

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАТИКИ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.372.2

Кижлай
Игорь Николаевич

**ПИРАМИДАЛЬНО-ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ
КАМЕРЫ ДЛЯ СВЧ-ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ.
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ, РАСЧЕТ И
ЭКСПЕРИМЕНТ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.03 – Радиофизика

Минск 2011

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель **Кураев Александр Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Антенны и устройства СВЧ» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты **Гринчик Николай Николаевич**, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отделения теплофизики Государственного научного учреждения «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова» НАН Беларуси;

Карпович Виктор Аркадьевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией радиофизических исследований Научно-исследовательского учреждения «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета

Оппонирующая организация Белорусский государственный университет

Защита состоится 6 октября 2011 г. в 16.00 на заседании совета по защите диссертаций Д02.15.05 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп.1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Перспективным направлением интенсификации процессов сушки разнообразных материалов является использование энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот (СВЧ). Благодаря проникновению СВЧ-энергии непосредственно внутрь обрабатываемого материала с большим успехом может быть использована в различных отраслях народного хозяйства следующая закономерность установленная А.В. Лыковым для процесса сушки – «диффузионное движение влаги происходит навстречу направлению градиента температуры в высушиваемом материале». Значительный градиент давления пара внутри материала резко интенсифицирует процесс сушки за счет включения механизма фильтрации влаги и пара через поры из внутренних областей материала на его поверхность к границе, где традиционные конвективные процессы сушки более эффективны.

Быстрый разогрев в СВЧ-поле используется для дезинсекции почвы, стерилизации порошковых пищевых и сырьевых фармацевтических материалов, размягчения остатков мазута в цистернах и т.д. Известны основные полезные особенности СВЧ-нагрева: высокая степень поглощения энергии во влажных материалах и соответственно высокая скорость роста температуры, бесконтактный избирательный нагрев неоднородных материалов (по мере высушивания определенных участков нагрев в них автоматически уменьшается), большой КПД, отсутствие инерции в подводе мощности и простота автоматизации процесса. Названные преимущества предопределяют необходимость создания промышленных установок для СВЧ-обработки и сушки материалов.

Следует отметить, что в настоящее время для практических целей выпускаются источники СВЧ на двух разрешенных частотах: $f = 2,451$ ГГц ($\lambda = 12.25$ см) и $f = 0,915$ ГГц ($\lambda = 32$ см). Поэтому наибольший интерес для промышленного использования представляют СВЧ-камеры с размером L , значительно превосходящим рабочую длину волны λ , в которых реализуется многомодовый режим возбуждения электромагнитного поля СВЧ. Проблема конструирования таких установок состоит в том, что сложная форма многомодовых камер и расположение обрабатываемого материала в них не позволяют найти аналитическое выражение для распределения ВЧ-полей внутри нагреваемого материала. Использование же приближенных подходов при конструировании приводит к тому, что ряд предлагаемых установок не приносят желаемых результатов.

В результате настоящего исследования разработаны математические модели, программы расчета и оптимизации электродинамических процессов в пирамидальной камере с диэлектрической нагрузкой; исследовано влияние

диэлектрической нагрузки в нагревательной камере пирамидального типа на процессы возбуждения высших мод с целью выбора конфигурации, обеспечивающей оптимальный температурный режим и защиту от паразитного излучения. Полученные результаты позволяют корректировать конструкцию нагревательных камер и выполнять расчеты тепловых процессов при различных режимах работы СВЧ-установок, обработки и сушки диэлектрических материалов в изученных типах камер.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

ГКПНИ № 20065304 «Тепловые процессы» ГБЦ 06-3052: «Разработка эффективных модулей для СВЧ-нагрева и сушки на основе моделирования и оптимизации электромагнитных и тепломассообменных процессов в технологических установках», срок выполнения с 01 марта 2006 г. по 31 декабря 2010 г.

Договор 10-1226Б «Расчет одноячеечного сверхпроводящего ниобиевого резонатора для ускорителя электронов и позитронов», заказчик Научно-исследовательское учреждение «Национальный научно-учебный центр физики частиц и высоких энергий» БГУ, г. Минск, срок выполнения с 04 января 2010 г. по 31 декабря 2010 г.

Цель и задачи исследования

Целью работы является развитие электродинамической теории камер пирамидально-прямоугольного типа для СВЧ-обработки листовых и сыпучих материалов. Анализ электромагнитных процессов в таких камерах и экспериментальное исследование двух видов пирамидально-прямоугольных камер.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать на основе общих уравнений возбуждения нерегулярных волноводов с прямоугольным сечением математическую модель пирамидально-прямоугольной СВЧ-камеры.
2. На основе разработанной модели провести численный анализ электромагнитных процессов в камерах с линейным и косинусоидальным раскрывом рупорной части. Установить оптимальные параметры камер с точки зрения равномерности распределения электромагнитного поля в рабочей зоне.

3. Провести с использованием конечно-разностных методов в среде FEMLAB анализ влияния электрофизических параметров обрабатываемых материалов на эффективность работы выбранных на основе предыдущего анализа вариантов конструкций камер.

4. Выяснить возможность стабилизации распределений электромагнитного поля в рабочей зоне камер за счет использования решетчатых фильтров мод.

5. Разработать и изготовить экспериментальные макеты камер с линейным и косинусоидальным раскрытиями рупорной части камеры.

6. Провести экспериментальное исследование двух видов камер с использованием и без использования верхнего и нижнего фильтров типов мод, сравнить полученные данные с выводами развитой теории и выработать рекомендации по расчету, конструированию и применению СВЧ-камер пирамидально-прямоугольного типа.

Объектом исследования являются процессы формирования электромагнитного поля, теплообмена и сушки материалов в пирамидально-прямоугольной камере (ППК). **Предмет исследования** в соответствии с целью и задачами работы включает в себя математическое моделирование электромагнитных, тепло- и массообменных процессов в ППК, анализ этих процессов и оптимизацию параметров ППК, экспериментальное исследование оптимальных ППК.

Положения, выносимые на защиту

1. Электродинамическая модель пирамидально-прямоугольной камеры с произвольно варьируемым профилем рупорной части.

