

На правах рукописи



Шагеева Адиля Ильсуровна

**ВАКУУМНАЯ СВЧ-СУШКА ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В
ОСЦИЛЛИРУЮЩЕМ РЕЖИМЕ**

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и
переработки древесины

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Сафин Руслан Рушанович

Официальные оппоненты: **Гороховский Александр Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет, заведующий кафедрой управления в технических системах и инновационных технологий;

Дорняк Ольга Роеальдовна, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», заведующий кафедрой электротехники, теплотехники и гидравлики.

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», г. Архангельск.

Защита диссертации состоится «22» декабря 2023 года в 09 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.312.10, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседания Ученого совета А-330, Ученый совет.

В отзыве указывается фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность лица с указанием структурного подразделения, представившего отзыв (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней), специальность по защите диссертации.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=473007>

Автореферат разослан «__» _____ 2023 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Дильяра Фарилевна
Зиятдинова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На сегодняшний день в технологическом цикле деревообрабатывающей отрасли широко используются конвективные и кондуктивные способы сушки древесины. Разнообразность технологий объясняется определенными преимуществами и недостатками каждого из этих способов в зависимости от поставленных целей, однако основной проблемой для них остается большая продолжительность процесса. Данные обстоятельства подталкивают исследователей к поиску более эффективных и менее энергозатратных способов и оборудования для сушки древесины. Одним из таких перспективных направлений ведения процесса является использование в качестве источника тепловой энергии электромагнитного поля сверхвысоких частот (СВЧ). В отличие от конвективных и кондуктивных методов сушки, при которых подвод тепловой энергии к материалу осуществляется через поверхность тела, СВЧ энергия благодаря объемному нагреву материала способствует увеличению скорости теплопередачи и испарения влаги в высушиваемом пиломатериале. Однако при СВЧ-сушке толстых сортиментов по сечению последних зачастую наблюдается неравномерность температуры, максимальное значение которой устанавливается не в центре материала, а в средних слоях, что приводит к сложному профилю распределения влаги по сечению материала, вызывающему развитие неконтролируемых внутренних напряжений.

В последние годы для решения задач по снижению себестоимости процессов сушки без ущерба качеству пиломатериалов находят применение «импульсные» режимы путем реализации осциллирующей сушки. Осциллирующий режим проводится циклами и представляет собой сушку с попеременно чередующимися стадиями нагрева и вакуумирования. Стадия вакуумирования, в свою очередь, состоит из двух этапов – постепенного понижения давления в камере и выдержки при определенном значении вакуума.

Осциллирующие режимы сушки древесины наиболее часто применяются в вакуумно-конвективной технологии. Недостатком данного способа сушки является возникающий в материале на стадии конвективного нагрева градиент температуры, направленный в противоположную от градиента влажности сторону, что оказывает тормозящее действие на процесс удаления влаги из материала. Использование на стадии нагрева СВЧ энергии позволяет избежать отрицательного действия градиента температуры. При этом стадия вакуумирования позволяет выровнять температуру по слоям древесины. Однако процессы, происходящие при СВЧ-сушке в режиме осцилляции давления среды, и их влияние на древесину до сих пор остаются неизученными. В этой связи разработка режимов осциллирующей СВЧ-сушки древесины является актуальной задачей для исследователей.

Работа выполнена в рамках договора №1-20 «Разработка технологии сушки и термической обработки пиломатериалов в вакуумной СВЧ-среде» по программе «ТехноСтарт» и договора № 03-15-яГ «Разработка автономного вакуумного СВЧ комплекса с применением альтернативных источников энергии для сушки растительного сырья» по гранту Академии наук Республики Татарстан.

Степень разработанности темы. В процессе диссертационного исследования проанализированы работы, посвященные сушке древесины в вакуумной электромагнитной среде. Среди соотечественников, которые внесли значительный вклад в развитие теории и практики вакуумно-высокочастотной сушки, следует выделить

А.И. Расева, А.А. Горяева, Н.Ю. Попова, А.В. Нетушила. Вопросам СВЧ сушки древесных материалов, в том числе трудносохнущих пород и мореного дуба, посвящены работы А.М. Бомбина, Н.В. Скураговича, Е.В. Недорезовой. Вопросам теплопереноса в технологиях сушки древесины и математическому моделированию данных процессов посвящены работы А.Г. Гороховского, О.Р. Дорняк, N. Deliiski, R. Younsi, S. Poncsak, D. Kocaefe, D. Jia, M.Afzal, Xian-Jun Li, Bi-Guang Zhang, Wen-Jun Li, Sungsoontorn, S., A. Antti, D. Guanben, N. Mollekopf, Ashis, K., Imenokhoyev I., Leiker, M., Raaholt, B.W.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка высокоэффективных режимов осциллирующей СВЧ-сушки пиломатериалов, обеспечивающих надлежащее качество материала.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) разработка математической модели процесса вакуумной СВЧ сушки пиломатериалов в режиме осцилляции давления среды;
- 2) проведение экспериментальных исследований и математического моделирования вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме;
- 3) разработка рациональных режимных параметров процесса осциллирующей вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов, обеспечивающих требуемое качество сортиментов при наименьших энергетических затратах;
- 4) разработка эффективной схемы подвода электромагнитной энергии к штабелю пиломатериалов в процессе осциллирующей вакуумной СВЧ-сушки;
- 5) разработка вакуумной СВЧ установки, обеспечивающей автономную сушку древесины на деревоперерабатывающих предприятиях, а также комплекса рекомендаций и технических решений, направленных на повышение экономической целесообразности предложенной технологии.

