



САРАТОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю. А.

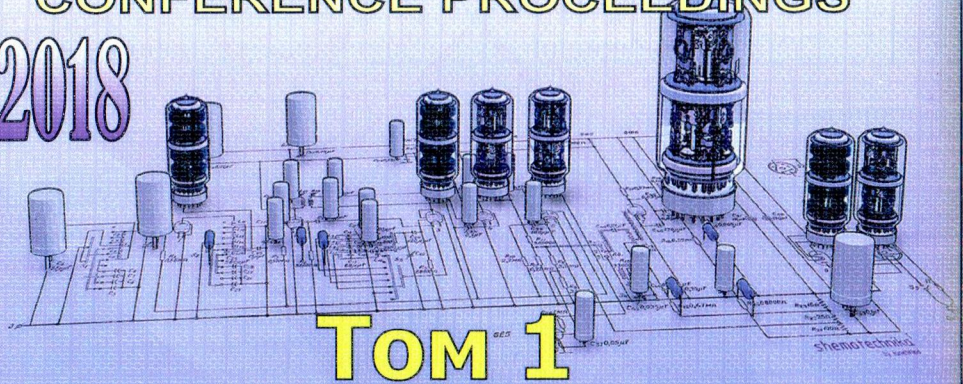


Международная
научно-техническая конференция
«Актуальные проблемы
электронного приборостроения»

Материалы конференции

CONFERENCE PROCEEDINGS

2018



Том 1

2018 INTERNATIONAL CONFERENCE ON
ACTUAL PROBLEMS OF ELECTRON DEVICES ENGINEERING
(APEDE'2018)

September, 27-28, 2018, Saratov



ROHDE & SCHWARZ

27-28 сентября 2018 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.



**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
АПЭП-2018**

МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

ТОМ 1

27-28 сентября 2018 г.

Саратов 2018

УДК 621.385: 621.372: 621.382: 621.317: 621.793: 537.533

В докладах научно-технической конференции нашли отражение результаты теоретических и экспериментальных исследований в области электродинамики и микроволновой техники, микроволновой электроники, наноэлектроники, силовой электроники, полупроводниковой электроники, электроэнергетики, систем измерительной и медицинской техники.

Излагаются результаты исследования резонаторных и замедляющих систем, устройств СВЧ, приборов вакуумной, плазменной и микроэлектроники, технологические вопросы изготовления изделий электронной техники.

Сборник состоит из двух томов и включает три раздела: микроволновая электроника, вакуумная микроэлектроника и наноэлектроника; электродинамика и микроволновая техника; технологии производства электронных приборов, силовая электроника, прикладные аспекты электронного приборостроения.

Для специалистов в области электронной техники, электродинамики и микроволновой техники, энергетики СВЧ, контрольно-измерительной и медицинской техники, а также преподавателей, студентов, магистрантов и аспирантов радиофизических, электронных и энергетических специальностей.

Редакционная коллегия:

д.т.н., проф., зав. каф. ЭПУ СГТУ имени Гагарина Ю.А. Захаров А.А. (отв. редактор); д.т.н., проф. каф. ЭПУ СГТУ имени Гагарина Ю.А. Царев В.А.; д.т.н., проф. каф. ЭПИ СГТУ имени Гагарина Ю.А. Артюхов И.И.; д.т.н., проф. каф. ЭПУ СГТУ имени Гагарина Ю.А. Мирошниченко А.Ю. (зам. отв. редактора, секретарь).

Part Number: CFP18521-PRT
ISBN: 978-1-5386-4332-7

Copyright and Reprint Permission: Abstracting is permitted with credit to the source. Libraries are permitted to photocopy beyond the limit of U.S. copyright law for private use of patrons those articles in this volume that carry a code at the bottom of the first page, provided the per-copy fee indicated in the code is paid through Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923. For reprint or republication permission, email to IEEE Copyrights Manager at pubs-permissions@ieee.org. All rights reserved.

