

# Микроволновые устройства для термообработки листовых материалов с малыми диэлектрическими потерями

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований в области высокоэффективных микроволновых технологий термообработки листовых материалов с малыми диэлектрическими потерями. Для увеличения постоянной затухания амплитуды напряженности электрического поля в материале с малыми диэлектрическими потерями в качестве нагревательных элементов использовались секции двумерно-периодических замедляющих систем. Основой конструкции микроволнового устройства является модуль, состоящий из двух одинаковых по конструкции и параметрам секций устройства СВЧ-нагрева, расположенных одна над другой, а энергия электромагнитного поля распространяется по этим секциям во взаимно противоположных направлениях. Между двумя секциями расположен обрабатываемый материал. Каждая секция устройства СВЧ-нагрева состоит из двумерно-периодической замедляющей системы, которая с одной стороны согласована с источником СВЧ-энергии, а с другой стороны — с водяной нагрузкой, в которой имеется датчик проходящей мощности для контроля технологического процесса. В качестве модели микроволнового устройства с обрабатываемым материалом использована нагруженная длинная линия с заданными граничными условиями. Для снижения уровня побочного излучения на входе и выходе обрабатываемого материала используются специальные конструкции фильтров, препятствующих выходу СВЧ-излучения из работающей установки. Расхождение теоретических и экспериментальных характеристик распределения температуры в листовом материале (эбоните) с малыми диэлектрическими потерями не превышает 4%, а отклонение температуры в материале от номинального значения температуры не превышает 7%. К материалам с малыми диэлектрическими потерями, в частности, относятся: полистирол, полипропилен и полиэтилен с различными наполнителями, например, в виде 10% сажи или других красителей, плексиглас, эбонит и другие пластические массы. Термообработка таких материалов газом или другими известными способами не приводит к равномерности нагрева по всему объему материала ввиду малой теплопроводности пластических масс и при последующих операциях, таких как прессование или штамповка, возникают растрескивание или другие нежелательные дефекты.

**Ключевые слова:** СВЧ-устройство, распределение температуры, диэлектрический материал, замедляющая система.

**Мамонтов А.В.,**

Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики" (МИЭМ НИУ ВШЭ), доцент, a.mamontov@hse.ru

**Нефедов В.Н.,**

Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики" (МИЭМ НИУ ВШЭ), профессор, 6034348@mail.ru

**Симонов В.П.,**

Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики" (МИЭМ НИУ ВШЭ), профессор, vsimonov@hse.ru

Высокоэффективные технологические процессы термообработки диэлектрических материалов направлены на использование в качестве основного или вспомогательного источника тепла — энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот (СВЧ-энергии). В работе рассматривается одно из возможных решений актуальной задачи, которая заключается в равномерном нагреве листовых материалов больших площадей с малыми диэлектрическими потерями. Наиболее распространенный метод термообработки таких диэлектрических материалов состоит в том, что в обрабатываемый материал вводят специальные добавки, которые хорошо поглощают СВЧ-энергию и не оказывают нежелательных влияний на его свойства. Существует целый спектр материалов, в частности, пластических масс, добавки в которые крайне нежелательны, так как они нарушают их свойства. Термообработка таких материалов газом или другими

известными способами не приводит к равномерности нагрева по всему объему материала ввиду малой теплопроводности пластических масс и при последующих операциях, таких как прессование или штамповка, возникают растрескивание или другие нежелательные дефекты. К таким материалам в частности, относятся: полистирол, полипропилен и полиэтилен с различными наполнителями, например, в виде 10% сажи или других красителей, плексиглас, эбонит и другие пластические массы.