2. Разработанные конструкции камер с линейным и косинусоидальным раскрытиями рупорной части.

3. Электромагнитные процессы в камере рассматриваемого типа имеют многомодовый характер, но оптимизация параметров камеры включая геометрические, позволяет стабилизировать основной тип колебаний в виде стоячей H_{10} волны, обеспечивающей однородность поля в одном из направлений в рабочей области.

4. Эффективность работы камеры сохраняется в широком диапазоне изменения электрофизических параметров нагрузки: $\epsilon = 2 \dots 40$, $\sigma = 0,1 \dots 10$.

5. Фильтры мод позволяют существенно улучшить стабилизацию основного (рабочего) типа колебаний в камере, причем наибольшая роль в этом принадлежит нижнему (под нагрузкой) фильтру.

Личный вклад соискателя

Все теоретические и экспериментальные результаты, включенные в диссертацию, получены лично соискателем.

Соавторам по публикациям принадлежат: А.А. Кураеву и А.К. Сеницыну – общая постановка задач и обсуждение полученных теоретических и экспериментальных результатов, А.В. Щербакову – выполнение численных расчетов на ПЭВМ.

Апробация результатов диссертации

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и республиканских конференциях 8 конференциях: International Vacuum Electronics Conference, Monterey, USA, 25-27 April 2006 г, Monterey, USA 18-20 May 2010 г., на 16 -й, 19-й международных крымских конференциях «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2006, КрыМиКо 2009), Севастополь, Украина, 11-15 сентября 2006г., 14-19 сентября 2009г., 42-й, 43-й, 44-й научных конференциях аспирантов, магистрантов и студентов «Радиотехника и электроника», Минск, Беларусь, 17-21 апреля 2006г., 9-14 апреля 2007 г., 21-26 апреля 2008 г., Международной научно-технической конференции, посвященной 45-летию МРТИ-БГУИР, Минск, Беларусь, 19 марта 2009 г.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты работы содержатся в 9 опубликованных научных работах, из них 4 статьи общим объемом 1,6 авторских листа в рецензируемых научных журналах и 5 – в сборниках материалов конференций и тезисов докладов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, семи глав, заключения и библиографического списка. В первой главе описаны современные методы СВЧ-обработки материалов и показана перспективность использования для этих целей пирамидально-прямоугольных камер. Во второй главе развита общая теория пирамидальных камер. В третьей главе проведен расчет и оптимизация

рупора с линейным раскрывом. Четвертая глава посвящена расчету и анализу ППК с косинусоидальным раскрывом рупора. В пятой главе проведено моделирование процесса сушки в ППК. Шестая глава описывает экспериментальное исследование ППК с линейным раскрывом рупора. В седьмой главе приводятся результаты экспериментального исследования ППК с косинусоидальным раскрывом рупора. Общий объем диссертации составляет 84 страницы. Она включает 71 страницу основного текста, 36 рисунков на 30 страницах, 2 таблицы на 2 страницах, список использованных источников из 113 наименований на 9 страницах, список собственных публикаций автора из 9 наименований на 1 странице.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* приведены краткие сведения касающиеся применения СВЧ-излучения для обработки различных материалов, а также – основные вопросы решенные в диссертации.

В *первой главе* проведен анализ современного состояния использования СВЧ-энергии в различных отраслях народного хозяйства. Показана перспективность использования СВЧ-энергии для обработки различных материалов, в частности, для сушки, разогрева, модификации структуры материала, получения сверхчистой плазмы и т. р. Проведено сравнение эффективности различных методов сушки. Показаны преимущества использования СВЧ-энергии для сушки материалов по сравнению с остальными методами, применяемыми в производстве. Также приведена классификация устройств для обработки материалов СВЧ-энергией на основе различия способов подвода энергии к обрабатываемому материалу. Выделены: резонансные камеры, волноводные и излучающие системы. Проведен анализ всех обозначенных систем обработки материалов. Показана перспективность использования антенно-резонаторных систем на примере ППК для обработки листовых и сыпучих материалов. Анализ применяемых методик расчета широко используемых рупорных антенн показывает, что существуют лишь качественные методы, позволяющие с достаточной точностью рассчитать распределение поля в ближней зоне и только для рупора с малыми углами раскрыва ($\approx 10^\circ$). Использование рупоров с малыми углами раскрыва в установках СВЧ-нагрева неприемлемо из-за значительных габаритов. Увеличение же угла раскрыва рупора с линейным профилем приводит к возбуждению высших мод в ближней зоне и нарушению однородности поля. В связи с этим возникает необходимость в разработке теории, расчета и оптимизации ППК для различных областей их практического применения.

Во *второй главе* развита общая теория пирамидальной камеры, основанная на уравнениях возбуждения произвольно-нерегулярных волноводов с прямоугольным сечением. Для решения поставленной задачи использован метод преобразования координат, позволяющий свести граничную задачу к задаче для регулярного волновода. При таком преобразовании внутренняя граничная поверхность волновода в преобразованной системе координат имеет регулярный характер, что позволяет получить систему уравнений возбуждения динамических полей нерегулярного волновода с прямоугольным сечением. В обобщенном виде эта система имеет вид:

$$\frac{d\vec{u}}{dz} - G(z)\vec{u} = 0$$

$$\vec{u} = \{u^1, \dots, u^{2M}\} = \{\dot{A}_1, \dot{B}_1, \dot{A}_2, \dot{B}_2, \dots, \dot{A}_m, \dot{B}_m, \dots, \dot{A}_M, \dot{B}_M\}, \quad m = 1 \dots M,$$

где $\dot{A}_i, \dot{B}_i = \dot{A}_{mn}^e, \dot{B}_{mn}^e$ или $\dot{A}_{kl}^m, \dot{B}_{kl}^m$ – безразмерные амплитуды соответственно *EH* и *HE*-волн;

$G(z)$ – комплексная матрица размером $2M \times 2M$, элементы которой определяются конфигурацией нерегулярной части волновода.