V.N. Nefedov, S.A. Makhmudov

National Research University «Higher School of Economics», Moscow,

e-mail: 6034348@mail.ru

MODELING OF MICROWAVE HEAT TREATMENT OF MATERIALS IN DEVICES OF THE RADIAL TYPE

A model and method for calculating the temperature distribution of a wide range of materials in a microwave beam-type unit taking into account the reflective walls of the chamber is supposed. The experimental and modeling characteristics of the temperature distribution over the thickness of a homogeneous dielectric material at different distances from the walls of the chamber at a frequency of 2450 MHz electromagnetic field oscillations are presented.

В.Н. Нефедов, С.А. Махмудов

Национальный исследовательский университет

«Высшая школа экономики», г. Москва, e-mail: 6034348@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ПРОЦЕССА ТЕРМООБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ В УСТРОЙСТВАХ ЛУЧЕВОГО ТИПА

Создание равномерного распределения температуры по объёму обрабатываемых диэлектрических материалов является актуальной задачей в различных отраслях промышленности. Исследование отечественных и зарубежных патентных источников информации, а также научных публикаций позволяет сделать вывод о том, что использование микроволнового излучения в качестве источника тепловой энергии позволяет добиться высокого коэффициента полезного действия технологических процессов термообработки материалов и реализовать равномерное распределение температуры по объёму обрабатываемого материала, так как энергия микроволнового излучения мгновенно проникает в объём материала независимо от его теплопроводности. Микроволновое излучение не нагревает окружающий воздух и металлические части производственного оборудования, а также является экологически чистым методом нагрева. В многочисленных зарубежных и отечественных научных публикациях показано, что технические характеристики получаемых изделий зависят от распределения температуры по объёму обрабатываемого материала, темпа нагрева и времени поддержания заданной температуры в материале [1-2].

Для равномерного нагрева материалов различных поперечных сечений используются микроволновые установки лучевого типа [3-4]. В настоящее время в промышленности для термообработки различных

диэлектрических материалов нашли применение источники микроволновой энергии на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц, мощностью 0,8 кВт с воздушным охлаждением. Эти источники имеют волноводный вывод энергии поперечным сечением (72×34) мм. Раскрыв прямоугольного волновода используется в качестве излучающей антенны.

Для успешного проектирования микроволновых установок лучевого типа необходимо предварительно проводить моделирование технологических процессов нагрева обрабатываемых материалов.

Предположим, что для облучения диэлектрического материала используется один источник микроволновой энергии, как это схематически показано на рис. 1. Будем полагать, что стенки металлической рабочей камеры не покрыты поглощающим материалом, и следовательно, часть микроволновой мощности, прошедшей через материал, отразится от противоположной металлической поверхности и снова будет облучать обрабатываемый материал.

На рис. 1 показана модель микроволновой установки лучевого типа для проведения экспериментальных исследований распределения температуры в материале при изменении расстояния обрабатываемого материала от отражающей стенки камеры, которая расположена напротив источника микроволновой энергии.

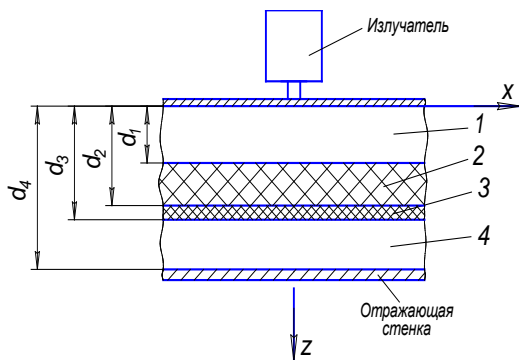


Рис. 1. Модель микроволновой установки лучевого типа для исследования экспериментальных характеристик распределения температуры по толщине материала: 1 - область воздушного пространства; 2 - обрабатываемый материал; 3 - подставка из материала с малыми диэлектрическими потерями; 4 - область воздушного пространства

Экспериментальные исследования распределения температуры были проведены для материала с влажностью 7% для различных расстояний от отражающей стенки камеры. На рис. 2 представлены экспериментальные

характеристики распределения температуры по толщине материала при различных расстояниях материала от отражающей стенки камеры (100 мм; 50 мм).