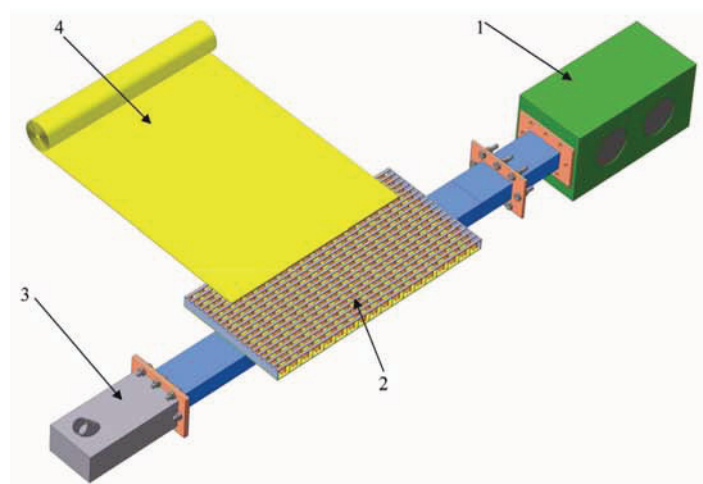
Осуществить эффективный нагрев листовых материалов с использованием классических устройств волноводного типа или традиционных конструкций замедляющих систем очень сложно либо практически невозможно ввиду малого значения постоянной затухания амплитуды напряженности электрического поля в обрабатываемом материале. Для увеличения постоянной затухания амплитуды напряженности электрического поля в материале в качестве нагревательного элемента СВЧ-устройств используют секции двумерно-периодических замедляющих систем [1].

Рассмотрены устройства СВЧ-нагрева на основе секций двумерно-периодических замедляющих систем. Экспериментальные исследования по термообработке листовых материалов с малыми диэлектрическими потерями были проведены на секциях двумерно-периодической замедляющей системы типа многопроводной линии со связками и индуктивными диафрагмами [2-3]. Основу конструкции двумерно-периодической замедляющей системы составляют проводники многопроводных линий, расположенные вдоль оси  $z$  параллельно друг другу и на равных расстояниях друг от друга. На проводниках линии в периодической последовательности расположены элементы конструкции «индуктивные диафрагмы», между которыми расположены элементы «двойные связки». Элементы конструкции обеспечивают



необходимые электродинамические параметры замедляющей системы как в поперечном направлении  $x$  – направлении движения материала, так и в продольном направлении  $z$  – направлении распространения энергии электромагнитного поля. Поперечное направление характеризуется поперечным фазовым сдвигом  $\varphi_x$  на периоде пространства взаимодействия  $L_x$ , а продольное направление характеризуется фазовым сдвигом  $\varphi_z$  на периоде системы  $L_z$ . В поперечном направлении секция ограничена электрическими стенками, которые расположены в плоскостях симметрии замедляющей системы. Между электрическими стенками устанавливается замедленная стоячая волна. В продольном направлении размер секции двумерно-периодической замедляющей системы определяется шириной обрабатываемого диэлектрического материала  $\ell$ .

Секция устройства СВЧ-нагрева листовых материалов состоит из секции двумерно-периодической замедляющей системы, которая с одной стороны согласована с источником СВЧ-энергии, а с другой стороны с водяной нагрузкой, на которой установлен датчик проходящей мощности для контроля технологического процесса. Секция устройства СВЧ-нагрева листовых материалов представлена на рис. 1.



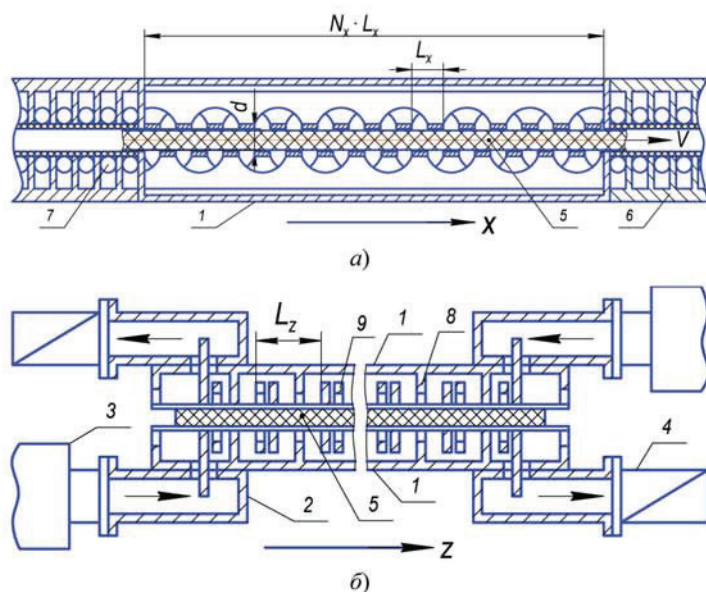
**Рис. 1.** Секция устройства СВЧ-нагрева на основе двумерно-периодической замедляющей системы: 1 – источник СВЧ-энергии; 2 – секция двумерно-периодической замедляющей системы; 3 – нагрузка; 4 – обрабатываемый материал