Выведена целевая функция оптимизации профиля рупора, которая определялась как минимум дисперсии функции $E_y^2(x, y)$ и максимум ее среднего значения в заданном сечении $z = L$

$$M_{E^2} = \frac{1}{N} \sum_{ij} E_y^2(x_i, y_j); \quad F_c = \alpha_1 \frac{1}{N} \sum_{ij} (E_y^2(x_i, y_j) - M_{E^2})^2 - \alpha_2 M_{E^2}.$$

где: M_{E^2} – среднее значение от E_y^2 ,

$$\frac{1}{N} \sum_{ij} (E_y^2(x_i, y_j) - M_{E^2})^2 - \text{дисперсия,}$$

α_1, α_2 – весовые коэффициенты в целевой функции.

Развитые в главе электродинамические модели, методы анализа и оптимизации пирамидальных СВЧ-камер с произвольным профилем рупорной части позволяют осуществлять как электродинамический расчет камеры, так и проводить оптимизацию ее параметров, включая профиль рупора, с целью обеспечения условия равномерности тепловой обработки материалов, а также согласования камеры с питающим ее магнетроном в широком диапазоне изменения электрофизических параметров обрабатываемых материалов.

В *третьей главе* проведен расчет и оптимизация рупора с линейным раскрытием. В расчете использовалась самосогласованная математическая модель камеры с учетом поглощающей диэлектрической вставки.

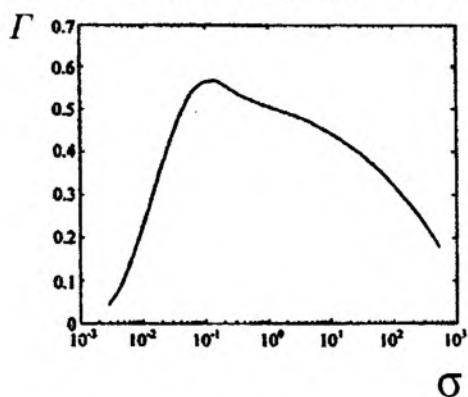


Рисунок 1 – Зависимость поглощения от проводимости материала

зависимость поглощения в диэлектрике с $\epsilon' = 20$ от величины σ ($G = P_a / P_0$, где P_0 – падающая мощность, P_a – мощность тепловых потерь в диэлектрике).

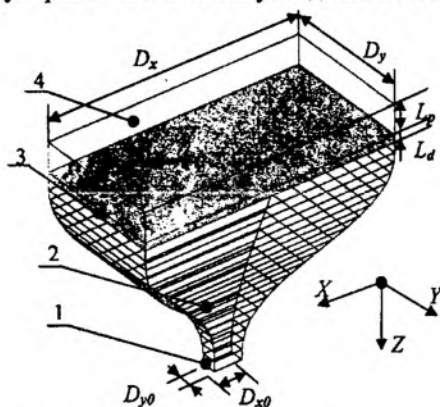
Характеристику поглощения в зависимости от проводимости диэлектрика можно разбить на две области:

- 1) $\sigma < 0,1$ – отражения от диэлектрика незначительны, на поглощение влияет положение поддона;
- 2) $\sigma > 10$ – величину поглощения определяет отражение от диэлектрика, поле за диэлектриком практически отсутствует. Запасенная энергия значительно меньше, чем в первой области. Меняется характер распределения поля на диэлектрике. Полное поглощение для данной геометрии не достигалось ни при каком значении σ .

Проведено также моделирование пирамидальной камеры с одномерным раскрытием рупора в широком диапазоне изменений электрофизических параметров диэлектрической вставки. Для каждого значения ϵ найден оптимальный диапазон значений σ , при которых нагрев обрабатываемого СВЧ-полем материала максимален. Проведен детальный анализ электромагнитных и тепловых процессов, происходящих в камере. Проведенные исследования подтверждают высокую перспективность СВЧ-камеры пирамидально-прямоугольной конструкции: в такой конструкции обеспечивается устойчивое распределение поля типа стоячей H_{10} волны в широком диапазоне изменения электрофизических параметров обрабатываемого материала. При этом в z – направлении обеспечивается равномерный разогрев. Эффективный режим

нагрева сохраняется в широком диапазоне изменения $\varepsilon - (2...40)$ и $\sigma - (0,1...10)$.

В четвертой главе проведен расчет и анализ электромагнитных процессов в ППК с косинусоидальным раскрытием рупора. Геометрическая структура рупорной части косинусоидальной СВЧ-камеры представлена на рисунке 2,



здесь: 1- вход рупора с поперечным сечением $D_{x0} \times D_{y0}$; 2- собственно рупорная часть с переменным по Z поперечным сечением; 3- прямоугольная рабочая область с размерами $D_x \times D_y \times L_d$ (в этой области располагается обрабатываемый материал - диэлектрический слой с потерями); 4- прямоугольный поддон с размерами $D_x \times D_y \times L_p$, нагружающий вместе с нагрузкой 3 согласующий рупор 2.

Рисунок 2 – Геометрическая структура рупорной части СВЧ-камеры с косинусоидальным раскрытием.

Методом конечных треугольных элементов рассчитано распределение поля в рупоре.

Расчет производился на ПЭВМ в пакете FEMLAB с помощью уравнения:

$$\nabla \times (\mu_a^{-1} \nabla \times \dot{\vec{E}}) - k_0^2 (\varepsilon' - j\varepsilon'') \dot{\vec{E}} = 0; \quad \dot{\vec{B}} = \frac{j}{\omega} (\nabla \times \dot{\vec{E}})$$

где: $\varepsilon' = \varepsilon'_a / \varepsilon_0$; $\varepsilon'' = \varepsilon''_a / \varepsilon_0$;

$k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} = \omega / c$ – волновое число в свободном пространстве,

$\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon''$ – относительная комплексная диэлектрическая проницаемость.

