

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 621.385.6:66.040:004.94(043.3)

**АДАМОВИЧ**  
Александр Леонидович

**РАЗРАБОТКА СВЧ-УСТРОЙСТВА  
ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ СУШКИ  
КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**01.04.13 – Электрофизика, электрофизические установки  
(технические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Новополоцк 2005

Работа выполнена в Учреждении образования «Полоцкий государственный университет» и в Учреждении образования «Международный государственный экологический университет им. А.Д.Сахарова».

Научные руководители: доктор технических наук, профессор  
*Кундас С.П.* (Учреждение образования «Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова, ректор)

кандидат технических наук, доцент  
*Грозберг Ю.Г.* (Учреждение образования «Полоцкий государственный университет», заведующий кафедрой конструирования и технологии радиоэлектронных средств)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
*Кураев А.А.* (Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», заведующий кафедрой антенн и устройств сверхвысоких частот)

кандидат технических наук, доцент  
*Янушкевич В.Ф.* (УО «Полоцкий государственный университет», доцент кафедры радиоэлектроники)

Оппонирующая организация Государственное научное учреждение «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова» Национальной академии наук Беларуси

Защита состоится 25 ноября 2005 года, в 12 часов на заседании Совета по защите диссертаций К 02.19.03 в Учреждении образования «Полоцкий государственный университет» по адресу: г. Новополоцк, Блохина, 29.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 211440, Витебская обл., г. Новополоцк, ул. Блохина, 29; тел. ученого секретаря 8(0214) 531047; факс 8(0214) 530679.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения образования «Полоцкий государственный университет».

Автореферат разослан 25 октября 2005 года.

Ученый секретарь  
Совета по защите диссертаций



В.М. Константинов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Процессы термообработки диэлектрических материалов для придания им требуемых физико-технических и эксплуатационных характеристик являются достаточно энергоемкими и длительными.

На сегодняшний день наибольшее распространение из этих процессов получила сушка материалов. Из многообразия метода реализации этого процесса наиболее эффективным с точки зрения производительности, энергосбережения, экологической чистоты, качества готового продукта является сушка энергией электромагнитного поля сверхвысокой частоты (СВЧ).

Детальное изучение эффектов внутреннего и избирательного нагрева материалов при диссипации СВЧ-энергии позволит оптимизировать конструктивно-технологические параметры микроволновых технологических комплексов для сушки материалов, используемых как в промышленности, так и в сельском хозяйстве Республики Беларусь.

Однако технология СВЧ-сушки материалов, несмотря на преимущества по сравнению с традиционными методами, не получила широкого применения и по-прежнему относится к разряду наукоемких. Для реализации процессов СВЧ-сушки необходимо решить ряд актуальных задач, связанных с моделированием и синтезом специализированных технологических СВЧ-камер, обеспечивающих приемлемое распределение поля в объекте, поиском эффективных способов управления тепловыделением и изучением сложных процессов внутреннего переноса тепла и влаги в обрабатываемых материалах.

Среди научных направлений исследования процессов сушки материалов следует выделить разработки известных отечественных и зарубежных научных школ А.В. Лыкова, П.Д. Лебедева, С.П. Рудобашты, П. Перре, которым принадлежат фундаментальные достижения в этой области. Также накоплен значительный опыт в теории и технике СВЧ-сушки в работах научных школ Ю.С. Архангельского, А.А. Кураева, Н.Н. Гринчика, Г. Пюшнера. Ими впервые отмечена возможность значительной интенсификации процесса сушки путем создания эффекта объемного нагрева и значительного градиента внутреннего давления пара в материале при помощи высокочастотного поля, разработаны теоретические основы создания технологических СВЧ-камер и облучателей.

Тем не менее анализ научно-технических публикаций показывает, что процессы СВЧ-сушки мало изучены как в практическом, так и теоретическом отношении. Процесс характеризуется динамичностью, значительными напряженностями электромагнитных полей в технологической зоне, а также большим многообразием явлений внутреннего тепло- и влагопереноса, имеющих место на стадиях обработки. Все это обуславливает сложность экспериментального контроля технологических параметров. При теоретическом описании процессов разработанные математические модели не учитывают всю специфику столь сложных процессов и не могут представить полную информацию о протекающих явлениях. Аналитические решения задач электродинамики при расчете резонаторов и

облучателей (для прогнозирования распределения полей в объектах) получены для камер достаточно простой формы, и в основном без учета реального диэлектрического заполнения.

Поэтому изучение процессов, развитие и разработка энергоэффективных методов, тепломассообменных аппаратов и устройств сушки материалов энергией СВЧ-поля с привлечением методов математического моделирования является актуальной и современной задачей. Решению названных выше проблем теории и техники СВЧ-сушки и посвящена диссертационная работа.

**Связь работы с крупными научными программами и темами.** Работа выполнялась в рамках следующих заданий:

- Государственной программы ориентированных фундаментальных исследований «Материал» «Разработать физико-математические и технологические основы процессов воздействия СВЧ-энергии на аморфные, высокомолекулярные и полимерные конструкционные материалы», № ГР 20011038, 2001 – 2005 гг.;

- Государственной программы прикладных исследований «Энергоэффективная сушка и термообработка материалов (сушка)» «Разработка установки высокоскоростной СВЧ-сушки капиллярно-пористых сред», № ГР 2005710, 2005 г.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследований является разработка СВЧ-устройства для энергосберегающих процессов сушки капиллярно-пористых материалов на основе анализа закономерностей процессов электродинамики и тепловлагодпереноса в условиях СВЧ-нагрева.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель электромагнитных и тепловлагодобменных процессов при сушке капиллярно-пористых материалов СВЧ-полем в электродинамической системе «камера – материал».

2. С применением разработанной модели выявить характер и специфику протекания электродинамических и тепловлагодобменных процессов при сушке материалов СВЧ-полем для ряда практических задач непрерывного и дискретного воздействия СВЧ-поля, возбуждения бегущих и стоячих волн, сушки материалов различной толщины  $d$  ( $d \ll \lambda$ ;  $d \gg \lambda$ , где  $\lambda$  – длины волны).

3. Определить влияние конструктивных параметров облучателя, рассеивающих и управляющих элементов на распределение СВЧ-поля в технологической зоне и процессы сушки и предложить устройство сушки материалов СВЧ-полем.

4. Апробировать в условиях производства разработанную установку для СВЧ-сушки влажных капиллярно-пористых материалов.

**Объект и предмет исследования.** *Объектом исследований* являются СВЧ-устройства, реализующие процессы нагрева и сушки материалов, способы управления распределением полей. *Предмет исследований* – электрофизические процессы воздействия СВЧ-излучения на капиллярно-пористые материалы, математические модели электродинамических и теплофизических процессов, имеющих место при СВЧ-воздействии на влажные капиллярно-пористые материалы, алгоритмы и программные средства для их практической реализации.

**Методология и методы проведенного исследования.** Математические модели разработаны на основе классической теории двухфазной фильтрации, теплопроводности, термодинамики и физики поверхностных явлений, законов электродинамики.

Решение разработанных моделей реализовано на основе численных методов конечных разностей, конечных элементов, с использованием численного и сим-вольного интегрирования, дифференцирования, аппроксимации и интерполяции.

#### **Научная новизна и значимость полученных результатов:**

1. Разработана математическая модель взаимосвязанных электромагнитных и теплообменных процессов в ненасыщенных капиллярно-пористых средах в электродинамической системе «камера – материал», позволяющая с единых позиций тепломассопереноса описывать процессы сушки, десорбции и двухфазной фильтрации в присутствии СВЧ-поля.

2. Проведены исследования и установлены закономерности протекания процессов тепло- и влагопереноса при различных режимах СВЧ-сушки. В частности, показано, что при дискретном подводе СВЧ-энергии значительно снижаются градиенты температуры, пара и влагосодержания при одновременном снижении энергозатрат на 11...12 %. Значительно снижается вероятность нежелательного спонтанного роста температуры в конце цикла сушки, улучшаются электрические и тепловые условия работы источника СВЧ-энергии.

