

**МИКРОВОЛНОВЫЙ МЕТОД СОЗДАНИЯ РАВНОМЕРНОГО
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ОБЪЕМНЫХ
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ**

В. Н. НЕФЕДОВ, А. В. МАМОНТОВ, М. В. НЕФЕДОВ, И. М. САВЧЕНКО

Московский государственный институт электроники и математики
(технический университет), Москва, Россия, e-mail: lmis@miem.ru

Рассмотрены вопросы создания равномерного распределения температуры в объемном материале, находящемся в СВЧ-устройстве лучевого типа. Представлены результаты экспериментальных исследований распределения температуры в зависимости от типа антенны, обеспечивающей перпендикулярное или параллельное направление силовых линий вектора напряженности электрического поля относительно поверхности материала. Показано, что разброс температуры составляет не более 5 °C при нагреве материала до 80 °C.

Ключевые слова: СВЧ-устройство лучевого типа, распределение температуры, объемный диэлектрический материал, излучающая антенна.

Questions of the even temperature distribution creation in the volumetric materials with different dielectric losses placed in the beam-type microwave device are examined. The volumetric material was irradiated by two types of antennas which provided perpendicular and parallel flux direction of the electric-field vector relatively to the material's surface. Experimental data on the temperature field distribution in the volume of material is presented. It is shown that the total temperature dispersion is less than 5 °C inside the material heated up to 80 °C.

Key words: beam-type microwave device, temperature distribution, volumetric dielectric material, radiating antenna.

Формирование равномерного распределения температуры при нагреве объемного диэлектрического материала – одна из самых актуальных задач при создании технологического процесса с использованием СВЧ-энергии. Анализ применения различных конструкций СВЧ-уст-

роЙств с целью реализации равномерного нагрева показал, что наиболее перспективными являются устройства лучевого типа. Самый распространенный вид электродинамической системы – прямоугольная камера размерами порядка нескольких длин волн λ источника СВЧ-энергии. На ее стенках в определенном порядке расположены СВЧ-излучатели, которые должны обеспечивать заданное распределение температуры в обрабатываемом диэлектрическом материале. Эти излучатели, как правило, представляют собой раскрывы волноводов прямоугольного сечения, работающих на основном типе волны H_{10} . Места расположения излучающих антенн определяются геометрическими размерами рабочей камеры, а также размерами и физическими свойствами диэлектрика.

Структура электромагнитного поля, формируемая электродинамической системой, может претерпевать значительные изменения при нахождении в ней материала с диэлектрическими потерями. Степень искажения структуры электромагнитного поля зависит не только от вносимых диэлектрических потерь и места расположения материала в камере, но и от других факторов, влияние которых при предварительных расчетах учесть достаточно трудно. В большинстве случаев выбор конструкции СВЧ-устройства лучевого типа для термообработки конкретного материала с известными диэлектрическими параметрами выбирают в ходе предварительных экспериментов [1].

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований процесса нагрева объемного однородного диэлектрического материала с применением одного СВЧ-источника с выводом энергии из раскрыва прямоугольного волновода, работающего на волне типа H_{10} и размещенного на верхней стенке прямоугольной камеры (рис. 1, а). В этом случае вектор напряженности $\mathbf{E}$ электрического поля параллелен поверхности обрабатываемого материала.

Нагревали многослойный однородный диэлектрический материал толщиной 300 мм, состоящий из 30 идентичных слоев сухой древесины (сосна 9 % влажности), СВЧ-полем с частотой колебаний 2450 МГц. Ширина и длина слоя древесины были одинаковы и составляли 200 мм. Материал располагали в камере на расстоянии 240 мм от источника СВЧ-энергии до верхнего слоя древесины, его температуру измеряли по оси излучающего волновода в центре каждого слоя. С целью исключения влияния отраженной от металлических поверхностей мощности стенки камеры были покрыты поглощающим материалом. При измерениях использовали термометр с ценой деления 1°C. На рис. 2 (кри-