Научная новизна. Работа содержит научно-обоснованные технические и технологические решения, направленные на повышение качества высушиваемого пиломатериала и сокращение энергетических затрат на ведение процесса сушки древесины в СВЧ среде:

1. Разработана математическая модель процесса вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме, основанная на законах теплопереноса в капиллярно-пористых коллоидных телах, и учитывающая расположение и удельную мощность источника СВЧ излучения и технологические параметры оборудования.
2. Разработана технология вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме, состоящая из последовательно чередующихся стадий «СВЧ-нагрева» и «вакуумирования», и позволяющая повысить качество сушки пиломатериалов вследствие выравнивания влажности по слоям древесины на стадии «вакуумирования»; при этом стадия нагрева проводится чередованием в смежных циклах направления электромагнитного излучения относительно пиломатериала и в зависимости от влагосодержания высушиваемой древесины характеризуется:
 - предварительным удалением воздуха из аппарата при высоком влагосодержании древесины и ведением стадии нагрева при пониженном давлении среды;
 - предварительным напуском воздуха в аппарат перед стадией нагрева и проведением нагрева древесины при атмосферном давлении среды в камере при влагосодержании материала ниже 30 %.
3. Разработаны рациональные режимные параметры предложенного способа сушки древесины: стадию СВЧ-нагрева целесообразно осуществлять до достижения

температуры в центре материала 70 °С; стадию «вакуумирования» осуществлять понижением давления среды до 5 – 10 кПа и выдержкой под вакуумом до достижения поверхностью материала температуры кипения воды при данном давлении среды и создания градиента температуры по сечению 1,3 °С/мм, что обеспечивает наименьшую общую продолжительность процесса без развития значительных внутренних напряжений.

4. Разработана схема энергоэффективного способа ведения процесса вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме с энергообеспечением, осуществляемым электрогенератором, работающим за счет выработки электроэнергии из отходов деревообработки.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость результатов исследования процесса вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме заключается в разработке математического описания данного процесса, позволяющего в режиме программного моделирования определить влияние режимных параметров на температурные и влажностные поля в материале и продолжительность отдельных стадий процесса.

Практическая значимость полученных научных результатов заключается в разработке технологии вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов, осуществляемой в осциллирующем режиме, и аппаратурного оформления процесса, обеспечивающего проведение предложенной технологии с использованием альтернативных источников энергии, а также в разработке соответствующей инженерной методики расчета сушильного комплекса.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовались положения теории сушки коллоидных материалов капиллярно-пористой структуры в электромагнитном поле, теоретические и экспериментальные данные по механизму процесса тепломассопереноса внутри древесины в ходе нагрева в СВЧ поле, методы математического и физического моделирования. Статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась в средах Microsoft Excel и Mathcad.

Положения, выносимые на защиту. В процессе выполнения работы лично соискателем получены следующие научные результаты:

1. Математическая модель процессов тепломассопереноса при вакуумной СВЧ-сушке пиломатериалов в режиме осцилляции давления среды, учитывающая зависимость удельной мощности СВЧ излучения от характера распределения основных параметров электромагнитного поля, температуры и влагосодержания древесины.

2. Результаты исследования распределения полей температуры и влагосодержания по сечению сортамента при осциллирующем подводе СВЧ энергии с частотой 2450 МГц и направленном действии СВЧ магнетрона перпендикулярно пласти материала.

3. Рациональные режимные параметры, позволяющие обеспечить равномерное по слоям удаление влаги из пиломатериала на протяжении процесса сушки.

4. Схема включения источника электромагнитного излучения относительно штабеля пиломатериалов.

5. Схема энергоэффективного сушильного комплекса, работающего в осциллирующем режиме на альтернативных источниках энергии, инженерная методика расчета его основных конструктивных характеристик, обоснование экономической целесообразности его внедрения в производство.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались:

- на международных конференциях: «Актуальные проблемы лесного комплекса» (Брянск, 2017 г., 2020 г.); «Наука молодых – будущее России» (Курск, 2017 г.); «Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса» (Кострома, 2021 г.); «Будущее науки» (Курск, 2018 г., 2021 г.); «Инновационные технологии, оборудование и материалы» (Казань, 2020 г.); «Техника и технологии: пути инновационного развития» (Курск, 2018 г.); International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (Албена, Болгария, 2019 г., 2020 г.); «Современные материалы, техника и технология» (Курск, 2022 г.);
- на всероссийских конференциях: «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки» (Казань, 2023 г.); «Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты» (Москва, 2022 г.); «Вакуумная техника и технология» (Казань, 2021 г.); «Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России» (Йошкар-Ола, 2017 г.);
- на научных сессиях по технологическим процессам ФГБОУ ВО «КНИТУ» (Казань, 2017-2022 гг.).

Результаты исследований отмечены: дипломом победителя научно-исследовательских проектов аспирантов КНИТУ «ТехноСтарт» (2020 г.), стипендией Президента Российской Федерации по приоритетным направлениям подготовки за высокие достижения в учебе и научной работе (2021 – 2022 г.), дипломом победителя в конкурсе 50 инновационных идей для Республики Татарстан в номинации «Старт инноваций» (2022 г.), грантом Академии наук РТ (2023 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований автором опубликовано 18 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, включенных в Перечень ВАК, 3 статьи в изданиях, входящих в реферативную базу Scopus, 1 патент на изобретение.