3. Впервые получены дисперсионные соотношения для тензора комплексной диэлектрической проницаемости древесины (сосна) на частоте 2.45 ГГц в диапазоне влагосодержания 0...1.5 кг/кг и температуры 0...100 °С.

4. Предложен оригинальный способ контроля за распределением напряженности электрического поля в технологических камерах СВЧ-сушки, заключающийся в измерении интенсивности свечения газового СВЧ-разряда в зондовом датчике.

5. Предложена конструкция устройства СВЧ-сушки, обеспечивающая управляемое распределение напряженности поля в технологической зоне посредством системы магнитного качания луча на основе гиромангнитных свойств феррита.

Новизна обоснованных и разработанных в диссертации научных и практических решений защищена 2 патентами Республики Беларусь.

#### **Практическая значимость полученных результатов:**

1. Выявлено влияние геометрических параметров облучателя на распределение СВЧ-поля в его раскрыве. Установлено, что более чем 2-кратное снижение коэффициента отражения возможно при использовании сглаживания в Е-плоскости с радиусами  $R_E \geq 200$  мм и  $R_E \geq 600$  мм для облучателей, работающих на частоте 2.45 ГГц и 915 МГц соответственно. Установлено, что максимально возможные углы раскрыва пирамидального облучателя, работающего на согласованную нагрузку, в Е-плоскости при равномерности поля в раскрыве не менее 80 % должны быть не более  $60^\circ$  ( $\alpha_E \leq 60^\circ$ ). В Н-плоскости обеспечивается практически синусоидальное распределение поля в раскрыве облучателя при любых углах раскрыва:  $\alpha_H \leq 120^\circ$ .

2. Установлено, что на реальных несогласованных нагрузках равномерное тепловыделение в поле пирамидального облучателя возможно при малых углах раскрыва облучателя. В частности, получено оптимальное распределение полей температуры и влагосодержания при сушке образца древесины влагосодержанием 60 % в поле Е-рупора с раскрывом  $10^\circ$ .

3. Предложена система магнитного качания луча на основе гиромангнитного эффекта феррита для управления процессом тепловыделения в материале в направлении Н-плоскости облучателя.

4. Показана возможность использования параболического облучателя для выравнивания СВЧ-поля на поверхности материала в направлении Н-плоскости.

5. Разработан и опробован на ОАО «Полоцк-Стекловолокно» экспериментальный образец устройства СВЧ-сушки нитей стекловолокна в поле сверхразмерного пирамидального облучателя, обеспечивающего равномерный прогрев и качественную сушку материала при незначительных потерях мощности на отражение (менее 5...20 %).

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс Учреждения образования «Полоцкий государственный университет» в лекционных курсах и лабораторном практикуме по дисциплинам: «Материалы и компоненты электронной техники», «Электродинамика и распространение радиоволн», «Технология обработки металлов и древесины».

#### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель взаимосвязанных электромагнитных и теплооблагодобменных процессов в ненасыщенных капиллярно-пористых средах в электродинамической системе «камера – материал».

2. Пирамидальный лучевой облучатель с углами раскрыва в Е-плоскости не более  $60^\circ$  и радиусом сглаживающего перехода питающего волновода в рупор  $R_E \geq 200$  мм для  $f = 2.45$  ГГц и  $R_E \geq 600$  мм для  $f = 915$  МГц обеспечивает 80 %-ную равномерность поля на согласованной нагрузке и более чем 2-кратное снижение коэффициента отражения.

3. При дискретном подводе СВЧ-энергии значительно снижаются градиенты температуры, пара и влагосодержания при одновременном снижении энергозатрат на 11–12%. Значительно снижается вероятность локального перегрева материала в конце цикла сушки.

4. Металлический рассеиватель поля, ферритовая система магнитного качания луча и параболический облучатель обеспечивают управление распределением и выравнивание СВЧ-поля в Н-плоскости облучателя, повышение однородности сушки.

**Личный вклад соискателя.** Соискателем лично предложена физическая модель процессов тепло- и влагообмена в капиллярно-пористых материалах во взаимосвязи с уравнениями электродинамики, получены замыкающие соотношения для математической модели СВЧ-термообработки влажного модельного материала, проведены эксперименты по верификации разработанной модели, проведены экспериментальные измерения и получены полуэмпирические дисперсионные соотношения.

онные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости влажного материала от влажности и температуры, получены частные решения для прикладных задач, имеющих место в технологии СВЧ-термообработки влажных материалов, произведена оптимизация конструкции камеры-облучателя на согласованной и реальной нагрузках, проанализировано влияние рассеивающих элементов на распределение СВЧ-поля в технологической камере. Вклад соавторов отражен в совместных публикациях.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на 6 международных научно-технических форумах и конференциях:

- МНТК «Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов», Могилев, 25 – 26 октября, 2001 г.;
- МНТК «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении», Минск, 10 – 14 сентября, 2001 г.;
- на 5-м Международном форуме по тепло- и массообмену «ММФ-2004», Минск, 24 – 28 мая, 2004 г.;
- МНТК «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств» «РЭС-2004», Новополоцк, 26 – 28 мая 2004 г.;
- 5-й и 6-й Международных летних школах-семинарах «Современные информационные технологии», Браслав, 29 июня – 6 июля, 2002 г. и 30 июня – 7 июля, 2003 г.

Автор отмечен Почетной грамотой Белорусского общества изобретателей и рационализаторов как лауреат конкурса 2005 года среди молодых изобретателей.

**Опубликованность результатов.** Основные результаты работы содержатся в 13 опубликованных научных трудах. Из них 6 статей в научных журналах, 4 статьи в сборниках трудов и материалах конференций, 1 тезисы докладов, 2 патента на полезную модель. В совместно опубликованных научных работах автору диссертации принадлежит 80 с.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа содержит введение, общую характеристику работы, пять глав, заключение и список использованных источников. Работа включает 66 иллюстраций, 1 таблицу, библиографию из 163 наименований; общий объем – 140 с., в том числе 90 с. основного текста.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении и общей характеристике работы** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость, основные положения диссертации, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен анализ состояния проблемы с постановкой задач исследований. Показано, что при СВЧ-нагреве влажных пористых материалов происходят сложные процессы взаимосвязанного тепловлагопереноса и электродинамики, характер которых зависит от большого числа факторов.

Изучение процессов, имеющих место в СВЧ-облучателях и капиллярно-пористых материалах при СВЧ-нагреве, сопряжено с рядом трудностей, связанных прежде всего со сложностью либо невозможностью детальных экспериментальных исследований этих процессов. Это определяет актуальность применения методов математического моделирования при комплексном изучении процессов и проектировании устройств СВЧ-сушки.

Анализ научно-технических публикаций, посвященных рассматриваемой области, показывает, что разработанные до настоящего времени математические модели не смогли учесть всю специфику процесса, и как следствие, представить полную информацию о протекающих явлениях: в них или уделялось недостаточно внимания моделированию распространения СВЧ-волн в средах при полном подходе к описанию тепло- и массообменных процессов, или, наоборот, подробно формулировалась электродинамическая задача, а процессам тепловлагопереноса в пористых системах уделялось мало внимания.

Отмечаются преимущества применения сверхразмерных лучевых облучателей в технологии СВЧ-сушки по сравнению с прямоугольными или круглыми резонаторами, состоящие в повышении равномерности распределения электромагнитных полей без использования нескольких источников СВЧ-энергии. Аналитические решения задач электродинамики при расчете резонаторов и облучателей получены для камер достаточно простой формы и в основном без учета реального диэлектрического заполнения. Указанные недостатки не позволяют с требуемой степенью точности прогнозировать процессы и явления, протекающие при СВЧ-сушке, обоснованно выбирать оптимальные режимы технологических процессов, методы управления распределением полей, создавать с учетом требований оптимизации необходимое технологическое оснащение.