Граничные условия задавались исходя из условия на поверхности идеального проводника: $\vec{n} \times \dot{\vec{E}} = 0$. Для исследования прохождения волны в раскрытие рупора, излучающего в свободное пространство, ставилось условие малого отражения в виде:

$$\mu^{1/2} \vec{n} \times \dot{\vec{H}} + \varepsilon_a^{1/2} \vec{n} \times (\dot{\vec{E}} \times \vec{n}) = 0.$$

также использовано условие импедансной нагрузки:

$$\mu^{1/2} \vec{n} \times \dot{\vec{H}} + (\varepsilon'_a - \varepsilon''_a)^{1/2} \vec{n} \times (\dot{\vec{E}} \times \vec{n}) = 0.$$

Результаты моделирования рупора с $L=0,52$ м и прямоугольным регулярным удлинением (поддон) длиной 0,1 м таковы:

Вариант 1 (рупор, излучающий в свободное пространство). На границе $z = 0,62$ м поставлено условие малого отражения, что соответствует ненагруженному рупору. На рисунке 3 представлено распределение величины проходящей мощности в виде полутонов. Распределение симметрично как по x так и по y .

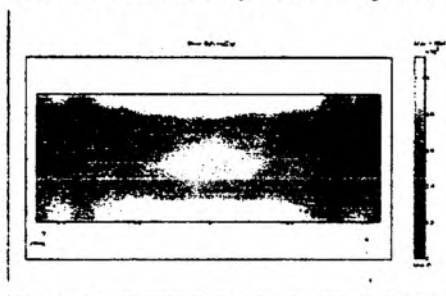


Рисунок 3 – Распределение проходящей мощности через поперечное сечение при $z = 0.526$ м

Из рисунка видно, что равномерность поля в направлении \bar{y}_0 реализуется в полосе $10 \leq y \leq 30$ см. В направлении \bar{x}_0 реализуется характерный для H_{10} -волны закон $\sin^2(x)$. Также видно, что вследствие возбуждения высших мод интенсивность СВЧ-поля на краях вдвое превосходит интенсивность в средней области.

Вариант 2 (рупор нагружен на поглощающий диэлектрик с $\sigma = 0,1$, который заполняет всю область

$z > L_v$). Рисунок 4 представляет рассчитанное распределение $E^2(x, y)$ на поверхности диэлектрика. Из рисунка видно, что вследствие имеющегося отражения от границы диэлектрика возбуждаемые высшие моды перераспределяются. Поле имеет более равномерное распределение по y , однако вдоль по x появляются вариации. Таким образом обеспечение равномерного прогрева возможно только в конвейерном варианте конструкции технологической установки.

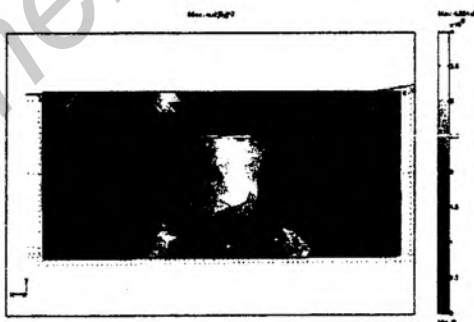


Рисунок 4 – Распределение поля на поверхности диэлектрика.

В пятой главе, исходя из предположения равномерности распределения поля в E -плоскости и его синусоидальности в H -плоскости, моделируется нестационарный процесс высушивания материала в рупорной камере. Используется двумерная самосогласованная модель сушки влажного материала. Для решения нестационарной системы дифференциальных уравнений используется чисто

неявная схема на основе эффективного метода блочно-матричной прогонки решения двумерных эллиптических уравнений. Для описания динамики сушки используется система уравнений двухфазного переноса (жидкость и пар) в капиллярно-пористом теле, сформулированная в работах Н.Н. Гринчика с соавторами

На рисунке 5 представлена геометрия рассматриваемой задачи. Влагосодержащий материал движется со скоростью v_x над поддоном рупорной камеры в H -плоскости. В раскрыве рупора близкая к плоской СВЧ-волна падает

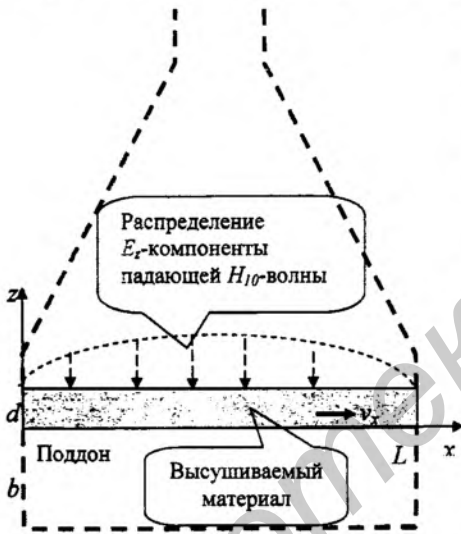


Рисунок 5 – Геометрия модели СВЧ обработки материалов в рупорной камере

на диэлектрический поглощающий материал толщиной d . Часть ее мощности отражается от границы материала, часть поглощается в нем; оставшаяся часть, отразившись от поддона, проходит материал в обратном направлении. В результате имеет место резонансный механизм взаимодействия поля в СВЧ-камере, причем распределение E^2 -компоненты в поперечном сечении (а следовательно, и источников тепловыделения) существенно зависит как от комплексной диэлектрической проницаемости, которая меняется в процессе сушки, так и от глубины поддона. Здесь не рассматривается возможность возбуждения высших мод в рупоре.

В таком приближении задача о нахождении распределения E_x -компоненты в сечении поглощающего материала имеет вид

$$\frac{d^2 \dot{E}}{dy^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \dot{\epsilon}(y) \dot{E} = 0; \quad \frac{d\dot{E}}{dy} + jW\dot{E} \Big|_{y=2d} = 2jWE_0; \quad \dot{E} \Big|_{y=-b} = 0,$$

где $W = \omega/\omega_0$, ω – рабочая частота, ω_0 – частота выбранная при переходе к безразмерным величинам, c – скорость света, $E_0 = E^0 \sin(\pi x / L_x)$ – амплитуда падающей волны, которая зависит от места падения волны x , L_x – ширина раскрыва рупора, b – глубина поддона, $\dot{\epsilon} = 1$ для $y > d$, $y < 0$, $\dot{\epsilon} = \epsilon'(x, y) + j\epsilon''(x, y)$ для $0 < y < d$.

На рисунке 6 представлен пример моделирования для неподвижного материала в камере. Рисунок 6,а представляет распределение температуры C° вдоль среднего сечения слоя в моменты времени $t_i = i \times t_{max} / 10$ при $t_{max} = 23$ минуты (кривые $i = 1..11$).