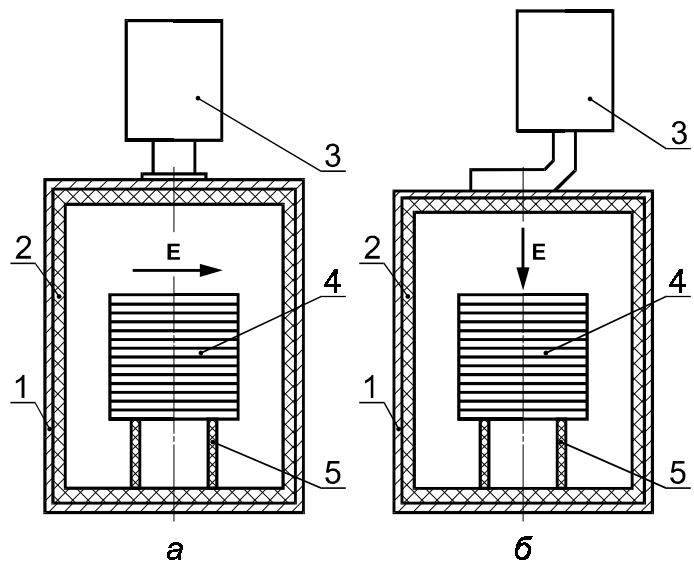


Рис. 1. СВЧ-установка для нагрева объемного диэлектрического материала:
 1 – камера нагрева; 2 – поглощающий материал; 3 – источник энергии;
 4 – обрабатываемый материал; 5 – подставка из радиопрозрачного материала

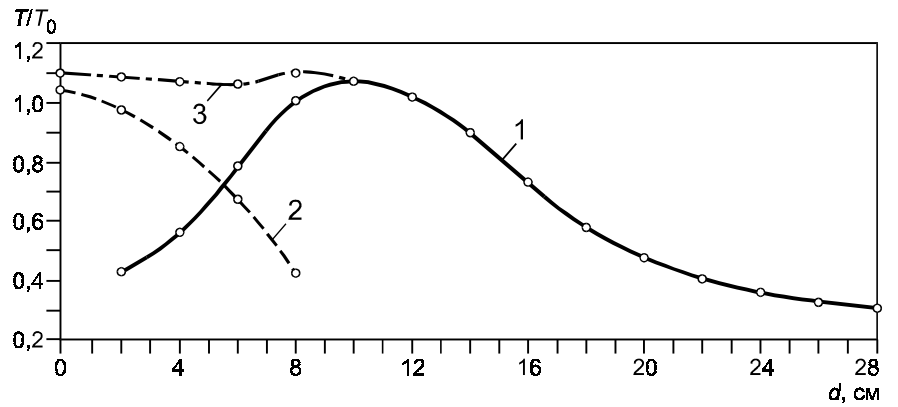


Рис. 2. Распределение температурного поля в материале по слоям:
 1 – из раскрыва прямоугольного волновода; 2 – от антенны в виде капли из
 середины широкой стенки волновода; 3 – суммарное распределение за счет
 суперпозиции от двух типов антенн

вая 1) представлена экспериментальная зависимость распределения температуры по толщине исследуемого материала, полученная на СВЧ-установке, показанной на рис. 1, а.

Экспериментально установили, что максимальное распределение температуры наблюдается не на поверхности, а в глубине материала. Зависимость распределения температуры по толщине диэлектрика имеет двоякий характер: ее подъем до максимального значения описывается параболой, а спад температуры в направлении распределения СВЧ-энергии – экспоненциальной зависимостью вида

$$T(z) \approx T(z_0) \exp\left(-\frac{2\pi\epsilon''}{\lambda\sqrt{\epsilon'}}z\right),$$

где z – направление распространения СВЧ-энергии; $T(z_0)$ – максимальное значение температуры, которое соответствует координате z_0 согласно экспериментальным данным; ϵ' , ϵ'' – действительная и комплексная части относительной диэлектрической проницаемости материала.

В отечественных и зарубежных научных публикациях это явление получило название «эффект яйца», а в работах, посвященных нагреву объемных биологических тканей, – «эффект белых (горячих) пятен». В медицине данное явление широко используют, когда необходимо локально нагреть биологическую ткань в заданной области, не повреждая окружающие ткани.