**Вторая глава** посвящена постановке и формулировке физической задачи исследований и разработке математической модели процессов воздействия СВЧ-поля на влажные капиллярно-пористые материалы, а также особенностям реализации численного решения разработанной модели.

Рассматривался физический процесс воздействия электромагнитного поля сверхвысокой частоты на влажный модельный материал в электродинамической системе «камера – материал». Формулировка физико-математической модели взаимосвязанных процессов СВЧ-электродинамики и тепловлагопереноса происходящих в капиллярно-пористом материале в общем случае осуществлялась на основе:

а) электродинамического однородного уравнения Гельмгольца:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) - (\varepsilon' - j\varepsilon'') \varepsilon_0 \mu_0 (2\pi f)^2 \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

где  $\mathbf{E}$  – вектор напряженности СВЧ-поля;  $\varepsilon'$  и  $\varepsilon''$  – элементы комплексной диэлектрической проницаемости материала;  $f$  – частота поля;  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  – диэлектрическая и магнитная постоянные соответственно;

б) теории многофазной фильтрации с учетом фазовых превращений «вода – пар» с использованием модифицированных уравнений движения воды и пара в пористом скелете:

$$\rho_0 \frac{\partial u_l}{\partial t} = \nabla \rho_l \frac{kk_l}{\mu_l} \nabla \left( P_v - \left( u \frac{\partial P_c}{\partial u} + T \frac{\partial P_c}{\partial T} \right) \right) + I; \quad (2)$$

$$-\frac{\rho_0 P_v M_v}{\rho_l R T} \frac{\partial u}{\partial t} + \left( \phi \frac{M_v}{R T} - \frac{\rho_0 u M_v}{\rho_l R T} \right) \frac{\partial P_v}{\partial t} + \left( -\phi \frac{P_v M_v}{R T^2} + \frac{\rho_0 u P_v M_v}{\rho_l R T^2} \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \frac{P_v M_v}{R T} \frac{k k_v}{\mu_v} \nabla P_v - I, \quad (3)$$

где  $\rho_0$  – плотность сухого материала;  $u$  – влагосодержание;  $\rho_l$  – плотность жидкости;  $k$  – абсолютная проницаемость материала переносу;  $k_l$  и  $k_v$  – относительные проницаемости жидкости и пара соответственно;  $\mu_l$  и  $\mu_v$  – коэффициенты динамической вязкости жидкости и пара;  $P_v$  – давление пара;  $P_c$  – капиллярное давление;  $T$  – температура;  $I$  – интенсивность фазовых превращений;  $M_v$  – полярная масса пара;  $\phi$  – пористость;  $R$  – газовая постоянная;

в) уравнения теплопроводности:

$$\rho C_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \lambda_{eff} \nabla T - LI + Q, \quad (4)$$

где  $\rho C_{eff}$  – эффективная удельная теплоемкость;  $\lambda_{eff}$  – эффективная теплопроводность;  $L$  – теплота фазовых переходов;  $Q$  – удельная мощность внутренних источников тепла за счет действия СВЧ-поля;

Кроме того, для системы уравнений сформулированы граничные и начальные условия:

$$P_l = P_s + \frac{R T \rho_l}{M_l} \ln \frac{P_v}{P_s}; \mathbf{n} \cdot \left( \frac{P_v M_v}{R T} \frac{k k_v}{\mu_v} \nabla P_v \right) = \alpha_{P_v} (P_{vinf} - P_v); \mathbf{n} \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) = \alpha_T (T_{inf} - T),$$

где  $P_l$  и  $P_s$  – давление жидкости и насыщенного водяного пара;  $M_l$  – молярная масса воды;  $\alpha_{P_v}$ ,  $\alpha_T$  – коэффициенты паро- и теплообмена;  $P_{vinf}$ ,  $T_{inf}$  – давление паров и температура окружающей среды соответственно.

Граничные условия электродинамической задачи формулировались в рамках классической теории электродинамики. Начальные условия:

$$u = u_0; P_v = P_v(u_0, T_0); T = T_0.$$

Получение замыкающих соотношений для удельной теплоты десорбции, капиллярного давления и интенсивности фазовых переходов, согласно теории переноса, предложенной Н.Н. Гринчиком, возможно с привлечением изотермы десорбции конкретного капиллярно-пористого влажного материала с использованием формул Кельвина, Клапейрона – Клаузиуса. При этом для получения сложных аналитических зависимостей использовались методы символьного решения и дифференцирования.

Определение удельной мощности внутренних источников тепла  $Q$  возможно через известное в электродинамике соотношение:

$$Q = 0.5 \omega \epsilon_0 \epsilon'' |\mathbf{E}|^2, \quad (3)$$

где  $\omega$  – круговая частота электромагнитного поля.

Численное решение системы уравнений и граничных условий производилось при помощи пакетов математического символьного и численного ана-

лизов Matlab и Femlab. Причем в среде Matlab в символьном виде были получены замыкающие соотношения для системы уравнений, в частности на основе изотермы десорбции древесины, а в Femlab производилось создание конечно-элементных моделей, численное решение системы уравнений, визуализация и получение результатов моделирования в удобном для анализа виде.

Разработанная математическая модель тепло- и влагопереноса при СВЧ-термообработке влажных капиллярно-пористых материалов, в отличие от известных моделей, учитывает последние достижения в области термодинамики, физики поверхностных явлений, теории многофазной фильтрации и обеспечивает возможность сквозного моделирования взаимосвязанных процессов внутреннего тепло- и влагопереноса при действии мощного СВЧ-поля. В модели учтено изменение фазовых проницаемостей в процессе переноса, изменение величины энергии связи влаги с материалом и изменение диэлектрической проницаемости в процессе сушки.

**Третья глава** посвящена разработке методики исследования и экспериментального оборудования для определения дисперсионных соотношений комплексной диэлектрической проницаемости материала, экспериментальной проверке модели, сравнению результатов численных исследований с экспериментально измеренными характеристиками процесса СВЧ-термообработки материала, оценке адекватности модели.

Входящие в систему уравнений неизвестные дисперсионные тензорные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  капиллярно-пористого модельного материала (древесина) были экспериментально получены измерением S-параметров образцов ( $f = 2.45$  ГГц) с использованием метода линии передачи и теории сигнальных графов на специально разработанной установке (рис. 1).

Достоверность методики и результатов измерений подтверждена исследованиями материалов с известными характеристиками, а также сравнением результатов с исследованиями других авторов.

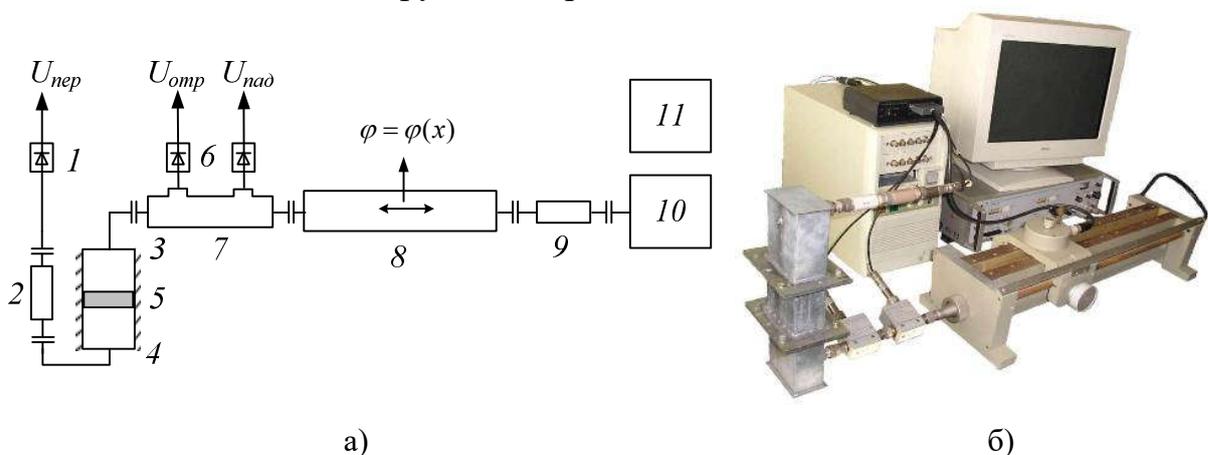


Рис. 1. Схема (а) и внешний вид измерительной установки (б):