Личное участие автора в работе заключается в выборе темы и разработке основных идей диссертации, в постановке и решении задач теоретического, экспериментального и прикладного характера, в обобщении полученных результатов при проведении экспериментальных исследований и математического моделирования в виде статей и докладов, в формулировании научных выводов.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Основные результаты диссертационной работы соответствуют п. 4. «Технология и продукция в производствах: лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном, деревообрабатывающем, целлюлозно-бумажном, лесохимическом и сопутствующих им производствах» и п. 7. «Технологические комплексы, производственные процессы, поточные и автоматические линии, машины и агрегаты в лесном хозяйстве и лесной промышленности» паспорта специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины.

Достоверность результатов исследований подтверждается их сопоставимостью с основными положениями теории тепломассообменных процессов и мировым опытом в области сушки пиломатериалов в электромагнитном СВЧ поле, а также результатами статистической обработки данных математического моделирования. Расхождение теоретических и экспериментальных данных находится в пределах 18 %.

Предмет и объект исследования. Предметом исследования является технология сушки пиломатериалов в условиях чередования стадий нагрева материала СВЧ энергией и

постепенного понижения давления среды. Объектом исследования являются сортаменты сосны, березы и дуба.

Реализация результатов исследования. Результаты научных исследований СВЧ сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме приняты к внедрению на ООО «НПП ТермоДревПром» (г. Казань) для получения равномерно высушенных пиломатериалов высокого качества.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Диссертационная работа изложена на 129 страницах, включающих 39 рисунков и 12 таблиц. Библиографический список включает 103 наименования цитируемых работ, из них 83 источника российских авторов и 20 наименований работ зарубежных исследователей.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, представлена научная новизна и практическая значимость, дана общая характеристика работы.

В первой главе проведен анализ исследований в области СВЧ-сушки древесины. Рассмотрены физические основы процесса распространения электромагнитных СВЧ волн в диэлектрическом материале. Изучено и проанализировано влияние СВЧ излучения в процессе сушки древесины при постоянном атмосферном давлении в аппарате. Полученная в ходе анализа информация позволила выявить, что применение СВЧ нагрева при атмосферном давлении среды является проблематичным и достаточно сложно регулируемым без применения комбинированных технологий вследствие возникновения сложного профиля температуры внутри пиломатериала.

Вторая глава посвящена разработке метода расчета процесса сушки пиломатериалов в условиях вакуумных СВЧ аппаратов. Приведена физическая картина и формализация процессов и явлений, протекающих при сушке пиломатериалов, на основании которых было разработано математическое описание процессов вакуумной сушки пиломатериалов при СВЧ подводе тепловой энергии.

Математическая модель осциллирующей вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов представлена в виде взаимосвязанных математических описаний стадии нагрева, протекающей в двух вариантах: нагрев за счет испаряющейся влаги, с предварительным удалением воздуха из аппарата; нагрев в среде воздуха при атмосферном давлении в аппарате и стадии вакуумирования.

Расчет процессов нагрева при СВЧ-сушке пиломатериалов основывается на решении дифференциальных уравнений тепломассопереноса в условиях внутренней задачи. Изменение во времени полей влажности, температуры и давления в материале определяется уравнениями, выраженными в следующей форме:

$$c_M \rho_M \cdot \frac{\partial T_M}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_M \cdot \left(\frac{\partial T_M}{\partial x} \right) \right) + q_{\text{СВЧ}}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_M}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 U_M}{\partial x^2} + a \delta \frac{\partial^2 T_M}{\partial x^2} + \frac{k_p}{\rho_0} \cdot \frac{\partial^2 p_M}{\partial x^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p_M}{\partial \tau} = \frac{RT_M}{\Pi_0 \mu} \left[k_p \frac{\partial^2 p_M}{\partial x^2} + \xi \cdot \rho_0 \frac{\partial U_M}{\partial \tau} \right] + \frac{p_M}{T_M} \left(\frac{\partial T_M}{\partial \tau} \right). \quad (3)$$

Краевые условия для решения систем дифференциальных уравнений (1) – (3) можно представить в следующем виде:

- начальные условия, применительно к первому циклу

$$T_M(0; x) = \text{const}; \quad (4) \quad U_M(0; x) = \text{const}; \quad (5) \quad p_M(0; x) = \text{const}. \quad (6)$$

- граничные условия

$$\alpha (T_{\text{пов.м.}} - T) = -\lambda_M \frac{\partial T_M}{\partial x} - r \cdot j + q_{\text{свч}}; \quad (7)$$

$$j = \beta (U_M - U_{\text{равн.}}); \quad (8) \quad p_M(\tau; 0) = P_{\text{кам.}}. \quad (9)$$

В качестве источника теплоты в процессе нагрева и сушки материала используется СВЧ энергия. Удельная мощность, определяющая количество тепла, выделенного при СВЧ-нагреве в единице объема высушиваемого материала, определяется как:

$$q_{\text{свч}} = 0,556 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon \cdot \text{tg} \sigma \cdot f \cdot E^2. \quad (10)$$

Напряженность электрического поля, которое создает точечный заряд, в уравнении (10) определяется законом Кулона (11). При этом заряд определяется выражением (12):

$$E = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{q_3}{r^2}; \quad (11) \quad q_3 = C_0 \cdot U. \quad (12)$$

Емкость конденсатора в этом случае может быть определена выражением:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{h}. \quad (13)$$

