

КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ СВЧ УСТРОЙСТВ ТЕРМООБРАБОТКИ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д.А. Лоик, А.В. Мамонтов, В.Н. Нефедов, И.В. Назаров

Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий

E-mail: niipmt@mail.ru

Methods of the even temperature distribution creation over the cross section of the sheet materials which are travelled in series through the microwave device, consisting of two modules are considered. The first module consists of the waveguide sections, the second is based on the slow-wave system sections. The total temperature dispersion in the cross section of the sheet material is less than 9% after passing through the microwave device.

В настоящей статье рассмотрена концепция построения СВЧ устройств типа бегущей волны для равномерного нагрева, как по площади, так и по поперечному сечению листовых диэлектрических материалов. Актуальность постановки такой работы обусловлена тем, что для промышленных целей необходимо равномерно нагревать листовые материалы, толщина которых d должна удовлетворять следующему условию:

$$d > 0,3 \cdot \lambda, \quad (1)$$

где λ - длина волны источника СВЧ энергии.

В работе [1] представлена концепция построения СВЧ устройств типа бегущей волны для равномерного нагрева относительно тонких листовых диэлектрических материалов. В основе этой концепции лежат три основных принципа:

1. СВЧ устройство состоит из двух одинаковых по конструкции и параметрам секций, энергия электромагнитного поля в которых распространяется во взаимно-противоположных направлениях, перпендикулярно направлению движения обрабатываемого материала;

2. Секция СВЧ устройства типа бегущей волны состоит из электродинамической системы, которая с одной стороны согласована с источником СВЧ энергии, а с другой стороны с водяной согласованной нагрузкой в которой расположен датчик прохождения мощности для контроля технологического процесса;

3. Принцип суперпозиции распределения температуры в материале от каждой секции СВЧ устройства.

Предложенная концепция построения СВЧ устройств равномерного нагрева относительно тонких диэлектрических материалов, подтверждена многочисленными экспериментальными исследованиями в различных технологических процессах.

Предлагаемая концепция построения СВЧ устройств равномерного нагрева листовых материалов по толщине основана на следующих принципах:

1. СВЧ устройство состоит из двух модулей, а каждый модуль из одинаковых по конструкции и параметрам секций, энергия электромагнитного поля в которых распространяется во взаимно-противоположных направлениях, перпендикулярно направлению движения листового материала;

2. Секция СВЧ устройства состоит из электродинамической системы, которая с одной стороны согласована с источником СВЧ энергии, а с другой стороны согласована с водяной нагрузкой, в которой расположен датчик прохождения мощности для контроля технологического процесса;

3. Первый и второй модуль в направлении движения материала имеют электродинамические системы, свойства которых создают взаимодополняющие распределения температуры по толщине материала и таким образом за счет принципа суперпозиции достигается постоянное значение температуры в материале после прохождения СВЧ устройства.

На рис. 1 представлено продольное сечение СВЧ устройства типа бегущей волны для равномерного нагрева листовых диэлектрических материалов по толщине.