- 1, 6 – детекторные головки; 2 – аттенюатор 10 дБ; 3, 4 – коаксиально-волноводные переходы; 5 – измерительная ячейка с образцом; 7 – направленные ответвители; 8 – измерительная линия P1-17; 9 – аттенюатор 15 дБ; 10 – генератор СВЧ Г4-79; 11 – частотомер ЧЗ-46

Получены регрессионные выражения диэлектрической проницаемости древесины для перпендикулярной ( $\varepsilon'_{\perp}$ ,  $\varepsilon''_{\perp}$ ) и параллельной ( $\varepsilon'_{\parallel}$ ,  $\varepsilon''_{\parallel}$ ) ориентации вектора напряженности СВЧ-поля относительно волокон в виде:

$$\varepsilon'_{\perp} = \frac{12.466u^2 + 6.4111u}{k'(T)} + 1.41; \quad \varepsilon''_{\perp} = \frac{2.5789u^2 + 1.3625u}{k''(T)} + 0.07; \quad (1)$$

$$\varepsilon'_{\parallel} = \frac{16.235u^2 + 9.8732u}{k'(T)} + 1.9; \quad \varepsilon''_{\parallel} = \frac{3.6755u^2 + 1.4116u}{k''(T)} + 0.25,$$

где  $k'(T) = -2 \cdot 10^{-7}T^3 + 6 \cdot 10^{-5}T^2 + 1.1 \cdot 10^{-3}T + 0.948$ ,  $k''(T) = 3 \cdot 10^{-4}T^2 + 0.0174T + 0.461$ .

Проверка адекватности разработанной модели осуществлялась на специально разработанной установке (рис. 2). Результаты экспериментального измерения температурных полей в 6-ти точках образца влажной древесины сравнивались с результатами двухмерного моделирования.

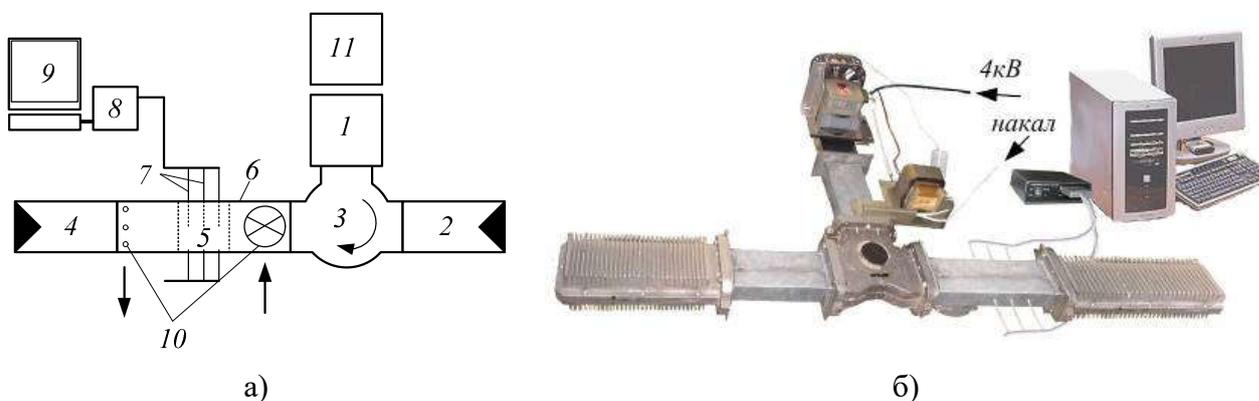


Рис. 2. Схема (а) и внешний вид экспериментальной установки (б):

- 1 – магнетрон; 2, 4 – ферритовые согласованные нагрузки; 3 – ферритовый Y-циркулятор;  
5 – образец; 6 – волновод; 7 – термопары; 8 – аналого-цифровой преобразователь;  
9 – компьютер; 10 – вентиляция; 11 – источник питания

Теоретические кривые температуры оказались ниже экспериментальных на 10 % в период прогрева образца и на 15 % до окончания процесса, что, вероятно, связано с погрешностью определения взятых из литературы теплофизических характеристик материала образца, а также краевых коэффициентов тепло- и парообмена. Тем не менее, с учетом указанных выше погрешностей, разработанную математическую модель можно рекомендовать для исследования и разработки процессов СВЧ-термообработки и сушки капиллярно-пористых материалов.

**Четвертая глава** посвящена исследованиям и анализу с помощью разработанной модели ряда прикладных задач СВЧ-сушки, в частности, взаимосвязанных тепло-, влаго- и электрофизических явлений, происходящих при интенсивном СВЧ-облучении влажных капиллярно-пористых материалов в режимах непрерывного возбуждения бегущих и стоячих волн, при нагреве материалов различной толщины ( $d \ll \lambda$  и  $d \gg \lambda$ ), при импульсном режиме работы СВЧ-источника.

В частности, при нагреве пористого материала в условиях образования стоячих волн (в отличие от режима бегущей волны) напряженность СВЧ-поля в мате-

риале оказывается несколько выше, причем картина распределения поля имеет более четкие максимумы и минимумы. Перегрев образца ( $T > 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в конце цикла сушки происходит быстрее, чем при нагреве в режиме бегущих волн, а сам процесс прогрева и сушки материала происходит на 10...20 % интенсивнее.

Результаты моделирования показали, что с практической точки зрения сушка тонких ( $d \ll \lambda$ ) образцов материала СВЧ-полями малоэффективна – нагрев материала до значительных температур потребует увеличения напряженности СВЧ-поля либо снижения коэффициента теплообмена путем теплоизоляции; незначительное внутреннее давление пара не позволит интенсифицировать процессы переноса и создать благоприятные условия фильтрационного движения влаги к поверхности материала.

Однако эффект использования СВЧ-энергии при термообработке влажных дисперсных материалов достаточно большой толщины ( $d \gg \lambda$ ) проявляется в значительной интенсификации процесса прогрева и сушки: создается внутренний градиент давления пара, направленный к поверхности, что приводит к резкой интенсификации переноса влаги, и достигается значительное снижение затрат энергии на фазовые переходы «вода – пар». Прогрев осуществляется с высокой скоростью с аккумуляцией тепловой энергии, особенно в конце цикла сушки образца.

Численные эксперименты проводились в условиях импульсного режима работы источника СВЧ-энергии с длительностью импульсов  $t_{\text{вкл}} = 200$  и  $500$  с и скважностью  $\Pi = 2$ . Отмечается, что при импульсном подводе СВЧ-энергии снижаются градиенты температуры, пара и влагосодержания при одновременном снижении энергозатрат на 11...12 %. Значительно снижается вероятность нежелательного спонтанного роста температуры в конце цикла сушки, улучшаются электрические и тепловые условия работы источников СВЧ-энергии.

В **пятой главе** рассмотрены вопросы расчета и разработки конструкции сверхразмерных лучевых облучателей, исследования влияния геометрических параметров облучателя, режимов СВЧ-воздействия и элементов рассеивания на процессы сушки и распределение СВЧ-поля в технологической зоне облучателя.