Для описания доли подведенной мощности, которая поглощается древесиной и превращается в теплоту, применяют тангенс угла диэлектрических потерь:

$$\text{tg} \sigma = \frac{\sigma_f}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon}. \quad (14)$$

Угловая частота и полная удельная активная проводимость на данной частоте в уравнении (14) определяется как:

$$\omega = 2\pi f; \quad (15) \quad \sigma_f = \frac{1}{R}. \quad (16)$$

Изменение температуры среды в процессе СВЧ-нагрева материала определяется из теплового баланса:

$$\rho_{\text{см}} c_{\text{см}} V_{\text{св}} dT = \alpha (T_{\text{м.пов}} - T) F_M d\tau + c_{\text{п}} F_M j_{\text{пов}} T_{\text{пов}} d\tau, \quad (17)$$

откуда определяем изменение температуры среды в камере:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\alpha F_M (T_{\text{м.пов}} - T) + c_{\text{п}} F_M j_{\text{пов}} T_{\text{пов}}}{\rho_{\text{см}} c_{\text{см}} V_{\text{св}}}. \quad (18)$$

Таким образом, система уравнений (1) – (18) описывает стадию нагрева пилломатериала при осциллирующей СВЧ-сушке.

Следующей стадий осциллирующей СВЧ сушки пиломатериалов является вакуумирование. Тепломассоперенос для парогазовой фазы в условиях непрерывного понижения давления среды, а также при отсутствии полей скорости, температуры, плотности пара и инертного газа во внешней среде, определяется уравнениями материального и теплового балансов:

$$V_{CB} d\rho_{II} = dm_{II} - dm_{C,II}; \quad (19) \quad V_{CB} d\rho_r = -dm_{C,r}; \quad (20)$$

$$\rho_{CM} c_{CM} V_{CB} dT = \alpha(T_{M,пов} - T)F_M d\tau - Q_{C,II} \rho_{CM} c_{CM} T d\tau + c_{II} F_M j_{пов} T_{пов} d\tau. \quad (21)$$

Левая часть уравнения (19) характеризует скорость изменения массы пара в парогазовой фазе в единице свободного объема аппарата; первое слагаемое правой части – скорость подвода массы пара в парогазовую фазу, второе слагаемое – скорость его отвода в вакуумную линию. Соотношение (20) отличается от (21) отсутствием слагаемого, характеризующего подвод массы воздуха в единицу свободного объема вследствие герметичности аппарата.

В уравнении переноса энергии (21) левая часть представляет собой изменение теплосодержания парогазовой фазы; первый член правой части уравнения характеризует подвод или отвод тепла за счет теплообмена с поверхностью влажного материала; второй член – отвод тепла, удаляемого в вакуумную линию с парогазовой смесью; третий – приток тепла с парами влаги, удаляемыми из материала.

Отсюда изменение давления и температуры среды описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dp_r}{d\tau} = p_r \left(\frac{1}{T} \frac{dT}{d\tau} - \frac{Q_{C,r}}{V_{CB}} \right); \quad (26) \quad \frac{dp_{II}}{d\tau} = \frac{F \cdot R \cdot T}{V_{CB} \mu_{II}} j_{II} - p_{II} \left(\frac{Q_{C,II}}{V_{CB}} - \frac{1}{T} \frac{dT}{d\tau} \right); \quad (27)$$

$$\frac{dT}{d\tau} = \left[\frac{(\alpha F_M (T_{M,пов} - T) + c_{II} F_M j_{пов} T_{пов}) R}{(\mu_{II} p_{II} + \mu_r p_r) c_{CM} V_{CB}} - \frac{Q_{C,II}}{V_{CB}} \right] T. \quad (28)$$

На стадии вакуумирования происходит отключение магнетронов, и сушка древесины осуществляется за счет аккумулированной в процессе СВЧ-нагрева энергии. В этом случае изменения во времени полей влажности, температуры и давления в материале описываются дифференциальными уравнениями (1) – (3) без слагаемого, учитывающего внутренний источник тепла $q_{свч}$. Граничные условия для решения дифференциальных уравнений аналогичны выражениям (7) – (9) с тем отличием, что в уравнении (7) также отсутствует слагаемое $q_{свч}$, учитывающее подвод тепла СВЧ-энергией.

Разработан алгоритм расчета, позволяющий при выборе одного из режимов СВЧ нагрева с наличием или отсутствием воздуха в аппарате, определить количество циклов чередования режимов и продолжительность каждой стадии осциллирующей вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований процесса вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме, проведена проверка математической модели на адекватность и определены рациональные режимные параметры процесса.

Для проведения экспериментальных исследований процесса осциллирующей вакуумной СВЧ-сушки сортиментов создана экспериментальная установка (рис.1), работающая по следующему принципу. Высушиваемый образец 7, обладающий высокой естественной влажностью, на начальном этапе взвешивается и в него для замера

температуры в центре, через подготовленное в образце отверстие устанавливается термопара 8; для замера температуры поверхности термопара устанавливается в камере поверхностной зоне, а для определения значения температуры среды в камере используется третья термопара. После этого образец помещается в камеру сушки 1 на тарелку 5 тензометрического датчика 6, регистрирующего в постоянном режиме текущую массу образца. Далее камеру сушки 1 герметизируют с помощью крышки и начинают процесс сушки. Осциллирующий режим СВЧ-сушки пиломатериалов состоит из чередующихся стадий нагрева и вакуумирования. Стадия нагрева осуществляется в двух

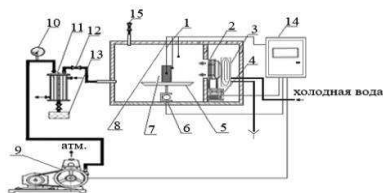


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

режимах: 1) с предварительным удалением воздуха из аппарата при высоком влагосодержании древесины и ведением стадии нагрева при пониженном давлении среды; 2) предварительным напуском воздуха в аппарат перед стадией нагрева и проведением нагрева древесины при атмосферном давлении среды в камере при влагосодержании материала ниже 30 %.

