения условия (2) необходимо и достаточно, чтобы:

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

Уравнение (3) описывает закон изменения периода двумерно-периодической замедляющей системы в осевом направлении.

Материал трубы и основные параметры электродинамической системы имели следующие значения:

$$\varepsilon'' = 0,02; \quad c_\delta = 0,8 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot ^\circ\text{C}}; \quad \rho_\delta = 2,4 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}; \quad R_\delta = 30\text{мм}; \quad r_\delta = 28\text{мм};$$

$$\lambda = 12,24\text{см}; \quad \ell = 250\text{мм}; \quad L(0) = 20\text{мм}; \quad L(\ell) = 35\text{мм}; \quad \varphi_z = 0,2 \cdot \pi$$

На рис. 2 показана зависимость периода замедляющей системы $L_z = f(z)$, а на рис. 3 представлены рассчитанные и измеренные характеристики распределения температурного поля в материале.

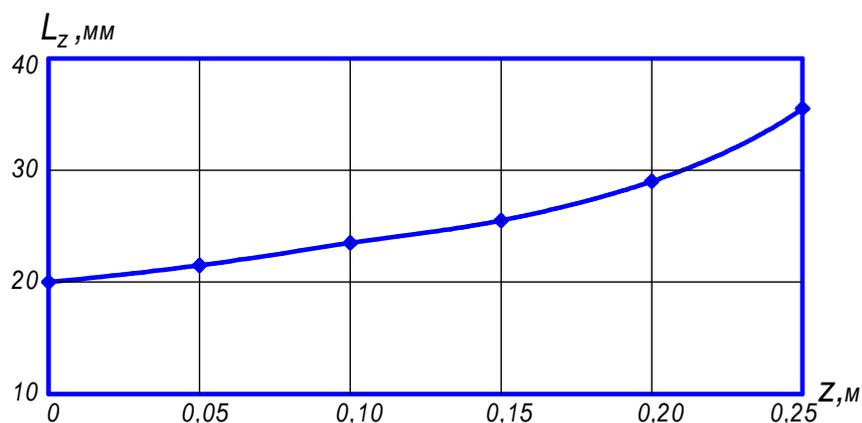


Рис. 2. Изменение периода двумерно-периодической замедляющей системы в осевом направлении.

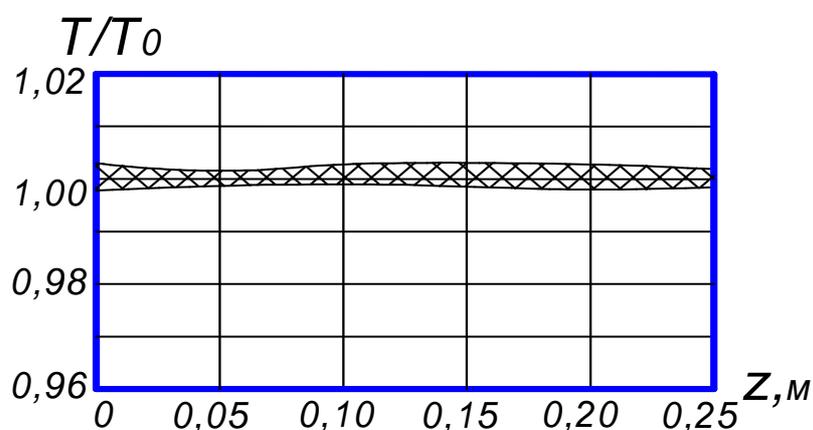


Рис. 3. Теоретические и экспериментальные характеристики распределения температуры в диэлектрической трубе для СВЧ устройства, конструкция которого представлена на рис. 1.  - фоном обозначена область экспериментальных значений.

Разброс температурного поля составил не более 4%, а расхождение рассчитанных и измеренных характеристик распределения температурного поля в материале не превышало 5%.

1. 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”, МГУ, стр. 51-55.
2. А.В. Мамонтов, И.В. Назаров, В.Н. Нефедов, Т.А. Потапова, А.С. Черкасов “Применение замедляющих систем для термообработки диэлектрических материалов в режиме бегущей волны”. Труды VIII межвузовской научной школы молодых специалистов: “Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине”, МГУ, стр. 65-69.