В результате электродинамического анализа пирамидального облучателя, работающего на согласованную и реальную нагрузки (рис. 3), установлено, что в раскрыве облучателя обеспечивается практически синусоидальное распределение  $|\mathbf{E}|$  в направлении Н-плоскости при любых углах раскрыва до  $120^{\circ}$ , а при углах раскрыва в Е-плоскости вплоть до  $60^{\circ}$  наблюдается равномерность поля (более 80 %). Анализ

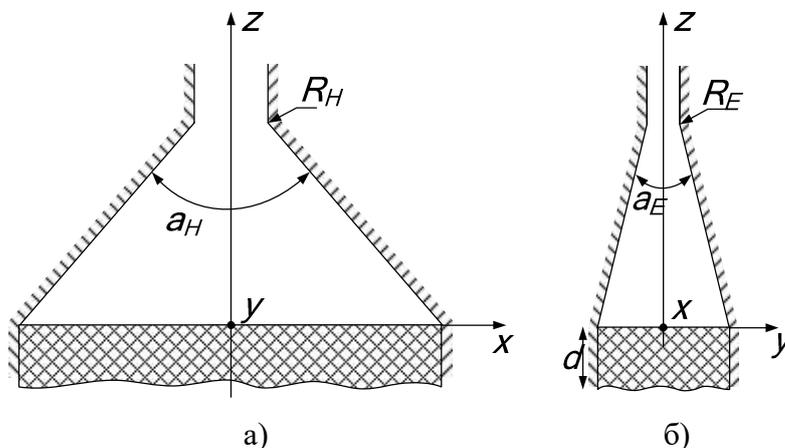


Рис. 3. Пирамидальный облучатель:  
а – Н-плоскость; б – Е-плоскость

работы облучателя с рассчитанными углами раскрыва на реальную несогласованную нагрузку с диэлектрическими характеристиками древесины влагосодержанием 0.8 кг/кг и температурой 20 °С показал, что распределение СВЧ-поля на реальном объекте сушки значительно отличается от рассчитанного для облучателя с согласованной нагрузкой. В частности, в диапазоне углов раскрыва облучателя в Е-плоскости  $\alpha_E$  выше 30° равномерность распределения поля на нагрузке меньше 30%, а в раскрыве Н-облучателя не обеспечивается требуемого синусоидального распределения поля на поверхности материала. Таким образом, формирование распределения напряженности СВЧ-поля синусоидального в одном направлении и равномерного в другом на реальных несогласованных нагрузках возможно лишь при малых углах раскрыва. Естественно, что для уменьшения углов  $\alpha_H$ ,  $\alpha_E$  при неизменном размере апертуры требуется значительное увеличение высоты облучателя. Кроме того, величина углов максимального раскрыва облучателя, обеспечивающих возбуждение волны  $H_{10}$ , будет зависеть от отражающих свойств обрабатываемого материала (диэлектрических характеристик и ориентации в облучателе). Наличие в облучателе влагосодержащего диэлектрика вызывает возникновение обратных (отраженных) волн и появление интерференционной картины поля. Исходя из этого расчет лучевых камер СВЧ-сушки производился с учетом реального диэлектрического заполнения.

Исследование влияния радиусов  $R_H$  и  $R_E$  сглаживающего перехода для предельного случая, когда прямоугольный волновод питает бесконечный рупор с раскрывом 180°, излучающий в открытое пространство, показало, что применение сглаживания в Н-плоскости практически не снижает коэффициент стоячей волны (КСВ), в то время как в Е-плоскости наблюдается более чем 2-кратное снижение КСВ при  $R_E \geq 200$  мм и  $R_E \geq 600$  мм (см. рис. 3) для облучателей с рабочей частотой 2.45 ГГц и 915 МГц соответственно.

В результате анализа процессов СВЧ-сушки модельного образца длиной 0.6 м и толщиной 0.2 м с начальным влагосодержанием 60 % и температурой 25 °С СВЧ-полем на рабочей частоте 2.45 ГГц в соответствующих плоскостных облучателях с  $\alpha_E = 60^\circ$  и  $\alpha_H = 100^\circ$  отмечено:

- нагрев образца в Е-рупоре не происходит на концевых участках материала, а локализован ближе к его середине;
- тепловыделение при сушке материала в Н-рупоре имеет ярко выраженную неравномерность с максимумом тепловыделения в центре образца.

На основе анализа процессов электродинамики и тепломассообмена предложены несколько путей повышения равномерности прогрева. В Е-плоскости – это значительное уменьшение углов раскрыва (менее 30°), снижение интенсивности сушки путем уменьшения напряженности поля и использования импульсного режима работы источника СВЧ-энергии, расстройка частоты магнетрона. В Н-плоскости – управление рассеивателем поля, магнитное качание луча и применение геометрических свойств параболического облучателя для выравнивания поля в этом направлении. Для Н и Е-рупоров – это изменение направления облучения по отношению к поверхности материала. Перечисленные варианты были

последовательно проанализированы при сушке образца материала влажностью 0.6 кг/кг в поле соответствующих облучателей при  $f = 2.45$  ГГц.

В частности, приемлемая равномерность прогрева образца древесины влажностью 0.6 кг/кг в направлении Е-плоскости пирамидального облучателя наблюдается лишь при  $\alpha_E = 10^\circ$ .

Расчет процесса сушки при снижении в 4 раза подводимой в камеру мощности СВЧ-поля показал, что значительного выравнивания тепловыделения вдоль материала не наблюдается, а происходит лишь распространение области прогрева по толщине образца, причем расчетное время сушки до 30 %-ной влажности достаточно длительное (более 50000 с). В режиме импульсного подвода СВЧ-поля при  $t_{вкл} = 500$  с и  $P = 2$  сушка до уровня влажности 30 % при такой же равномерности прогрева происходит в 2 раза быстрее.

Установлено, что изменение частоты возбуждаемого в облучателе поля вызывает его перераспределение в материале и смещение внутренних источников нагрева. Достаточно быстрые пространственные колебания выделяемой в материале тепловой энергии будут усредняться во времени без нарушения равномерности нагрева. В расчете задавалось, что колебания частоты  $f(t)$  возбуждаемого в облучателе поля около  $f_0 = 2.45$  ГГц происходят с частотой  $2\pi f' = 0.05$  рад/с ( $\approx 30$  колебаний в час) и амплитудой  $\Delta f = 30$  МГц. Замечено, что качание частоты магнетрона в этих незначительных пределах влияет на пространственное распределение источников тепла в материале. За счет инерционности тепловых процессов температурные поля выравниваются и становятся более однородными, чем при облучении образца полем фиксированной частоты.

Согласно результатам моделирования, с увеличением угла наклона облучателя  $\alpha'$  в Е-плоскости по отношению к поверхности обрабатываемого материала происходит повышение однородности распределения выделяемой в материале тепловой энергии, а коэффициент отражения значительно снижается. Причем для дополнительного повышения равномерности распределения поля необходимо обеспечить поглощение на стенках камеры, противоположных поверхности обрабатываемого объекта, отраженных от материала волн. В частности, при  $\alpha' = 45^\circ$  получена достаточная равномерность поля при ничтожно малом коэффициенте отражения по мощности  $S_{11}^P = 2.66 \cdot 10^{-4}$  ( $|S_{11}| = 0.0163$ ), причем доля расходуемой энергии СВЧ-поля на нагрев материала составляет 68 %, а доля СВЧ-энергии, принятой поглотителем поля, – 32 %. В связи с этим предлагается использовать выделяющуюся в поглотителе тепловую энергию для нагрева воздуха, поступающего на сушку материалов, т.е. использовать в поглотителе тепловую энергию в качестве дополнительного источника тепла, используемого, например, для прогрева циркулирующего в технологической камере воздуха. С этой целью радиопоглотители целесообразно изготавливать в виде системы воздушных каналов циркуляции воздуха. Причем для повышения коэффициента теплообмена между стенками каналов поглотителя и протекающим воздухом форма и конфигурация каналов должна способствовать турбулентному режиму движения воздуха.

Использование наклона облучателя в Н-плоскости на повышение равномерности прогрева материала практически не влияет.

Результаты электродинамического анализа поля в Н-плоскости облучателя с металлическим рассеивателем прямоугольного сечения  $30 \times 10$  мм показывают эффективность управления распределением полей и тепловыделением в указанном направлении на согласованной и реальной нагрузке путем перемещения рассеивателя по высоте облучателя.