Размер секции двумерно-периодической замедляющей системы в направлении оси  $z$  определяется шириной обрабатываемого материала  $\ell$  и равен  $\ell = N_z \cdot L_z$ , где  $N_z$  – число периодов замедляющей системы вдоль оси  $z$ . Размер секции двумерно-периодической системы между двумя электрическими стенками определяется числом периодов замедляющей системы  $N_x$  в направлении оси  $x$  и равен  $N_x \cdot L_x$ . Количество периодов пространства взаимодействия  $N_x$  в направлении оси  $x$  определяется дисперсионными свойствами используемой системы [3].

Основой конструкции устройства СВЧ-нагрева является модуль. На рис.2,а представлен модуль для термообработки относительно тонких диэлектрических материалов, в котором распределение температуры по толщине материала  $d$

можно не учитывать, а по ширине – задается условиями технологического процесса. Модуль образован двумя одинаковыми по конструкции и параметрам секциями устройства СВЧ-нагрева, которые расположены одна над другой, а энергия электромагнитного поля распространяется во взаимно противоположных направлениях.

Верхняя секция расположена над обрабатываемым материалом и смещена относительно нижней секции на половину периода пространства взаимодействия в поперечном направлении, вдоль оси  $x$ , как это показано на рис. 2,б.



**Рис. 2.** Модуль устройства СВЧ-нагрева тонких материалов (а) и со смещением верхней секции (б): 1 – секция двумерно-периодической замедляющей системы; 2 – переходное согласующее устройство; 3 – источник СВЧ-энергии; 4 – согласованная нагрузка; 5 – диэлектрический материал; 6 – фильтр; 7 – трубка с водой; 8 – индуктивная диафрагма; 9 – двойные связи

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.

Каждую секцию устройства СВЧ-нагрева с обрабатываемым материалом можно с физической точки зрения представить эквивалентной моделью в виде нагруженной длинной линии [1, 2, 4].

Экспериментальным путем установлено [2, 4], что величина поглощенной мощности материалом с малыми диэлектрическими потерями в направлении распространения энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот, прямо пропорциональна величине постоянной затухания амплитуды напряженности электрического поля в материале:

$$\alpha(z) = \alpha_k - (\alpha_k - \alpha_n) \cdot \frac{P_{ex} - P(z)}{P_{ex}}, \quad (1)$$

где  $P_{ex}$  – выходная мощность источника СВЧ-энергии;  $\alpha_n$  – постоянная затухания амплитуды напряженности электрического поля в материале при начальной температуре



материала  $T_n$ ;  $\alpha_k$  – постоянная затухания амплитуды напряженности электрического поля в материале при конечной температуре материала  $T_k$ .

Постоянные затухания амплитуды напряженности электрического поля в материале определяются в виде:

$$\alpha_n = \frac{k^2 \cdot L_z \cdot \varepsilon_n''}{2 \cdot \varphi_z} \quad (2)$$

$$\alpha_k = \frac{k^2 \cdot L_z \cdot \varepsilon_k''}{2 \cdot \varphi_z} \quad (3)$$

где  $\varepsilon_n''$  и  $\varepsilon_k''$  – значения мнимой части относительной диэлектрической проницаемости материала при начальной и конечной температуре;  $k$  – волновое число свободного пространства:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4)$$

где  $\lambda$  – длина волны источника СВЧ-энергии.