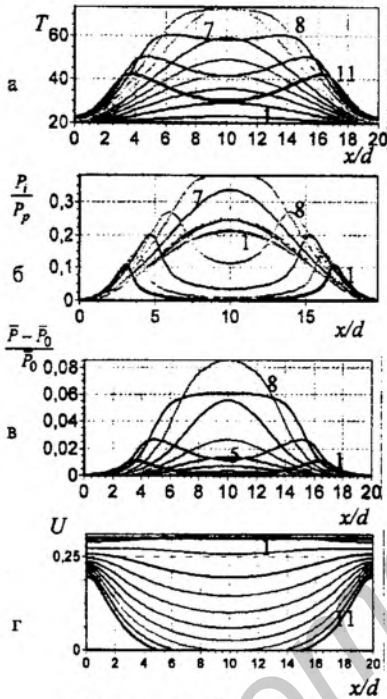


Рисунок 6 – Расчетные характеристики варианта с неподвижным материалом

Ввиду относительно небольшой толщины слоя поперечное изменение всех параметров изменяется в пределах 10 %. Основное влаговыделение происходит через верхнюю и нижнюю его поверхности.

Шестая глава посвящена экспериментальным исследованиям линейно-пирамидальной ГПК, а также расчету решетчатых фильтров (рисунок 7), существенно улучшающих поперечную равномерность обработки материала в рабочей области.

На рисунке 6,б представлены кривые поглощаемой мощности P_i отнесенной к падающей в этом же сечении мощности P_p в сечении x .

На рисунке 6,в изображены кривые давления \bar{P} вдоль среднего сечения (\bar{P}_0 – начальное давление) в те же моменты времени.

Процесс высушивания иллюстрирует рисунок 6,г, на котором изображено рассчитанное распределение влажности U материала в те же моменты времени вдоль среднего сечения.

В начале, пока влага распределена равномерно основное поглощение СВЧ-мощности и интенсивный рост температуры происходит в средней части слоя. По мере прогрева и уменьшения влажности в средней части слоя, начиная с момента времени $t_i > 7$, происходит спад поглощаемой мощности и снижение температуры. Максимум поглощения постепенно смещается на края слоя.

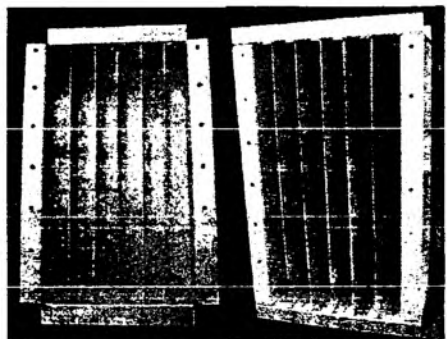


Рисунок 7 – Решетчатые фильтры

Цель расчета и оптимизация конструкции решетчатого поддона (нижнего фильтра) состоит в таком оптимальном выборе его геометрии, который обеспечит стабилизацию основной рабочей моды H_{10} в области расположения обрабатываемого диэлектрического материала и предотвращение возбуждения паразитных высших волн E_{mn} , а также H_{mn} -волн с $m \neq 1$ и $n \neq 0$.

Более сложен вопрос о выборе расстояния между ламелями. С одной стороны, число ламелей должно быть большим, что обеспечивает невозбуждение (закритичность) высших мод из-за малого расстояния между ламелями фильтра. С другой стороны большое число ламелей приводит к дополнительным потерям в металле.

Условие невозбуждения высших H_{mn} мод ($m > 1, n > 0$) в пространстве между ламелями, заполненном воздухом ($\epsilon \cong 1$)

$$\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi(n_L + 1)}{b}\right)^2 > 1,$$

выполняется для $a = 40$ см, $b = 20$ см уже при числе ламелей $n_L = 2$.

Однако, как показывает вычислительный эксперимент с использованием пакета FEMLAB, если рабочее пространство заполнено диэлектрическим материалом с $\epsilon > 3$, в рабочей области возбуждаются высшие моды.

Если предположить, что область между ламелями заполнена диэлектрическим материалом, то условие невозбуждения высших H_{mn} -мод имеет вид:

$$\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi(n_L + 1)}{b}\right)^2 > \epsilon,$$

откуда следует, что для $\epsilon = 10$ в данном случае требуется не менее девяти ламелей.

Ввиду того, что диэлектрик расположен непосредственно над ламелями, а не между ними, их достаточное количество примерно вдвое меньше, чем прогнозируемое по приведенной формуле. Моделирование в среде FEMLAB показало, что в разрабатываемой конструкции минимальное число ламелей равно пяти. Уменьшение их числа приводит к разрушению механизма селекции основных рабочих волн. При пяти ламелях возможны возбуждения лишь квази- H_{10} , H_{20} - и H_{30} -мод. Поэтому на основании перечисленных причин выбрана конструкция решетчатого поддона с пятью ламелями (ребрами).

Также приведены примеры расчетов тепловых режимов камеры для стационарного и конвейерного вариантов использования камер.

Экспериментальное исследование камеры (рисунок 8) с фильтрами проводилось при различной комбинации фильтров, при изменении числа ламелей в них или при отсутствии ламелей в одном из фильтров.

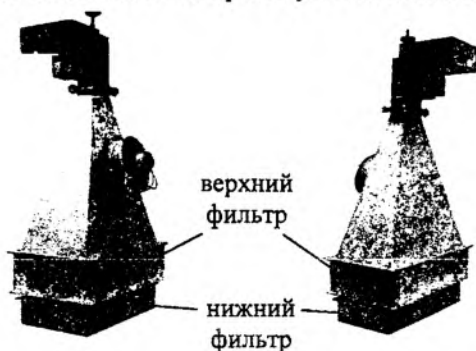


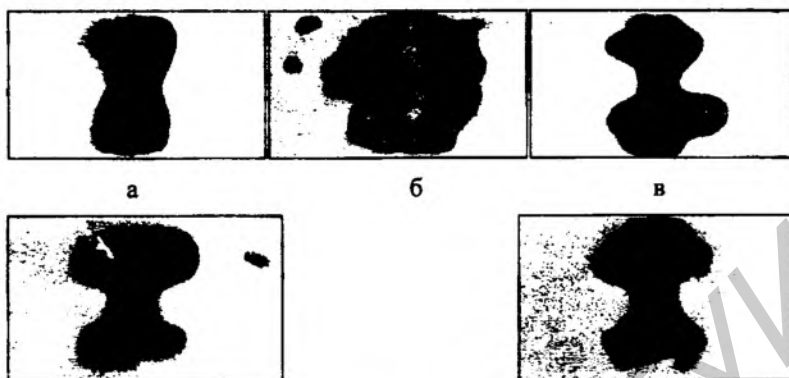
Рисунок 8 - Рупор с установленными нижним и верхним фильтрами.