Предложен способ и проанализирована задача динамического управления распределением поля в плоскости Н-облучателя, основанного на взаимодействии электромагнитного поля и феррита с анизотропными магнитными свойствами, которые он приобретает в результате подмагничивания полем  $\mathbf{B}_0$ . При моделировании использовались вставки из феррограната для высокого уровня мощности марки 20СЧ8М:  $\epsilon' = 15.1$ ,  $\text{tg}\delta = 0.0002$ , намагниченность насыщения  $4\pi M_s = 1280$  Гс, фактор Ланде  $g = 2.0$  и ширина линии ферромагнитного резонанса  $\Delta H = 60$  Э (на половинном уровне при  $f = 9.4$  ГГц). Диаметр ферритовой вставки  $r'' = 60$  мм, толщина  $d'' = 2.5$  мм,  $h'' = 30$  мм (рис. 4).

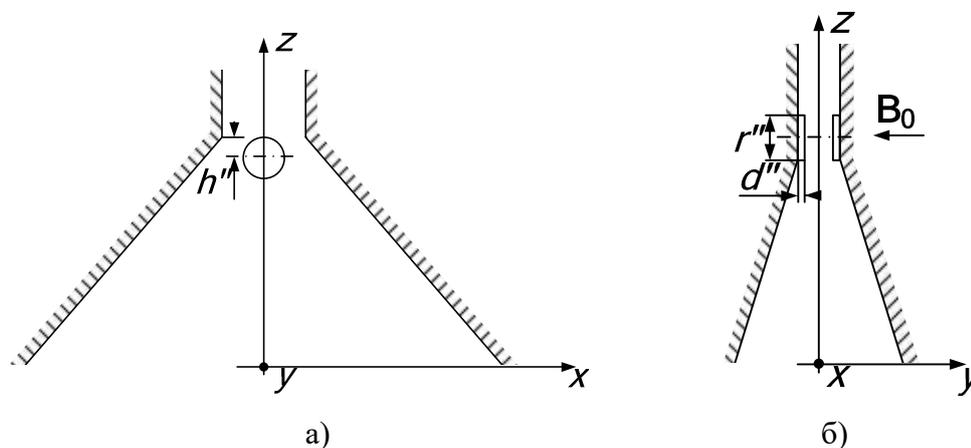


Рис. 4. Облучатель с системой магнитного качания луча:  
а – Н-плоскость; б – Е-плоскость

Установлено, что возникающий гиромагнитный эффект при подмагничивании ферритовых вставок приводит к отклонению луча и перемещению максимума напряженности поля вдоль Н-плоскости по поверхности идеальной (рис. 5, а) и реальной нагрузок (рис. 5, б).

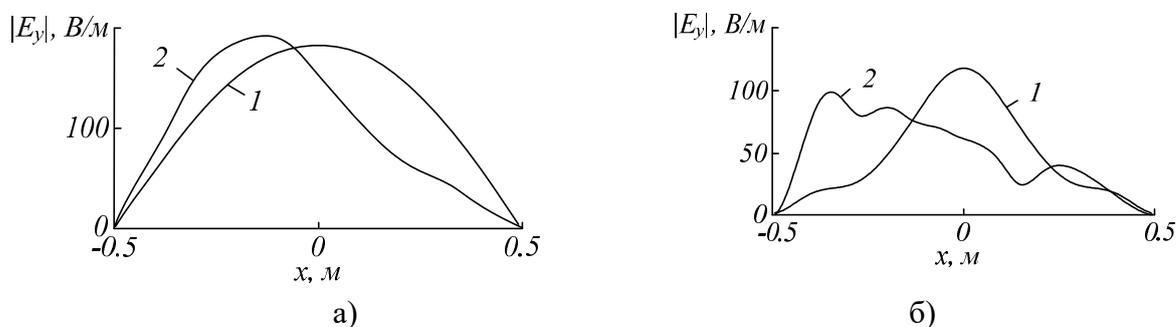


Рис. 5. Распределение напряженности поля Н-секториального рупора ( $f = 2.45$  ГГц) на согласованной (а) и реальной ( $\epsilon' = 12.8$ ,  $\text{tg}\delta = 0.13$ ) нагрузке (б) при значениях постоянного магнитного поля:  
1 –  $B_0 = 0$  Э; 2 –  $B_0 = 500$  Э

Реализация эффекта магнитного качания луча в облучателе для динамического управления тепловыделением в обрабатываемых материалах возможна при изменении величины и направления постоянного подмагничивающего поля  $\mathbf{B}_0$ .

На основе электродинамического анализа исследована возможность использования облучателя параболической формы для выравнивания синусоидально распределенной напряженности поля Н-рупора на выходе без применения рассеивателей. Показано, что наличие распределенных источников поля в месте сочленения прямоугольного волновода и параболического облучателя в области фокуса практически не влияет на формирование плоского фронта волны (как и в случае наличия точечного источника). Расчет процесса сушки в поле параболического облучателя (рис. 6, а) показал высокую степень однородности прогрева образца (рис. 6, б).

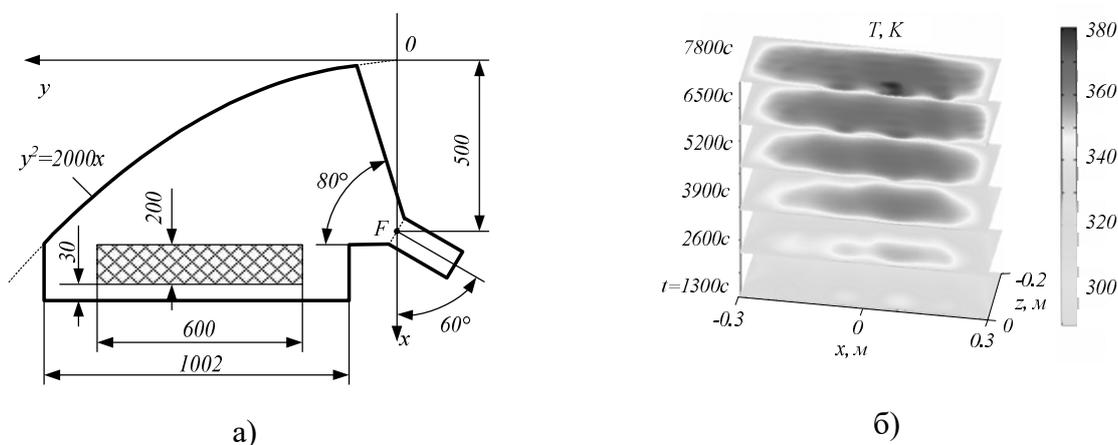


Рис. 6. Геометрические параметры параболического облучателя (а) и распределение температуры в образце при сушке в поле параболического облучателя (б)

На основе вышеприведенных результатов моделирования сверхразмерного лучевого облучателя был разработан вариант и изготовлен экспериментальный образец

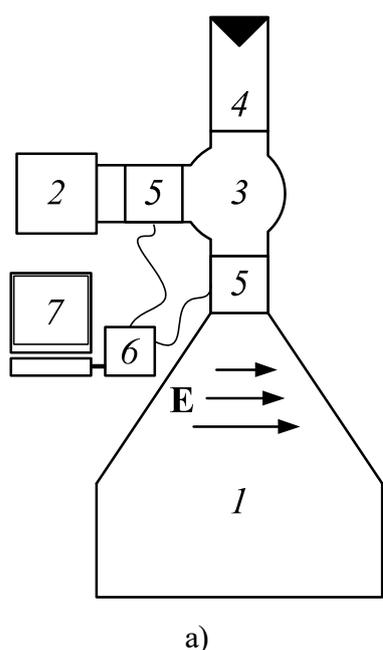


Рис. 7. Схема (а) и внешний вид (б) экспериментальной установки

устройства СВЧ-сушки (рис. 7). Камера-облучатель 1 запитывалась магнетроном М112 2 с использованием Y-циркулятора 3, оконечной нагрузки 4 и соединительных волноводов 5, содержащих измерительные зонды, для определения коэффициентов потерь мощности на отражение в процессе экспериментов. К соответствующим зондам подключались детекторные СВЧ-головки, посредством которых фиксировались уровни падающей и отра-

женной мощности. Автоматизированная запись и обработка сигналов осуществлялась при помощи аналогово-цифрового преобразователя 6 ADC100K-12-8 и персонального компьютера 7.