В первом режиме процесс начинается с создания в камере разрежения путем включения вакуумного насоса 9 с вакуумметром 10 и снижения давления в камере до значения не более 2,5 кПа. После чего начинается стадия нагрева путем включения в работу модуля СВЧ-нагрева, расположенного в технической зоне камеры 1 и состоящего из СВЧ-магнетрона 2 с волноводами, высоковольтного конденсатора 4 и системы водяного охлаждения 3, состоящей из медных трубок, шлангов. После завершения стадии нагрева происходит отключение СВЧ-магнетрона 2 с последующим переходом к стадии понижения давления – для этого в работу включается конденсатор 11. После завершения стадии конденсации цикл «нагрев-выдержка» повторяется.

Во втором режиме процесс начинается с нагрева древесины при атмосферном давлении включением модуля СВЧ нагрева. Затем происходит отключение СВЧ магнетрона 2 и начинается стадия вакуумирования путем включения в работу вакуумного насоса 9 вакуумным краном 12 и конденсатора 11 для постепенного понижения давления в аппарате с последующей выдержкой при постоянном пониженном давлении. После завершения одного цикла процесса открывается кран 15 для напуска сухого воздуха в камеру и цикл «нагрев-вакуум» повторяется.

По результатам математического моделирования одного цикла процесса вакуумной СВЧ-сушки сортаментов сосны в режиме осцилляции давления среды были получены кривые, характеризующие изменение полей температуры и влагосодержания в материале при нагреве сортамента с расположением СВЧ магнетрона с одной стороны образца. Анализ полученных кривых установил, что при нагреве сортамента только с одной стороны на каждой стадии цикла постоянно наблюдается перекося температуры и влагосодержания. По этой причине, необходимо проводить нагрев сортамента с двух противоположных сторон с чередующим включением источника СВЧ излучения для выравнивания картины сушки. Результаты вычислений стадии нагрева и вакуумирования толстых сортаментов с начальным влагосодержанием 60 % при расположении излучателя СВЧ энергии условно «справа», «слева» от сортамента и облучением перпендикулярно к пласти представлены на рис.2.

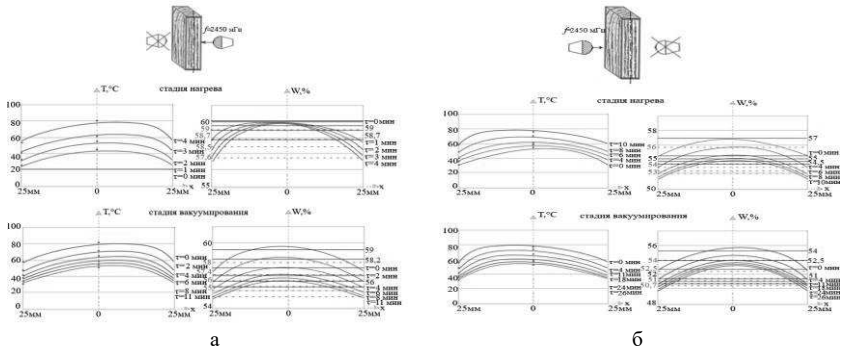


Рисунок 2 – Распределение температуры и влагосодержания по сечению сортимента при облучении перпендикулярно пласти с включением СВЧ-магнетрона (а) справа (цикл №1) и (б) слева (цикл №2)

Из характера кривых (рис.2 а) видно, что на стадии нагрева в связи с тем, что происходит интенсивное испарение влаги с поверхности материала, наблюдается положительное действие градиента температуры на продвижение влаги в материале. В этом случае температура поверхности растет лишь с ростом влажности среды в камере. На этапе вакуумирования влажность начинает постепенно выравниваться и стремится к симметричному распределению относительно оси материала. После завершения одного полного цикла в работу включается второй СВЧ магнетрон, расположенный условно слева от сортимента (рис.2 б) – начинается второй цикл при влажности образца 55 %. В данном случае происходит постепенное смещение пика температуры влево, во время как пик влажности соответственно стремится в противоположную сторону. Таким образом, используя попеременное включение СВЧ магнетронов в различных циклах в сочетании с импульсными режимами, обеспечивается выравнивание температуры и влагосодержания по толщине высушиваемого образца.

В ходе проведенного выше математического моделирования были рассмотрены картины процесса вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов только по первым двум начальным циклам осциллирующего режима. Поэтому, для получения общей картины, процесс также был исследован в динамике с несколькими циклами в зависимости от выбранного режима проведения стадии нагрева.

При влагосодержании в материале выше насыщения клеточных стенок целесообразным представляется применять режим, при котором стадия нагрева осуществляется без напуска воздуха в аппарат. Процесс осциллирующей сушки при данном режиме начинается со снижения давления от атмосферного до значения 2,5 кПа с дальнейшим СВЧ нагревом. Стадия нагрева осуществляется до достижения температуры центральной зоны сортимента 70 °С в течение 4 – 6 минут, давление среды при этом достигает 30 кПа за счет испарения влаги. После этого в работу включается конденсатор и начинается стадия понижения давления пара за счет конденсации до значения 2,5 кПа и последующей выдержкой в течении 11 – 15 минут до достижения температуры поверхности порядка 20 °С. При достижении значения температуры центра материала 40 °С, цикл повторяется, в работу включается СВЧ генератор для возобновления нагрева материала, и выключается конденсатор, вследствие чего давление в камере снова начинает расти за счет испарения влаги.