Источником СВЧ-мощности служил магнетрон ОМ 75Р (Samsung) с номинальной мощностью 800 Вт. Для подстройки камеры по минимуму КСВ использовался короткозамкнутый шлейф магнетрона. Расстояние от плоскости короткого замыкания до выходного штыря магнетрона h менялось в процессе подстройки. Поскольку длина волны в питающем волноводе $\lambda_g \approx 154,6$ мм,

то при полностью согласованной нагрузке магнетрона $h \approx \lambda_g/4 = 38,65$ мм. При иных значениях шлейф компенсирует реактивную нагрузку камеры. В качестве нагреваемого материала использовался влажный песок. Равномерность влажности поддерживалась тщательным перемешиванием с последующим выдерживанием в плотно закрытой емкости. Толщина слоя песка $\Delta = 10$ мм.

Температура нагрева и ее распределение по рабочей площади на поверхности материала фиксировали с помощью термочувствительной бумаги. Области почернения бумаги соответствуют температуре выше 110 °С (рисунок 9). Проведенные исследования привели к следующим результатам:

- в широком диапазоне расстроек нижний фильтр обеспечивает полную фильтрацию паразитных мод, нагрев идет на основной моде H_{10} ;
- обеспечивается поперечная равномерность разогрева материала, что полностью решает задачу создания конвейерной СВЧ - камеры с равномерным разогревом обрабатываемого материала;
- число ламелей нижнего фильтра выбрано правильно, их уменьшение не позволяет сформировать желательную по форме и интенсивности область разогрева.



а – $h = 28$ мм, $t = 3$ мин; б – $h = 28$ мм, $t = 10$ мин (область нагрева равномерно распределяется по длине камеры); в – $h = 32,5$ мм, $t = 3$ мин; г – $h = 40,75$ мм, $t = 3$ мин; д – $h = 46,75$ мм, $t = 3$ мин
Рисунок 9 – Эволюция картины разогрева материала при перемещении КЗ шлейфа и фиксированном времени разогрева

Проведены эксперименты по объединению двух пирамидальных СВЧ-камер (рисунок 10). Исследования

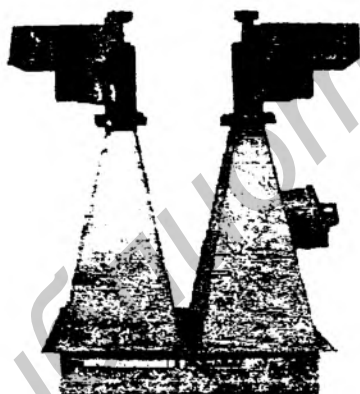


Рисунок 10 – Сдвоенный СВЧ-модуль

подтвердили, что при такой конструкции равномерность энерговыведений по ширине не хуже, чем в одном модуле. Проведенные экспериментальные исследования, пирамидально прямоугольной камеры с фильтрами

паразитных мод, подтверждают верность развитой в работе теории ППК.

В *седьмой главе* проведено экспериментальное исследование СВЧ-камеры с косинусоидальным раскрытием рупора (рисунок 11) с использованием

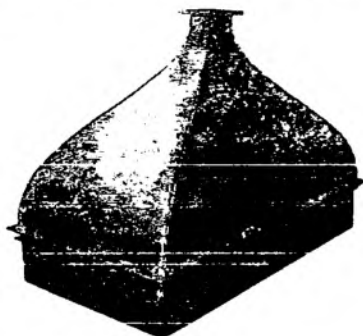


Рисунок 11 – СВЧ-камера с косинусоидальным раскрытием рупора

тепловизора Mobir M4 и программы обработки результатов Guide IrAnalyser V1.7.



Рисунок 12 – Распределение температуры на поверхности песка

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают расчетные характеристики. Распределение поля СВЧ в диэлектрике (влажный песок) отражено на рисунке 12 в виде изображения распределения температуры на поверхности, полученного с помощью тепловизора. Градиент температуры от светлого тона к серому от 38 до 28 °С. Температура в комнате 19 °С – соответствует черному фону. Этот результат показывает, что практическое применение данной камеры с учетом большой площади обработки материала может быть или нетепловым с использованием бытовых магнетронов мощностью до 1 кВт, или необходимо применение более мощного источника СВЧ-излучения или более длительного воздействия СВЧ-поля, что не

всегда может быть оправдано с экономической точки зрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации.

1. На основе общих уравнений возбуждения нерегулярных волноводов с прямоугольным сечением сформулирована математическая модель пирамидально-прямоугольной СВЧ-камеры с произвольно варьируемым профилем рупорной части [1-А, 3-А, 5-А, 6-А].

2. В рамках предложенной модели проведен численный анализ электромагнитных процессов в камерах с линейным и косинусоидальным раскрытиями рупорной части. Показано, что электромагнитные процессы в камерах рассматриваемого типа имеют многомодовый характер, но оптимизация параметров камеры позволяет стабилизировать основной тип колебаний в виде стоячей H_{10} -волны, обеспечивающей однородность поля в одном из направлений в рабочей области [2-А, 4-А].

3. С использованием конечно-разностных методов в среде FEMLAB проведен анализ влияния электрофизических параметров обрабатываемых материалов на эффективность работы выбранных на основе предыдущего анализа вариантов конструкций камер. Показано, что эффективность работы оптимизированных камер сохраняется в широком диапазоне изменения

электрофизических параметров нагрузки в пределах: $\epsilon = 2...40$, $\sigma = 0,1...10$ [2-А, 4-А].