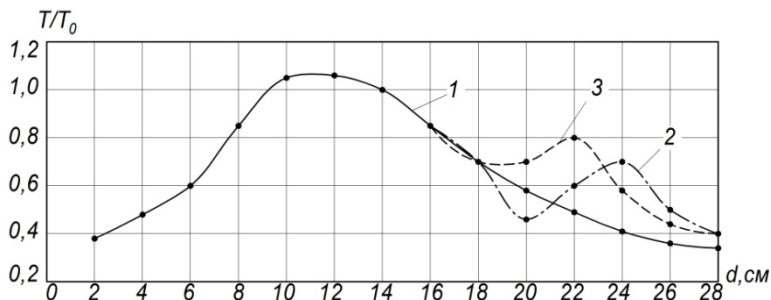


Рис. 2. Экспериментальные характеристики распределения температуры по толщине однородного материала при различных расстояниях материала от отражающей стенки камеры: 1 – 150 мм (отражающая стенка покрыта поглощающим материалом); 2 – 100 мм; 3 – 50 мм

Кривая 1 соответствует расстоянию от обрабатываемого материала до стенки камеры 150 мм. При этом металлическая стенка камеры была покрыта поглощающим материалом. Толщина материала набиралась из 28 листов сосны, каждый лист имел толщину 10 мм, влажность 7%.

Видно, что максимальная температура наблюдается внутри материала и спадает к его краям. Измерение температуры проводилось по оси излучающего волновода. Площадь листа материала соответствовала 100 мм × 100 мм.

Кривые 2 и 3 соответствуют расстоянию обрабатываемого материала от нижней отражающей металлической стенки камеры 100 мм и 50 мм. При этом поглощающий материал отсутствовал.

Для расчета характеристик распределения температуры по толщине обрабатываемого материала можно использовать наиболее простую модель, которая включает систему взаимосвязанных уравнений Максвелла и уравнений теплопроводности с граничными условиями.

При анализе микроволновой установки лучевого типа предполагают, что на обрабатываемый материал падает плоская электромагнитная волна.

Модель микроволновой установки включает источник микроволновой энергии с раскрытием прямоугольного волновода в качестве излучающей антенны (излучатель), воздушное пространство между обрабатываемым материалом и излучателем, обрабатываемый диэлектрический материал, подставку из материала с малыми диэлектрическими потерями, воздушное пространство и отражающую металлическую стенку.

Излучение из раскрыва прямоугольного волновода рассчитано с использованием метода Гюйгенса – Кирхгофа [5]. Этот метод основан на предположениях о том, что поле в раскрыве волновода остается невозмущенным, отсутствуют токи, затаекающие на наружную поверхность волновода, и отсутствует отраженная обратно внутрь волновода волна.

В каждом слое диэлектрика можно рассчитать мощность, которая выделяется в объеме обрабатываемого однородного материала. Зная распределение мощности тепловых потерь по объему обрабатываемого материала, можно рассчитать распределение температуры в материале.

Для расчета распределения температуры в нагреваемом объекте используем метод конечных элементов. Расчеты учитывали влияние отражающих стенок камеры и выполнены в программе Ansoft HFSS.

Исходные данные для расчета распределения температуры в обрабатываемом материале: толщина материала составляла 280 мм; мощность источника микроволнового излучения 800 Вт; частота колебаний электромагнитного поля 2450 МГц; начальная температура материала +20°C; конечная температура нагрева материала +80°C; 50% мощности источника попадает на поперечное сечение материала, которое составляло $10 \text{ см} \times 10 \text{ см} = 100 \text{ см}^2$, плотность микроволнового излучения составляла величину 3 Вт/см^2 ; удельная теплоемкость сосны при 7%-ной влажности составляла $1700 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$; теплопроводность для сосны 7%-ной влажности составляла $0,4 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$; плотность сосны при 7%-ной влажности составляла 450 кг/м^3 ; диэлектрические параметры сосны: $\epsilon'' = 0,4$; $\epsilon' = 2,9$.

На рис. 3 показаны рассчитанные зависимости распределения температуры по толщине материала при расстоянии материала от задней отражающей стенки камеры 100 мм.