После полного цикла осциллирующей сушки по первому режиму нагрева, когда влагосодержание в материале становится ниже 30 %, происходит переход ко второму режиму. Для этого путем открытия приточно-вытяжных каналов происходит напуск сухого воздуха в камеру сушки, что ведет к повышению давления в аппарате до атмосферного. Стадия нагрева при втором режиме протекает при атмосферном давлении в камере, поскольку позволяет снизить риск развития значительных внутренних напряжений путем минимизации удаления влаги с поверхности материала. Данная стадия считается завершенной при достижении температуры в центре материала 70 °С в течение 10 – 15 минут нагрева. Стадия вакуумирования длится в течение 15 – 26 минут до достижения в центре материала температуры 50 °С с понижением давления в аппарате до 10 кПа.

Для определения оптимальных режимных параметров и рациональной продолжительности процесса вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в режиме осцилляции давления среды было рассмотрено изменение величины влагосъема на стадиях СВЧ нагрева и вакуумирования (рис.3-5). Исходя из полученных данных, было выявлено, что целесообразным представляется проводить нагрев пиломатериалов при поддержании температуры в диапазоне порядка 70 – 80 °С. С увеличением температуры нагрева также происходит увеличение величины влагосъема. Это объясняется тем, что при высоких температурах при наличии свободной влаги в материале возникает значительный молярный перенос за счет создавшегося градиента давления, поэтому при уменьшении влагосодержания образцов ниже влажности предела насыщения клеточных стенок происходит уменьшение величины влагосъема за один цикл сушки.

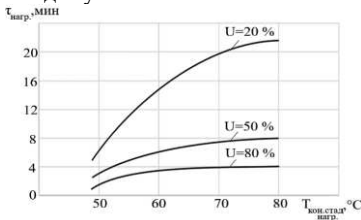


Рисунок 3 – Зависимость продолжительности стадии СВЧ нагрева в одном цикле сушки сосновых сортиментов ($s = 50$ мм) при разном содержании влаги от величины конечной температуры нагрева

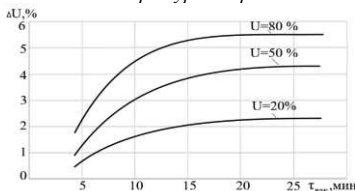


Рисунок 5 – Зависимость величины влагосъема за один полный цикл сушки сосновых сортиментов ($s = 50$ мм) при разном содержании влаги от продолжительности стадии вакуумирования

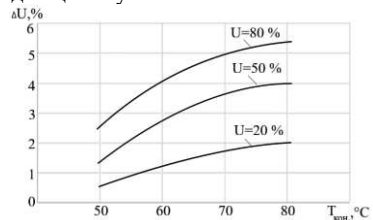


Рисунок 4 – Зависимость величины влагосъема за один полный цикл при сушке сосновых сортиментов ($s = 50$ мм) при разном содержании влаги от величины конечной температуры нагрева

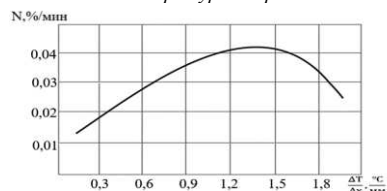


Рисунок 6 – Зависимость средней скорости сушки соснового образца от конечной величины градиента температуры по толщине на стадиях вакуумирования

На рисунке 5 представлена зависимость величины влагосъема при сушке в осциллирующем режиме сосновых пиломатериалов толщиной 50 мм при разном содержании влаги в образцах от продолжительности стадии вакуумирования. Установлено, что с увеличением продолжительности процесса и содержания влаги в материале влагосъем увеличивается. Дальнейшее увеличение времени не приводит к значительному росту влагосъема. В этой связи целесообразным представляется регулировать данную величину не по времени, а по конечному значению градиента температуры (рис.6). Из характера кривой на рисунке 6 видно, что конечное значение градиента температуры на стадии «паузы» в интервале 1,3 – 1,4 °С/мм позволяет высушивать пиломатериал при наименьшей продолжительности.

В четвертой главе представлены рекомендации к промышленному использованию результатов исследований процесса осциллирующей СВЧ-сушки пиломатериалов, разработана инженерная методика расчета основных конструктивных и энергетических параметров промышленной установки и обоснование экономической целесообразности предлагаемой технологии сушки.

Установлено, что для повышения энергоэффективности технологического процесса сушки целесообразным представляется использование альтернативных источников энергии, в частности, отходов деревообработки. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать схему процесса СВЧ-сушки пиломатериалов с применением разных режимов осциллирующей сушки, при которых на стадии нагрева используется СВЧ-магнетрон, а на стадии вакуумирования в работу включается вакуумный насос и /или тепловой насос. Энергоснабжение СВЧ-магнетрона, теплового и вакуумного насосов осуществляется от электрогенератора, работающего на генераторном газе, получаемом из отходов деревообработки, что обеспечивает автономность работы всей установки (рис.7).