4. Разработаны и изготовлены экспериментальные макеты СВЧ-камер с линейным и косинусоидальным раскрытиями рупорной части камеры согласно рассчитанным оптимальным параметрам [4-А].

5. Проведено экспериментальное исследование двух видов камер с использованием и без использования верхнего и нижнего фильтров типов мод. Показано, что фильтры мод позволяют существенно улучшить стабилизацию основного (рабочего) типа колебаний в камере, причем наибольшая роль в этом принадлежит нижнему (под нагрузкой) фильтру. Исследование температурных полей в материале в широком диапазоне режимов работы и электрофизических параметров материалов и соответствие этих полей результатам расчетов по самосогласованной электрофизической модели пирамидально – прямоугольных камер, сформулированной в диссертации, указывает на адекватность этой модели. Экспериментальные результаты подтверждают высокую эффективность пирамидально-прямоугольных СВЧ-камер в отношении возможности обеспечения максимальной равномерности СВЧ-разогрева материала в рабочей области [4-А, 7-А, 8-А, 9-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов.

1. Сформулированная самосогласованная (учитываются тепловые процессы и процессы влагопереноса в объеме обрабатываемого СВЧ – энергией материала) электродинамическая модель ППК может быть использована при проектировании разнообразных типов СВЧ-камер прямоугольного сечения с произвольно задаваемым профилем электродинамической системы для любого уровня мощности и для любого разрешенного частотного диапазона. Адекватность модели подтверждена результатами экспериментальных испытаний камер с двумя видами профиля электродинамической системы, спроектированных с использованием указанной модели.

2. При экспериментальных испытаниях разработанных и изготовленных двух типов ППК (с линейным и косинусоидальным раскрытием рупорной части) установлено, что последние в отличие от других типов СВЧ-камер, обладают двумя важнейшими для применений качествами: они обеспечивают как максимальную равномерность разогрева материалов, так авторегулировку процесса сушки. Поэтому такого типа СВЧ-камеры (в том числе два указанных типа) могут быть рекомендованы для эффективного применения в циклических и конвейерных установках СВЧ-обработки материалов, в разнообразных энергосберегающих технологических установках в машиностроении,

деревообработке, в процессе сушки и обработки зерна и семян в сельском хозяйстве, дезинсекции сельхозпродукции, а также почвенных материалов, при упрочнении и спекании твердых материалов, дезинсекции исходного сырья в фармакологии и модификации структуры материала и т.д.

3. ППК могут использоваться в качестве модулей в многомодульных (сдвоенных, счетверенных и т.д.) секционированных установках СВЧ-обработки материалов. При этом мощность установки увеличивается пропорционально числу модулей. Важность такого подхода заключается в том, что магнетронный генератор большой мощности (5...50 кВт) по стоимости (от \$ 20000) в тысячи раз превосходит дешевый магнетрон для микроволновых печей (от \$20), имеющих выходную мощность 1,2 кВт. В многомодульной СВЧ-установке малая мощность единичного модуля становится несущественной.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1–А. Электродинамический расчет пирамидально-прямоугольной камеры для СВЧ-обработки сыпучих и листовых материалов / И.Н. Кижлай, А.А. Кураев, А.К. Синицын, А.В. Щербаков // Успехи современной радиоэлектроники – 2007. – №10. – С. 70-74

2–А. Кижлай, И.Н. Моделирование процессов СВЧ-нагрева материалов с различными электрофизическими характеристиками в пирамидальной камере / И.Н. Кижлай, А.К. Синицын, А.В. Щербаков // Доклады БГУИР – 2008. – № 4 (34). – С. 54–59

3–А. Расчет пирамидальной СВЧ-камеры с линейным раскрывом рупора / Кижлай И.Н., Кураев А.А., Синицын А.К., Щербаков А.В. // Доклады БГУИР.—2008. – № 6 (36). – С. 123-126

4–А. Кижлай, И.Н. Экспериментальное исследование линейно-пирамидальной камеры для СВЧ-нагрева и расчет тепловых режимов / И.Н. Кижлай, А.К. Синицын // Доклады БГУИР – 2011. – № 2 (56). – С. 78–85

Тезисы докладов

5–А. The Composite Pyramidal-Rectangular Resonator for Microwave Dryer/ I.N. Kizhlai, A.A. Kurayev, A.K. Sinitsyn, A.V. Sherbakov // IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC/IVESC` 2006), Monterey, USA, 25–27 April 2006. – P. 391–392

6–А. Тепловой модуль СВЧ пирамидальной конструкции / И.Н. Кижлай, А.А. Кураев, А. К. Синицын, А. В. Щербаков // Материалы 16 международной

крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо 2006, Севастополь, Крым, Украина, 11-16 сентября 2006. – С. 853–854.

7–А. Кижлай, И.Н. Моделирование процесса СВЧ сушки материала в пирамидальной камере / И.Н. Кижлай, А.К. Синицын - Тезисы докладов международной научно-технической конференции посвященной 45-летию МРТИ-БГУИР, Минск, Беларусь, 19 марта 2009. – С. 119–120.

8–А. Кижлай, И.Н. Моделирование процесса СВЧ сушки материала в пирамидальной камере / И.Н. Кижлай, А.К. Синицын - «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо 2009, Севастополь, Крым, Украина, 14-18 сентября 2009. – С. 849–850

9–А. Kizhlay, I.N. Simulation of the MICROWAVE drying material process In the pyramidal chamber / I.N. Kizhlay, A.K. Sinitsyn // IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC/IVESC' 2010), Monterey, USA, 18-20 May 2010.– P.23.



РЭЗІЮМЭ

Кіжлай Ігар Мікалаевіч

ПІРАМІДАЛЬНА-ПРАМАВУГОЛЬНЫЯ КАМЕРЫ ЗВЧ- АПРАЦОЎКІ МАТЭРЫЯЛАЎ. ЭЛЕКТРАДЫНАМІЧНАЯ ТЭОРЫЯ, РАЗЛІК І ЭКСПЕРЫМЕНТ

Ключавыя словы: ЗВЧ - камера, рупар, дыэлектрычная пранікальнасць праводнасць матэрыялаў, магутнасць паглынання, размеркаванне поля магутнасць нагрэву, мадэляванне.