Распределение температуры в материале от нижней секции устройства СВЧ-нагрева в направлении распространения энергии электромагнитного поля  $T_1(z)$  имеет вид [2, 6]:

$$T_1(z) = T_n + \frac{2 \cdot \alpha_k \cdot F_1^2(z, T) \cdot \tau}{N_x \cdot L_x \cdot d \cdot c_d \cdot \rho_d} \cdot P_{\text{вх}} \cdot e^{-2 \cdot \alpha_n \cdot z} \quad (5)$$

Распределение температуры в материале от модуля устройства СВЧ-нагрева  $T_2(z)$  имеет вид [2, 6]:

$$T_2(z) = T_1(z) + \frac{2 \cdot \alpha_k \cdot F_2^2(z, T) \cdot \tau}{N_x \cdot L_x \cdot d \cdot c_d \cdot \rho_d} \cdot P_{\text{вх}} \cdot e^{-2 \cdot \alpha_n \cdot (\ell - z)} \quad (6)$$

где  $c_d$  – теплоемкость материала;  $\rho_d$  – плотность материала;  $d$  – толщина материала;  $\tau$  – время прохождения материалом модуля устройства СВЧ-нагрева.

Значения функций, учитывающих зависимость диэлектрических параметров материала от температуры и координаты, имеют вид [2, 6]:

$$F_1(z, T) = \frac{\alpha_n}{\alpha_k - (\alpha_k - \alpha_n) \cdot e^{-2 \cdot \alpha_n \cdot z}} \quad (7)$$

$$F_2(z, T) = \frac{\alpha_n}{\alpha_k - (\alpha_k - \alpha_n) \cdot e^{-2 \cdot \alpha_n \cdot (\ell - z)}} \quad (8)$$

Выражения (5) и (6) не учитывают омические потери в двумерно-периодической системе и коэффициент отражения при согласовании источника СВЧ-энергии и двумерно-периодической замедляющей системы с обрабатываемым материалом. При выводе уравнений (5) и (6) предполагалось, что практически вся выходная мощность источника СВЧ-энергии поглощается обрабатываемым материалом на длине секции двумерно-периодической замедляющей системы  $\ell$ .

Секция двумерно-периодической замедляющей системы и материал характеризуются следующими параметрами:

– рабочая частота колебаний электромагнитного поля, МГц	2450
– коэффициент стоячей волны в полосе частот 100 МГц, не более	1,45
– коэффициент стоячей волны на рабочей частоте	1,17
– период замедляющей системы вдоль оси “z”, мм	36
– ширина материала $\ell$ , мм	400
– ширина секции в поперечном направлении $N_x \cdot L_x$ , мм	200

– продольный фазовый сдвиг на рабочей частоте $\varphi_z$	$0,2\pi$
– температура материала $T_k$ , °C	60
– значение фактора потерь, $\varepsilon''$	0,02
– теплоемкость материала $c_d$ , Дж/(г·°C)	1,2
– плотность материала $\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	1,3
– толщина материала $d$ , мм	3,0

На рис. 3 показаны экспериментальные и рассчитанные характеристики распределения температуры эбонита в модуле устройства СВЧ-нагрева в относительных единицах. Отклонение температуры в материале от номинального значения температуры не превышает 7%, а расхождение рассчитанных и измеренных характеристик распределения температуры в материале не превышает 5%.

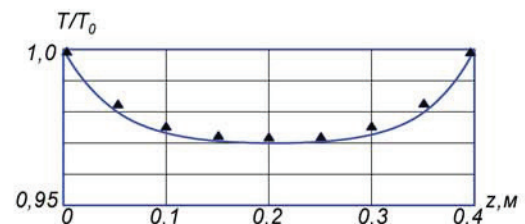


Рис. 3. Рассчитанные и экспериментальные характеристики распределения температуры в эбоните для модуля устройства СВЧ-нагрева

Для снижения уровня излучения на входе и выходе обрабатываемого материала используются специальные конструкции фильтров, препятствующие выходу микроволнового излучения из работающей установки. Конструкция этих фильтров, показанная на рис. 2,б, защищена патентом РФ [5] и состоит из ребристой структуры, между ребрами которой расположены трубки, выполненные из радиопрозрачного материала и заполненные водой для поглощения возможного излучения из микроволновой установки. Экспериментальными исследованиями установлено, что уровень побочных излучений от микроволновой установки, благодаря принятым мерам, не превышал 10 мкВт/см<sup>2</sup>, что ниже допустимых пределов для излучения из установок такого рода.