Однако в многообразных технологических процессах, как правило, необходимо осуществлять равномерный нагрев диэлектриков по всему объему. Такие процессы связаны с реализацией реакций гидратации, полимеризации, процессов вспучивания и обеззараживания материалов.

В [2] рассмотрена «составная диэлектрическая модель», в которой силовые линии напряженности $\mathbf{E}$ электрического поля перпендикулярны поверхности диэлектрического материала (см. рис. 1, б). Тогда зависимость распределения температуры в материале описывается параболой с максимумом на поверхности материала и минимумом в его глубине. Здесь значение напряженности электрического поля в диэлектрическом материале имеет вид

$$E = E_0 / \sqrt{(\epsilon')^2 + (\epsilon'')^2},$$

где E_0 – напряженность электрического поля в вакууме.

По результатам этих исследований в [3] предложена конструкция СВЧ-устройства для нагрева поверхности асфальтобетонного покрытия. Излучающая антенна выполнена в виде щели специальной каплевидной формы, прорезанной в середине широкой стенки волновода прямоугольного сечения, работающего на основном типе колебаний H_{10} . В этом случае вектор напряженности $\mathbf{E}$ электрического поля направлен перпендикулярно поверхности диэлектрика. На рис. 2 (кривая 2) показана зависимость распределения температуры от излучающей антенны в виде щели каплевидной формы.

На основании анализа данных экспериментальных исследований был создан метод практической реализации равномерного распределения температуры по объему материала. Он основан на суперпозиции взаимодополняющих распределений температуры в материале при условии, что объемный материал облучается с использованием антенн обоих типов. Принцип суперпозиции заключается в следующем:

вектор напряженности электрического поля направлен параллельно поверхности материала и при этом создается максимум температуры в центре объема материала;

вектор напряженности электрического поля направлен перпендикулярно поверхности обрабатываемого материала и при этом создается максимум температуры на поверхности материала.

С учетом справедливости принципа суперпозиции распределения температуры в материале можно реализовать равномерное распределение температуры в объемных материалах с диэлектрическими потерями (рис. 2, кривая 3). Заметна высокая равномерность распределения температурного поля по объему материала, отклонение температуры при нагреве до 80 °С составило не более 5 °С.

Отметим, что, варьируя время работы источников СВЧ-энергии с разными поляризациями вектора напряженности электрического поля по отношению к поверхности обрабатываемого материала, можно получать заданное распределение температуры в материалах с различными диэлектрическими потерями.

Представленные результаты исследования могут быть использованы при термообработке объемных диэлектрических материалов в различных технологических процессах, где требуется получить заданное распределение температуры внутри обрабатываемого материала.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Мамонтов А. В. и др.** Метод расчета СВЧ-установок лучевого типа // Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине: Труды V Межвуз. науч. школы молодых специалистов. М.: МГУ, 2004 г. С. 33 – 37.
2. **Окресс Э.** СВЧ-энергетика. М.: Мир, 1971. Т. 2.
3. **Карпенко Ю. В., Нефедов В. Н.** Машины для СВЧ-разогрева асфальтобетонных покрытий // Автомобильные дороги. 1997. Вып. 1. С. 15 – 17.

Дата принятия 07.10.2010 г.



В ТЕРРИТОРИАЛЬНЫХ ОТДЕЛАХ ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» ВЫ МОЖЕТЕ ПРИОБРЕСТИ

ОТМЕНЕННЫЕ И ЗАМЕНЕННЫЕ НАЦИОНАЛЬНЫЕ СТАНДАРТЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Указатель (по состоянию на 1 июля 2009 г.)

Указатель подготовлен на основе информационных ресурсов Федерального информационного фонда технических регламентов и стандартов, в составе которого находятся около 22 500 действующих в Российской Федерации национальных стандартов.

В Указателе представлены сведения: об отмененных национальных стандартах; о замененных национальных стандартах; о стандартах, применение которых на территории Российской Федерации прекращено.

В сведения о замененных и отмененных национальных стандартах включены следующие данные: обозначение и наименование национального стандарта на русском языке; дата отмены (замены) национального стандарта; информация о национальном стандарте, действующем вместо замененного стандарта.

Указатель издан в одном томе.

Цена 2420 руб. (включая НДС 10%)