На разработанном образце проводились эксперименты по СВЧ-термообработке влажных нитей стекловолокна (производство ОАО «Полоцк-Стекловолокно»). Катушки с начальной влажностью  $u_0$  около 10 % помещались в камеру при ориентациях вектора  $\mathbf{E}$  облучателя параллельно и перпендикулярно оси катушек. Дополнительно в процессе обработки фиксировалась масса катушек, температура нити, потери мощности на отражение.

Эксперименты показали, что сушка катушек в СВЧ-поле происходила с незначительными потерями мощности: менее 5 % в начальный период и менее 20 % в конце цикла термообработки при направлении  $\mathbf{E}$  перпендикулярно оси катушек (время сушки 2.5 часа). В случае параллельной ориентации  $\mathbf{E}$  относительно оси катушки процесс сушки происходил интенсивнее (время сушки 2 часа) с более высокой температурой нагрева и с потерями мощности до 10 %. Согласно результатам химического анализа нитей, проведенного лабораторией ОАО «Полоцк-Стекловолокно» после СВЧ-термообработки, разогрев и высыхание нити в катушках были равномерными по всему объему катушек, что показывает высокую степень однородности СВЧ-поля в технологической зоне камеры на основе разработанного лучевого облучателя.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана физико-математическая модель, описывающая взаимосвязанные процессы электродинамики, тепло-, влаго- и парообмена при воздействиях СВЧ-поля на влажный капиллярно-пористый материал в системе технологической СВЧ-камеры и позволяющая изучать и прогнозировать процессы СВЧ-сушки материалов [2 – 6, 10].

2. Установлено, что при использовании и импульсного подвода СВЧ-энергии в материале снижаются градиенты температуры, пара, влагосодержания и вероятность внутреннего перегрева при одновременном снижении энергозатрат на 11...12 % и улучшаются тепловые и электрические режимы работы источников СВЧ-энергии [4 – 6, 10].

3. Получены распределения напряженности электромагнитного поля на поверхности согласованной и реальной нагрузок в зависимости от углов раскрыва лучевого облучателя пирамидального типа. Предложено устройство для изменения распределения  $|\mathbf{E}|$ , защищенное патентом Республики Беларусь [12].

Установлено, что углы раскрыва в  $E$ -плоскости составляют  $\alpha_E \leq 60^\circ$  и сглаживающие переходы питающего волновода в облучатель с радиусами  $R_E \geq 200$  мм и  $R_E \geq 600$  мм для  $f = 2.45$  ГГц и  $f = 915$  МГц обеспечивает 80 %-ную равномерность распределения  $|\mathbf{E}|$  на согласованной нагрузке и 2-х кратное снижение коэффициента отражения. На реальной несогласованной нагрузке в виде образца древесины влажностью 60 % повышение равномерности  $|\mathbf{E}|$  достигается при  $\alpha_E \leq 10...20^\circ$  [10].

4. Разработаны методы и устройства эффективного управления распределением СВЧ-поля в облучателе с реальной нагрузкой на основе регулируемых по высоте облучателя рассеивателей, системы магнитного качания луча в облучателе, использующей гироманнитные явления в ферритах и параболического облучателя, формирующего в раскрыве плоский фронт волны [1, 7 – 11].

5. Разработано устройство СВЧ-сушки капиллярно-пористых материалов на основе сверхразмерного лучевого облучателя пирамидального типа, реализующего эффективные условия для формирования необходимого и управляемого распределения  $E$  в технологической зоне, защищенная патентом Республики Беларусь [13].

6. Предложен вариант конструктивно-технического решения установки СВЧ-сушки с технологической камерой на основе сверхразмерного пирамидального лучевого облучателя. Создан экспериментальный образец, прошедший апробацию на ОАО «Полоцк-стекловолокно» для сушки нитей стекловолокна и показывающий высокую степень равномерности нагрева и высыхания катушек нити при потерях мощности на отражение до 5...20 % [1, 9 – 11].

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

### Статьи в научно-технических журналах

1. Грозберг Ю.Г., Адамович А.Л., Кундас С.П. Установка для СВЧ-обработки диэлектрических материалов // Известия Белорусской инженерной академии. – 2001. – № 1(11)/3. – С. 181 – 183.
2. Моделирование микроволнового нагрева и сушки материалов / А.Л. Адамович, В.А. Рымарев, Ю.Г. Грозберг, С.П. Кундас // Известия Белорусской инженерной академии. – 2002. – № 1(13)/2. – С. 208 – 211.
3. Моделирование микроволнового нагрева диэлектрических материалов в одномодовом резонаторе / А.Л. Адамович, Н.Н. Гринчик, С.П. Кундас, Ю.Г. Грозберг // Известия Белорусской инженерной академии. – 2003. – № 1(15)/1. – С. 123 – 128.
4. Моделирование неизотермического тепло- и влагопереноса в капиллярно-пористых средах при микроволновом нагреве / А.Л. Адамович, Н.Н. Гринчик, С.П. Кундас, В.И. Терехов // Теплофизика и аэромеханика. – 2004. – № 2. – С. 261 – 276.
5. Математическая модель тепломассопереноса в капиллярно-пористых средах при микроволновом нагреве / Н.Н. Гринчик, С.П. Кундас, Ю.Г. Грозберг, А.Л. Адамович // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. С. Фундаментальные науки. – 2004. – № 4. – С. 1 – 8.
6. Simulation of non-isothermal heat- and moisture transport in capillary porous media during microwave heating / A.L. Adamovich, N.N. Grinchik, S.P. Kundas, V.I. Terekhov // J. of Thermophysics and aeromechanics. – 2004. – Vol. 11, No. 2. – P. 253 – 268.

### Статьи в сборниках трудов и материалах конференций

7. Адамович А.Л., Грозберг Ю.Г., Капралов М.Е. К вопросу использования микроволновых технологий в промышленности // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: 11-я МНТК КрыМиКо'2001, Севастополь. – С. 636 – 637.
8. Адамович А.Л., Грозберг Ю.Г., Капралов М.Е. Использование СВЧ-энергии для обработки материалов // Машиностроение: Сб. науч. работ / Под ред. И.П. Филонова. – Мн.: Технопринт, 2001. – Вып. 17. – С. 87 – 90.
9. Грозберг Ю.Г., Адамович А.Л., Капралов М.Е. Применение микроволновых технологий и структура микроволновых комплексов // Создание и применение высокоэффективных наукоемких ресурсосберегающих технологий, машин и комплексов: МНТК, Могилев, 25 – 26 октября 2001 г. – С. 29 – 30.
10. Адамович А.Л., Кундас С.П., Грозберг Ю.Г. Компьютерное моделирование СВЧ-облучателя рупорного типа // Проблемы проектирования и производства РЭС: Материалы III МНТК, Новополоцк, 26 – 28 мая 2004 г. Новополоцк: ПГУ, 2004. – Т. II. – С. 250 – 255.

### Тезисы докладов

11. Адамович А.Л., Гринчик Н.Н., Грозберг Ю.Г., Кундас С.П., Терехов В.И. Неизотермический влагоперенос при интенсивном микроволновом нагреве древесины // V Минский Международный форум по тепло- и массообмену: Тезисы докладов и сообщений, Минск, 24 – 28 мая 2004 г. / ИТМО НАНБ.– Минск, 2004 г.– Т. 2. – С. 196 – 197.

### Патенты на изобретения

12. Пат. 1336 U BY, МПК G 01R 29/08. Устройство для измерения напряженности электрического поля / С.В. Бордусов, А.П. Достанко, С.П. Кундас, Ю.Г. Грозберг, А.Л. Адамович, М.Е. Капралов. – № u 20030384; Заявл. 04.09.2003; Оpubл. 30.03.2004 // Афіцыйны бюлетэнь / Нацыянальны центр інтэлектуальнай уласнасці. – 2004. – № 1(40). – С. 270.
13. Пат. 2160 U BY, МПК F 26B 3/347, H 05B 6/64. СВЧ-печь для термообработки материалов / Адамович А.Л., Грозберг Ю.Г., Кундас С.П. – № u 20050075; Заявл. 16.02.2005; Оpubл. 30.09.2005 // Афіцыйны бюлетэнь / Нацыянальны центр інтэлектуальнай уласнасці. – 2005. – № 3(46). – С. 253.