### Литература

1. Нефедов В.Н. Сверхвысокочастотные устройства для термообработки диэлектрических материалов больших площадей (обзор) // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, вып. 2, 1998. – С. 32-35.
2. Нефедов В.Н. Термообработка диэлектрических материалов с использованием многоступенчатых замедляющих систем // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, вып. 1, 1999. – С. 33-37.
3. Мясников В.Е. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ, 1969. – Вып.3. – С. 51.
4. Шахбазов С.Ю., Назаров И.В., Нефедов В.Н., Черкасов А.С. 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. – С. 51-55.
5. Патент РФ № 2060600 от 2.11.1993 на изобретение «СВЧ-печь конвейерного типа (варианты)». Авторы: Нефедов В.Н., Валеев Г.Г., Корнеев С.В., Карпенко Ю.В // Оpubл. 20.05.1996. Бюл.№ 5.
6. Мамонтов А.В., Нефедов В.Н., Назаров И.В., Потапова Т.А. Микроволновые технологии // (Монография), ГНУ НИИ ПМТ МИЭМ (ТУ), 2008. – 326 с.

## Microwave devices of heat treatment of sheet materials with small dielectric losses

**Mamontov A.V.**, *Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Higher School of Economics (MIEM HSE), professor, a.mamontov@hse.ru*

**Nefedov V.N.**, *Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Higher School of Economics (MIEM HSE), professor, 6034348@mail.ru*

**Simonov V.P.**, *Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Higher School of Economics (MIEM HSE), professor, vsimonov@hse.ru*

### Abstract

Theoretical and experimental research results in the field of high-performance microwave technologies of sheet materials' with small dielectric losses thermal treatment are presented. To increase the electric field decay constant amplitude in the material with small dielectric losses sections of two-dimensional periodic slow-wave systems are used as heating elements. The microwave construction is based on a module, which consists of two identical in design and parameters microwave heating sections, positioned one above the other, and the electromagnetic field energy propagates along these sections in opposite directions. Processed material is positioned between two sections. Each heating section consists of the two-dimensional periodic slow-wave system, which on the one hand conditions with the microwave energy source, and on the other hand conditions with the water load, in which there is a sensor of passing power for the control of technological process. The long line with given boundary conditions was used as a model of microwave devices with the processed material. Special design of filters that impede microwave radiation from a working setup were used to reduce the level of a side radiation at the input and output of the processed material. Divergence of theoretical and experimental temperature distribution characteristics in the sheet material (ebonite) with small dielectric losses does not exceed 4%, and the temperature deviation in the material from the nominal temperature value does not exceed 7%. To materials with low dielectric losses in particular, relate: polystyrene, polypropylene and polyethylene with different fillings, for example, in the form of 10% carbon black or other dyes, plexiglass, ebonite and other plastics. Heat treatment of such materials by gas or by other known methods does not lead to the whole volume uniformity of heating due to the low plastics' heat conductivity and in subsequent operations, such as pressing or stamping, cracking or other unwanted defects arise.

**Keywords:** *microwave device, temperature distribution, dielectric material, slow-wave structure.*

### References

1. Nefedov V.N. Microwave devices for thermal processing of dielectric materials of large areas (review) / *Electronic Engineering*. Ser. 1. Microwave equipment, vol. 2, 1998. pp. 32-35.
2. Nefedov V.N. Heat treatment of dielectric materials using multi-storey delay systems / *Electronic Equipment Nye*. Ser. 1. Microwave equipment, vol. 1, 1999. pp. 33-37.
3. Myasnikov V.E. / *Electronic Engineering*. Ser. 1. Microwave Electronics, 1969. Vol.3. P. 51.
4. Shakhbazov S.Y., Nazarov I.V., Nefedov V.N., Cherkasov A.S. Methods of selecting the electrodynamic systems of microwave devices such as traveling wave heat treatment of materials / *Proceedings of VIII Inter-University Research School of young professionals, "end-of-centered energy flows in space technology, electronics, ecology and medicine"*, Moscow State University. pp. 51-55.
5. RF patent number 2,060,600 on 02/11/1993 for the invention of "microwave oven conveyor type (options)." Authors: Nefedov V.N., Valeev G.G., Korneev S.V., Karpenko Y.V. / *Publ.* 20.05.1996. Byul. No 5.
6. Mamontov A.V., Nefedov V.N., Nazarov I.V., Potapova T.A. *Microwave technology* / (Monograph), GNU NII PMT MIEM (TU), 2008. 326 p.