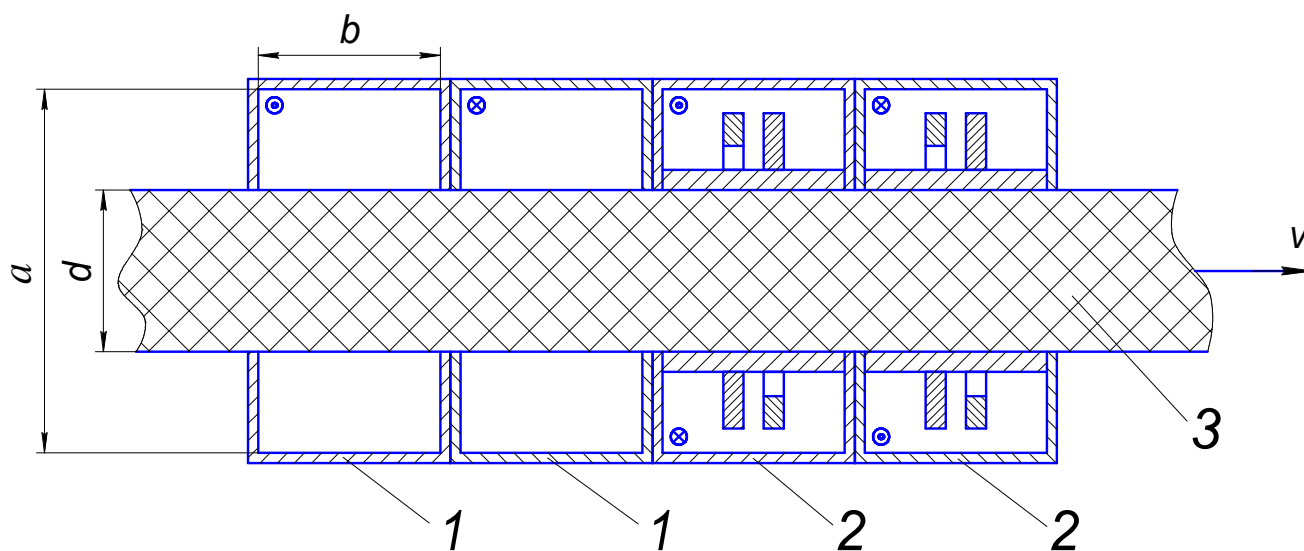


Рис. 1. Продольное сечение СВЧ устройства типа бегущей волны для равномерного нагрева листовых диэлектрических материалов. 1 – волновод, 2 – замедляющая система, 3 – листовый материал, v - скорость движения материала, d - толщина листового материала.

Первый модуль образован двумя волноводными секциями на основном типе волны H_{10} , а второй модуль состоит из четырех секций на основе замедляющих систем.

В качестве эквивалентной модели каждой секции СВЧ устройства использована нагруженная длинная линия.

Такая конструкция СВЧ устройства позволяет реализовать по ширине листового материала l равномерное распределение температуры [1].

Листовой материал, толщина которого удовлетворяет уравнению (1) проходит через середину широкой стенки волновода. Распределение температуры по толщине листового материала в первом модуле, который образован волноводными секциями на основном типе волны H_{10} , описывается функцией [2]:

$$T(y) \sim \sin^2\left(\frac{\pi \cdot y}{a}\right), \quad (2)$$

где a - размер широкой стенки волновода.

На рис. 2 представлены рассчитанные и измеренные распределения температурного поля по толщине листового диэлектрического материала после прохождения первого модуля, состоящего из секций волноводного типа.

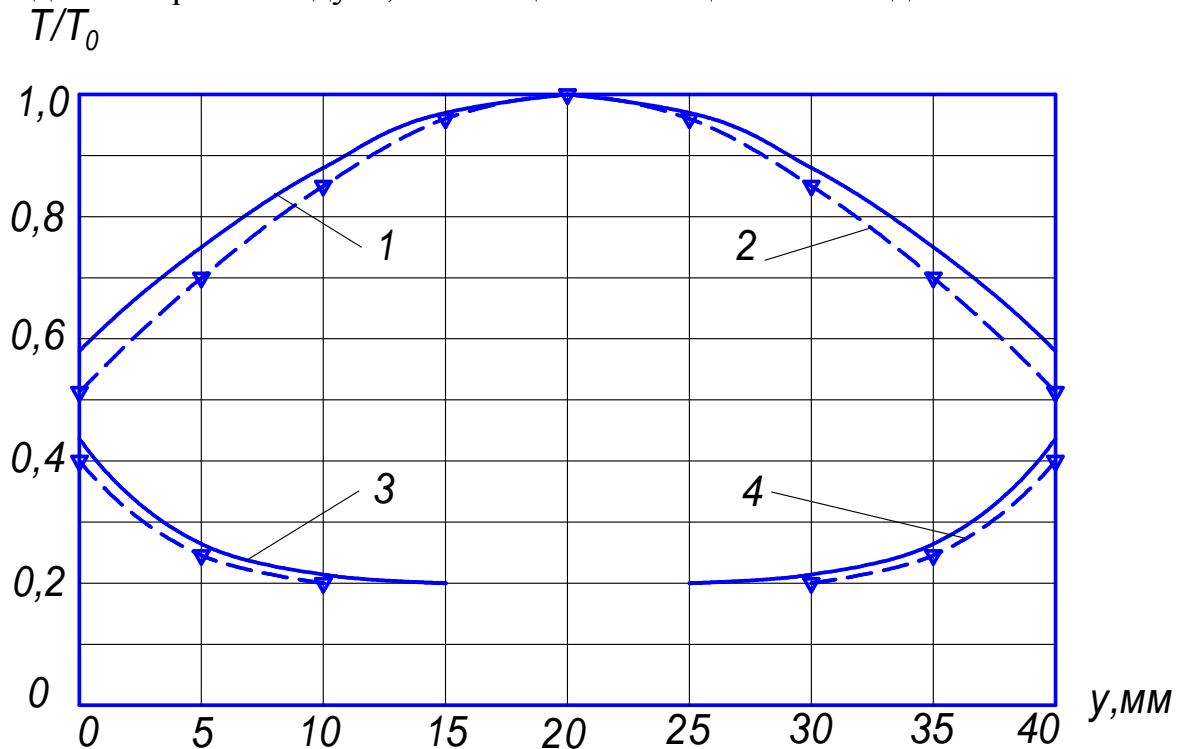


Рис.2. Рассчитанные (1) и измеренные (2) распределения температурного поля по толщине листового диэлектрического материала после прохождения двух волноводных секций СВЧ устройства, а также рассчитанные (3) и измеренные (4) характеристики температуры материала после прохождения четырех секций замедляющих систем.