## РЕЗЮМЕ

**АДАМОВИЧ Александр Леонидович**

### **РАЗРАБОТКА СВЧ-УСТРОЙСТВА ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ СУШКИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Ключевые слова:** тепловлагообмен, СВЧ-сушка, облучатель, диэлектрические характеристики, гиромангнитный эффект, электродинамика, рассеиватель.

**Объект исследования** – СВЧ-устройства, реализующие процессы нагрева и сушки материалов, способы управления распределением полей.

**Предмет исследования** – электрофизические процессы воздействия СВЧ-излучения на капиллярно-пористые материалы, математические модели электродинамических и теплофизических процессов, имеющих место при СВЧ-воздействии на влажные капиллярно-пористые материалы, алгоритмы и программные средства для их практической реализации.

**Цель работы** – разработка СВЧ-устройства для энергосберегающих процессов сушки капиллярно-пористых материалов на основе анализа закономерностей процессов электродинамики и тепловлагопереноса в условиях СВЧ-нагрева.

В работе использованы численные и экспериментальные методы исследования процессов электродинамики и тепловлагопереноса при СВЧ-сушке, диэлектрических свойств материалов.

Разработана физико-математическая модель взаимосвязанных электромагнитных и тепловлагообменных процессов в технологической системе «камера – материал» с учетом современных достижений в области термодинамики и физики поверхностных явлений.

С применением разработанной модели установлены закономерности протекания процессов электродинамики и тепловлагообмена при сушке капиллярно-пористого модельного материала СВЧ-полем в различных режимах. Отмечено влияние импульсного режима облучения материала для снижения неравномерности сушки.

Предложены конструктивные варианты устройств СВЧ-сушки капиллярно-пористых материалов на основе пирамидальных и параболических облучателей, позволяющих формировать требуемое и управляемое распределение СВЧ-поля в технологической зоне и обеспечивать необходимую равномерность прогрева и сушки материала.

Область применения результатов – разработка эффективных процессов и тепломассообменных аппаратов сушки материалов СВЧ-полем в деревообрабатывающей, текстильной промышленности и сельском хозяйстве.

## РЭЗІЮМЭ

АДАМОВІЧ Аляксандр Леанідавіч

### РАСПРАЦОЎКА ЗВЧ-ПРЫСТАСАВАННЯ ДЛЯ ЭНЕРГАЗАХОЎВАЮЧЫХ ПРАЦЭСАЎ СУШКІ КАПІЛЯРНА-ПОРЫСТЫХ МАТЭРЫЯЛАЎ НА АСНОВЕ КАМП'ЮТЭРНАГА МАДЭЛЯВАННЯ

**Ключавыя словы:** цеплавільгаабмен, ЗВЧ-сушка, апраменьвальнік, дыэлектрычныя характарыстыкі, гірамагнітны эфект, электрадынаміка, рассейвальнік.

**Аб'ект даследавання** – ЗВЧ-прыстасаванне, рэалізуючыя працэсы нагрэву і сушкі матэрыялаў, спосабы кіравання размеркаваннем палей.

**Прадмет даследавання** – электрафізічныя працэсы ўздзеяння ЗВЧ-выпраменьвання на капілярна-порыстыя матэрыялы, матэматычныя мадэлі электрадынамічных і цеплафізічных працэсаў пры ЗВЧ-уздзеянні на вільготныя капілярна-порыстыя матэрыялы, алгарытмы і праграмныя сродкі для іх практычнай рэалізацыі.

**Мэта работы** – распрацоўка ЗВЧ-прыстасавання для энергазахоўваючых працэсаў сушкі капілярна-порыстых матэрыялаў на аснове аналізу заканамернасцяў працэсаў электрадынамікі і цеплавільгапераносу ва ўмовах ЗВЧ-нагрэву.

У рабоце выкарыстоўваліся лікавыя і эксперыментальныя метады даследавання працэсаў электрадынамікі і цеплавільгапераносу пры ЗВЧ-сушцы, дыэлектрычных характэрыстык матэрыялаў.

Распрацавана фізіка-матэматычная мадэль узаемазвязаных электрамагнітных і цеплавільгаабменных працэсаў у тэхналагічнай сістэме «камера – матэрыял» з улікам сучасных дасягненняў у галіне тэрмадынамікі і фізікі паверхневых з'яў.

З прымяненнем распрацаванай мадэлі ўстаноўлены заканамернасці працякання працэсаў электрадынамікі і цеплавільгаабмену пры сушцы капілярна-порыстага мадэльнага матэрыялу ЗВЧ-полем у розных рэжымах. Адзначаны ўплыў імпульснага рэжыму апраменьвання матэрыялу для зніжэння нераўнамернасці сушкі.

Прапанаваны канструктыўныя варыянты прыстасаванняў ЗВЧ-сушкі капілярна-порыстых матэрыялаў на аснове пірамідальных і парабалічных апраменьвальнікаў, якія дазваляюць фарміраваць патрабаванае і кіруемае размеркаванне ЗВЧ-палей у тэхналагічнай зоне і забяспечваць неабходную раўнамернасць прагрэву і сушкі матэрыялаў.

Галіна прымянення вынікаў работы – распрацаванне эфектыўных працэсаў і цепламасаабменных апаратаў сушкі матэрыялаў ЗВЧ-полем у дрэваапрацоўчай, тэкстыльнай прамысловасці і сельскай гаспадарцы.



ALEXANDER L. ADAMOVICH

**DEVELOPMENT OF MICROWAVE DEVICE FOR ENERGY-SAVING  
DRYING OF CAPILLARY-POROUS MATERIALS ON BASIS OF  
COMPUTER SIMULATION**

**Key words:** heat and moisture transfer, microwave drying, irradiator, dielectric properties, gyromagnetic effect, electrodynamics, scatterer.

**The object of research** – microwave devices for microwave heating and drying processing of materials, methods of microwave distribution control.

**The subject of research** – electrophysical processes of influence microwave radiation on the capillary-porous materials, mathematical models of electrodynamic and thermophysical processes, during influence of microwave on the wet capillary-porous material, algorithms and software tools for its practical realization.

**The purpose of the work** – microwave device development for energy-saving drying of capillary-porous materials on basis of investigation electrodynamics and heat and moisture transfer processes during microwave heating.

Numerical and experimental methods of the investigation of the electrodynamics, heat and moisture transfer processes during microwave drying, dielectric properties of materials are used in the work.

Physical and mathematical models interrelated electrodynamics and heat and moisture transfer processes in technological system «applicator–material» with account of contemporary achievements in thermodynamics and surface physics are developed.

With developed models rule of electrodynamics, heat and moisture transfer processes during microwave drying of model material by different regimes are establishment. Influence of discrete irradiation of materials on the decrease drying non-uniformity is observed.

Different design of microwave drying devices is development on basis of pyramidal and parabolic irradiators, which formed controlled distribution microwaves inside technological field and provide necessary uniformity of heating and drying of materials.

The field of results application is development effective processes and devices for heat-mass exchange for microwave drying at the woodworking, textile industry and agriculture.

АДАМОВИЧ Александр Леонидович

**РАЗРАБОТКА СВЧ-УСТРОЙСТВА  
ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ СУШКИ  
КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Редактор Л.Н. Авласенок

---

Подписано в печать 24.10.05. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 1,16. Уч.- изд. л. 1,08. Тираж 60 экз. Заказ 1166.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

ЛИ № 02330/0133020 от 30.04.04 г.  
ЛП № 02330/0133128 от 27.05.04 г.

211440 г. Новополоцк, ул. Блохина, 29