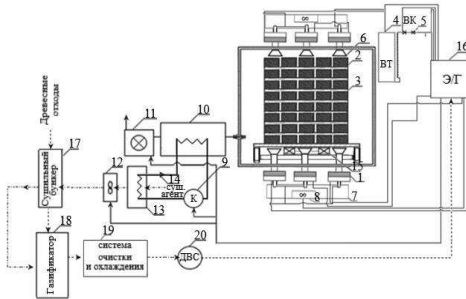


Рисунок 7 – Пилотная установка для сушки пиломатериалов в СВЧ среде: 1 – СВЧ-магнетрон; 2 – ряд пиломатериалов; 3 – шпации; 4 – высоковольтный трансформатор; 5 – высоковольтный конденсатор; 6 – рупор; 7 – система охлаждения; 8, 12 – вентилятор; 9 – компрессор ТН; 10 – конденсатор; 11 – вакуумный насос; 13 – калорифер; 14 – дроссель; 15 – тензодатчик; 16 – электрогенератор; 17 – сушильный бункер; 18 – газификатор; 19 – система очистки газа; 20 – ДВС

По инженерной методике расчета была создана номограмма (рис.8), позволяющая определить требуемую мощность электрогенератора от объема загрузки сушильной камеры и толщины высушиваемых пиломатериалов.

Результаты научных исследований приняты к внедрению на ООО «НПП «ТермоДревПром»» (г. Казань) для повышения производительности процесса сушки древесины. Экономический анализ показал, что по сравнению с классической конвективной камерой предлагаемая вакуумная СВЧ установка обладает большей производительностью благодаря сокращению продолжительности процесса сушки в 5 раз относительно прототипа. Это обуславливает снижение удельных энергетических затрат на

сушку 1 м³ пиломатериалов и выражается в годовой экономии денежных средств в размере более 5 млн. руб.

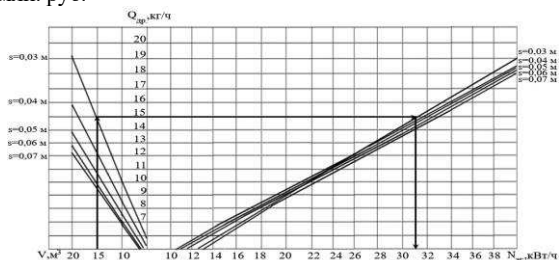


Рисунок 8 – Номограмма расчета требуемой мощности электрогенератора в зависимости от объема загрузки сушильной камеры и толщины высушиваемых пиломатериалов

В приложении представлены: статистическая обработка расчетных и экспериментальных данных; результаты численных исследований изменения температуры и влагосодержания древесины при двухстороннем воздействии СВЧ энергии; параметры инженерного расчета сушильного комплекса; акт внедрения; патент.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель процесса сушки пиломатериалов в режиме осцилляции давления среды, прогнозирующая изменение полей температуры и влагосодержания пиломатериалов в зависимости от удаленности и удельной мощности источника СВЧ излучения на стадии нагрева и режимных параметров на стадии вакуумирования. Математическая модель не ограничена конкретной породой древесины и может быть применена для пиломатериалов любых сортов.

2. Проведены эксперименты и математическое моделирование процесса вакуумной СВЧ сушки сортиментов в режиме осцилляции давления среды. Установлено, что стадию «нагрева» пиломатериалов целесообразно проводить в двух режимах: 1) с предварительным удалением воздуха из аппарата – при влагосодержании древесины выше 30 % и 2) путем предварительного напуска воздуха в аппарат перед стадией нагрева и проведение данной стадии при атмосферном давлении среды в камере при влагосодержании древесины ниже 30 %.

3. Определены рациональные режимные параметры процесса осциллирующей вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов. Установлено, что при высоком содержании влаги в сортименте процесс начинается с предварительного удаления воздуха из аппарата без подвода СВЧ энергии. Далее включением СВЧ генератора осуществляется стадия нагрева, завершающаяся при достижении температуры в центре пиломатериала 70 °С. После этого в работу включается конденсатор и начинается стадия понижения давления путем конденсации пара. Данная стадия завершается при достижении температуры по сечению не более 1,3 °С/мм. В таком режиме цикл повторяется до достижения пиломатериалами влажности 30 %. Далее происходит переход ко второму режиму сушки, путем напуска воздуха в аппарат до достижения в камере атмосферного давления. Далее проводится стадия нагрева при атмосферном давлении среды, которая осуществляется до достижения пиломатериалами в центре температуры 70 °С. После этого осуществляется стадия вакуумирования включением конденсатора и вакуумного насоса. Продолжительность стадий вакуумирования определяется конечной величиной градиента температуры по толщине высушиваемой древесины, равной 1,3 °С/мм, что сокращает продолжительность всего процесса сушки при незначительном увеличении числа циклов «нагрев-вакуумирование».

4. Разработана эффективная схема подвода электромагнитной энергии к штабелю пиломатериалов. Было установлено, что для повышения равномерности распределения

влажности по сечению сортимента, необходимо проводить процесс сушки, применяя чередующуюся схему включения магнетронов (в нечетных циклах включаются магнетроны с одной стороны; в четных – с другой).

5. Разработан сушильный комплекс с СВЧ подводом тепловой энергии, работающий в режиме осцилляции давления среды, энергоснабжение которого осуществляется от электрогенератора, питающегося генераторным газом, получаемым из отходов деревообработки, что обеспечивает автономность работы сушильного комплекса.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования

Дальнейшие перспективы развития предложенного комбинированного способа СВЧ-сушки видятся в оптимизации работы генераторной установки и эффективного использования альтернативного топлива, в том числе посредством внедрения автоматизированной системы управления комплексом при сушке разных сортиментов.