Видно, что разница температуры между центром листового материала и его поверхностью составляет более 30%.

Для того чтобы уменьшить разброс распределения температуры по толщине материала используют второй модуль на основе секций замедляющих систем. В замедляющих системах температура по толщине материала спадает по экспоненциальному закону от поверхности к центру материала [3].

В работе [3] показано, что влияние комплексной части относительной диэлектрической проницаемости материала на распределение температурного поля материала по толщине, в направлении оси y , незначительно, и им можно

пренебречь. Значение затухания α_y для замедляющей системы можно записать в виде:

$$\alpha_y = k \cdot k_{зам} \sqrt{1 - \frac{\epsilon'}{k_{зам}^2} - \frac{\epsilon''^2}{4 \cdot k_{зам}^4}} \approx k \cdot k_{зам} \cdot \sqrt{1 - \frac{\epsilon'}{k_{зам}^2}}, \quad (3)$$

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

$k_{зам}$ - коэффициент замедления $\left(k_{зам} = \frac{\lambda}{\lambda_{зам}}\right)$;

ϵ' - действительная часть относительной диэлектрической проницаемости листового материала;

ϵ'' - комплексная часть относительной диэлектрической проницаемости листового материала;

$\lambda_{зам}$ - длина волны в замедляющей системе.

Уравнение для распределения температурного поля по толщине материала можно в первом приближении записать в виде:

$$T(y) \approx T(0) \cdot e^{-2 \cdot k \cdot k_{зам} \cdot \sqrt{1 - \frac{\epsilon'}{k_{зам}^2}} \cdot y}, \quad (4)$$

где $T(0)$ - температура материала на поверхности замедляющей системы в заданном продольном сечении вдоль оси "z".

На рис. 2 представлены рассчитанные и измеренные характеристики распределения температурного поля по толщине листового материала после прохождения второго модуля СВЧ устройства.

На рис. 3 представлены рассчитанные и измеренные характеристики распределения температуры по толщине материала после прохождения СВЧ устройства.

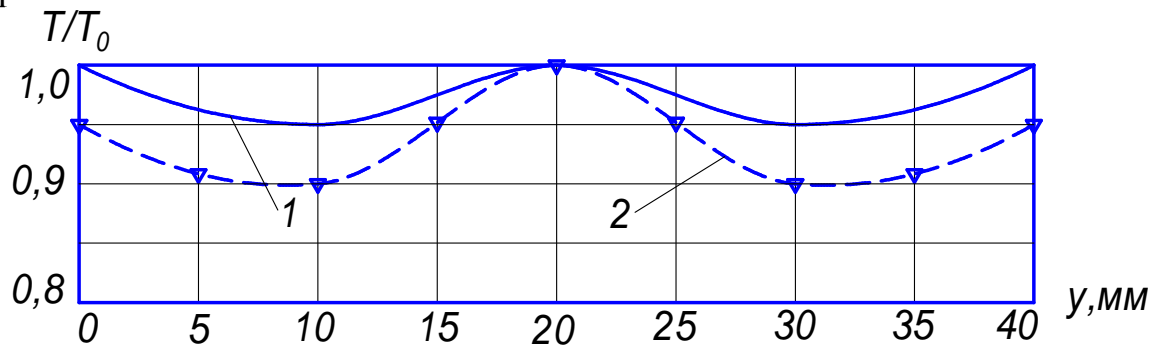


Рис. 3. Теоретические (1) и экспериментальные (2) характеристики распределения температурного поля по толщине материала после прохождения СВЧ устройства.

Максимальный разброс температурного поля по толщине материала составил не более 9%.,.

1. С.Ю. Шахбазов, И.В. Назаров, В.Н. Нефедов, Ю.П. Меньшиков, А.С. Черкасов “Применение концентрированных потоков СВЧ энергии для равномерного нагрева листовых диэлектрических материалов”. Труды VII Ежевузовской научной школы молодых специалистов: “Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине”. МГУ, 2007, стр. 47-50.
2. И.В. Лебедев “Техника и приборы СВЧ.” – М.: Высшая школа, 1970, т. 1. – 289с.
3. Архангельский Ю.С., Девяткин И.И. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1983.
4. С.Ю. Шахбазов, М.В. Нефедов, Е.В. Никишин, Д.А. Лоик, А.О. Никишев. “Измерение распределения температурного поля по толщине листовых материалов в СВЧ – устройствах типа бегущей волны” Метрология, № 5, 2008, стр.38-44.