На рис. 4 показаны рассчитанные зависимости распределения температуры по толщине материала при расстоянии материала от задней отражающей стенки камеры 50 мм.

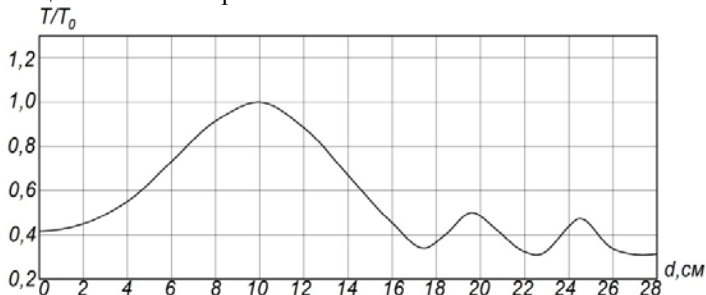


Рис. 3. Рассчитанная зависимость распределения температуры по толщине материала (сосна 7%-ной влажности) при расстоянии материала от задней отражающей стенки камеры 100 мм

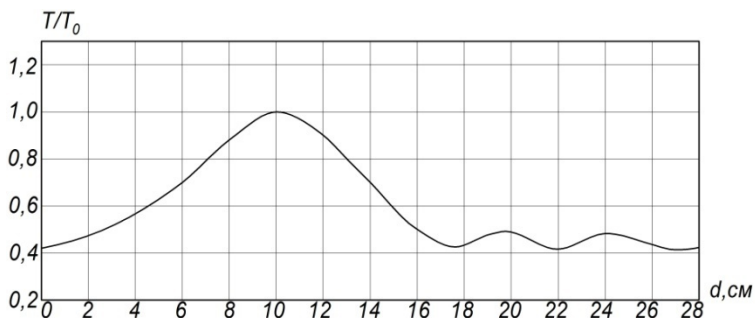


Рис. 4. Рассчитанная зависимость распределения температуры по толщине материала (сосна 7%-ной влажности) при расстоянии материала от задней отражающей стенки камеры 50 мм

Представлены экспериментальные и полученные путем моделирования характеристики распределения температуры по толщине однородного диэлектрического материала при различных расстояниях материала от стенок камеры на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц.

Публикация подготовлена в результате проведения исследования (№ проекта 18-01-0024) в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)» в 2018 - 2020 гг. и в рамках государственной поддержки ведущих университетов Российской Федерации «5-100».

Библиографический список

1. Низкоинтенсивные СВЧ-технологии / под ред. Г.А. Морозова, Ю.Е. Седельникова. М.: Радиотехника, 2003. 112 с.
2. Мамонтов А.В. Измерение распределения температуры поля в объеме диэлектрического материала, обрабатываемого в СВЧ резонаторной камере / А.В. Мамонтов, М.В. Нефедов, Е.В. Никишин // Метрология. 2009. № 1. С. 22-27.
3. Microwave Method of Curing of Concrete / A. V. Mamontov, V. N. Nefedov, V. P. Simonov, A. A. Chechetkin // T-Comm: Telecommunications and transport. 2016. Vol. 10. No. 8. P. 79-82.
4. Микроволновые технологии: монография / А.В. Мамонтов, В.Н. Нефедов, И.В. Назаров, Т.А. Потапова. М.: Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий Московского института электроники и математики (технического университета), 2008. 326 с.
5. Фрадин А.З. Антенно-фидерные устройства / А.З. Фрадин. М.: Связь, 1977. 440 с.

Научное издание

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
АПЭП-2018**

МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

ТОМ 1

Редактор О.А. Панина
Компьютерная веретка
Н.А. Акафьева
Дизайн Р.Ю. Кузнецов

Подписано в печать 03.09.2018 Формат 60x84 1/16
Бум. тип. Усл. печ. л. 30,45 (32,75) Уч.-изд. л. 31,0
Тираж 120 экз. Заказ № 1205-18/06098.

Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А.
410054 г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Отпечатано в ООО «Амирит»
410003, г. Саратов, ул. Чернышевского, 88