Мэта работы: развіццё электрадынамічнай тэорыі камер пірамідальна-прамавугольнага тыпу для ЗВЧ-апрацоўкі ліставых і сыпкіх матэрыялаў. Аналіз электрамагнітных працэсаў у такіх камерах. Распрацоўка і эксперыментальнае даследаванне двух відаў пірамідальна-прамавугольных камер.

Метады даследавання: матэматычнае мадэляванне электрамагнітных, цяпло - і масаабмене працэсаў у ППК, аналіз гэтых працэсаў і аптымізацыя параметраў ППК, эксперыментальнае даследаванне аптымальных ППК.

Атрыманыя вынікі і іх навізна:

1. Сфармулявана матэматычная мадэль пірамідальна-прамавугольных ЗВЧ-камер з адвольна варыруемым профілем рупарнай часткі камеры;
2. Колькасны аналіз электрамагнітных працэсаў у камерах з лінейным і косінусаідальным раскрывамі рупарнай часткі;
3. Разлік і эксперыментальнае даследаванне рашотачных фільтраў выпэйшых мод, якія спрыяюць стабілізацыі асноўнага тыпу хвалі ў камеры;
4. Матэматычныя мадэлі сушкі для стацыянарнага і дынамічнага рэжымаў апрацоўкі;
5. Праведзеныя эксперыментальныя даследаванні двух відаў рупараў падкрэсліваюць адэкватнасць сфармуляванай матэматычнай мадэлі.

Вобласць ужывання: Вынікі працы былі выкарыстаны пры выкананні ГБЦ 06-3052: «Распрацоўка эфектыўных модуляў для ЗВЧ-нагрэву і сушкі на аснове мадэлявання і аптымізацыі электрамагнітных і цепламасаабменных працэсаў у тэхналагічных устаноўках», выказана зацікаўленасць НДІ ПІ з ОП ГНУ "Інстытут металургіі" у выкарыстанні вынікаў працы пры вытворчасці вогнеахоўных матэрыялаў і вырабаў на аснове мінерала вермікуліта.

РЕЗЮМЕ

Кижлай Игорь Николаевич

ПИРАМИДАЛЬНО – ПРЯМОУГОЛЬНЫЕ КАМЕРЫ СВЧ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ, РАСЧЕТ И ЭКСПЕРИМЕНТ.

Ключевые слова: СВЧ – камера, рупор, диэлектрическая проницаемость и проводимость материалов, мощность поглощения, распределение поля и мощность нагрева, моделирование.

Цель работы: развитие электродинамической теории камер пирамидально-прямоугольного типа для СВЧ-обработки листовых и сыпучих материалов. Анализ электромагнитных процессов в таких камерах. Разработка и экспериментальное исследование двух видов пирамидально-прямоугольных камер.

Методы исследования: математическое моделирование электромагнитных, тепло- и массообменных процессов в ППК, анализ этих процессов и оптимизацию параметров ППК, экспериментальное исследование оптимальных ППК.

Полученные результаты и их новизна:

1. Сформулирована математическая модель пирамидально-прямоугольной СВЧ-камеры с произвольно варьируемым профилем рупорной части камеры.
2. Численный анализ электромагнитных процессов в камерах с линейным и косинусоидальным раскрытиями рупорной части.
3. Расчет и экспериментальное исследование решетчатых фильтров высших мод, способствующих стабилизации основного типа волны в камере.
4. Численное моделирование СВЧ-сушки для стационарного и динамического режимов обработки.
5. Проведенные экспериментальные исследования двух видов рупоров подтверждают адекватность математической модели сформулированной в диссертации.

Область применения: результаты работы были использованы при выполнении ГБЦ 06-3052: «Разработка эффективных модулей для СВЧ нагрева и сушки на основе моделирования и оптимизации электромагнитных и тепло-массообменных процессов в технологических установках», высказана заинтересованность НИИ ИП с ОП ГНУ «Институт металлургии» в использовании результатов работы при производстве огнезащитных материалов и изделий на основе минерала вермикулита.

SUMMARY

Igor N. Kizhlai

PYRAMIDAL - RECTANGULAR CHAMBER MICROWAVE TREATMENT OF MATERIALS. ELECTRODYNAMIC THEORY, CALCULATION AND EXPERIMENT.

Key words: the camera microwave, chamber, dielectric constant and conductivity of materials, power absorption, distribution field and heating power, modeling.

The aim of work: development of electrodynamic theory of pyramidal chamber stockyard for microwave processing of sheet and bulk materials. Analysis of electromagnetic processes in these cells. Design and experimental study of two types of pyramid - of rectangular chambers.

Research methods: mathematical modeling of electromagnetic, heat and mass transfer processes in the PRC, the analysis of these processes and optimization of PRC the parameters, an experimental study of optimal PRC.

The received results and their novelty:

1. Mathematical model of a pyramidal-rectangular microwave camera is formulated with a varying random profile horn of the camera.
2. Numerical analysis of electromagnetic processes in chambers with linear and cosine aperture of the horn.
3. Calculation and experimental study of lattice filters of higher modes contributing to stabilization of the main types of waves in the chamber.
4. Numerical simulation of microwave drying for stationary and dynamic treatment regimes.
5. The experimental studies of two types of chambers confirm the adequacy of the mathematical model formulated in the thesis.

Range of application: the results were used in the GBC 06-3052: "The development of effective modules for microwave heating and drying on the basis of simulation and optimization electromagnetic and heat-mass transfer in technological process", SRI IP with PP of the GNU «Metallurgy Institute» interest was expressed in using the results in the production of fireproof materials and products based on the mineral vermiculite.

Научное издание

Кижлай Игорь Николаевич

Пирамидально-прямоугольные камеры для СВЧ-обработки материалов. Электродинамическая теория, расчет и эксперимент

Специальности 01.04.03 – Радиопизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 31.08.2011.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 575.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
У0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009
220013, Минск, П. Бровки, 6