Основные обозначения: T, t – температура, °C; P, p – полное и парциальное давление, Па; m – масса, кг; V – объем, м³; ρ – плотность материала, кг/м³; U – влагосодержание материала, %; μ – молярная масса, кг/кмоль; c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C); λ – коэффициент теплопроводности, Дж/(м·с·°C); g – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; ξ – критерий парообразования; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·°C); a_r – коэффициент температуропроводности, м²/с; a_m – коэффициент массопроводности, м²/с; δ – относительный термоградиентный коэффициент, 1/°C; α – коэффициент теплоотдачи, Дж/(м²·с·°C); v – скорость потока воздуха, м/с; β – коэффициент массоотдачи, м/с; k_p – коэффициент фильтрационного массопереноса, с; K – коэффициент теплопередачи, Дж/(м²·с·°C); τ – текущее время, с; F – площадь поверхности, м²; j – поток массы, кг/(м²·с); $q_{свч}$ – мощность СВЧ излучения, Дж/(с·м³); ϵ – диэлектрическая проницаемость, Ф/м; $tg\sigma$ – тангенс угла диэлектрических потерь; f – частота тока, Гц; E – напряженность электрического поля, В/м; C_0 – емкость конденсатора, Ф; S – площадь обкладки конденсатора, м²; h – размер образца в направлении действия диэлектрического поля, м; σ_f – полная удельная активная проводимость на данной частоте, См/м; ω – угловая частота, рад/с; q_i – заряд, Кл; r – расстояние от заряда, создающего поле до точки в котором ищем поле; СВЧ-ген. – сверхвысокочастотный генератор, кВт.

Индексы: 0 – начальный; кам – камера; м – материал; св – свободный; с.г – система удаления газа; с.п – система удаления пара; пов – поверхность; равн – равновесное.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. Кайнов П.А. Математическая модель процесса сушки пиломатериалов в вакуумной СВЧ установке / Мухаметзянов Ш.Р., Шамсутдинова А.И., Мухтарова А.Р. // Деревообрабатывающая промышленность. – 2017. – №4. – С.17-21.

2. Шageeva А.И. Математическое моделирование процессов СВЧ сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме / Кайнов П.А., Сафин Р.Р., Хасаншин Р.Р. // Деревообрабатывающая промышленность. – 2022. – №2. – С.44-54.

3. Шageeva А.И. Разработка эффективной схемы энергообеспечения процесса вакуумной СВЧ сушки пиломатериалов / Кайнов П.А., Сафин Р.Р. // Деревообрабатывающая промышленность. – 2022. – №3. – С.28-34.

4. Шageeva А.И. Моделирование осциллирующей сушки пиломатериалов при перпендикулярном к пласти подводке СВЧ-энергии / Сафин Р.Р., Кайнов П.А. // Деревообрабатывающая промышленность. – 2023. – №2. – С.45-51.

Статьи в научных изданиях, индексируемых базой данных Scopus:

5. Mukhametzyanov S.R. Alternative energy in vegetable and crushed wood raw materials drying processes / Safin R.R., Ilalova G.F., Mukhtarova A.R., Shageeva A.I. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, All-Russian Scientific-Technical Conference on Digital Technologies in Forest – 2020. Vol.507. – P.12024.

6. Safiullina A.Kh. Self-contained energy-saving plant for drying vegetable raw materials / Kainov P.A., Safin R.R., Mukhametzyanov S.R., **Shageeva A.I.** // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM – 2020. – Vol. 4.1. – P. 253-260.

7. **Shageeva A.I.** Formation of a mathematical model for the use of SHF technology in the drying of agricultural plant raw material / Safin R.R., Kainov P.A. // Proceedings of SPIE, International Conference on Digital Transformation: Informatics, Economics and Education, DTIEE 2023. – 2023. – P. 1263717.

Патент:

8. Патент № 2732325 Российская Федерация, МПК F26B9/06, F26B21/04. Конденсационная сушилка: № 2019135787 : заявл. 06.11.2019; опубл. 15.09.2020 / Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р., **Шагеева А.И.**, [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «КНИТУ». – 9 с.

Труды в прочих изданиях:

9. Сафин Р.Р. Вакуумная СВЧ сушка древесины: формулирование математической модели / **Шамсутдинова А.И.**, Илалова Г.Ф., Мухтарова А.Р. // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2017. – № 50. – С. 53-56.

10. **Шамсутдинова А.И.** Вакуумная СВЧ сушка древесины: математическая модель переноса влаги / Илалова Г.Ф. // Инженерные кадры - будущее инновационной экономики России. – 2017. – № 2. – С. 160-164.

11. **Шамсутдинова А.И.** Исследование энергоэффективности установки для сушки и термовлажностной обработки измельченной древесины / Хасаншин Р.Р. // Инженерные кадры - будущее инновационной экономики России. – 2018. – № 2. – С. 159-161.

12. **Шамсутдинова А.И.** Моделирование процессов сушки пиломатериала в вакуумной СВЧ установке / Кайнов П.А. // Сборник научных статей 8-ой Международной молодежной научной конференции. – 2018. – Том 4. – С. 313-316.

13. Саерова К.В. СВЧ-вакуумная сушка льняного волокна / Мухтарова А.Р., Илалова Г.Ф., **Шамсутдинова А.И.**, Галияетдинов Н.Р. // Сборник научных статей 7-ой Международной научно-практической конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития». – 2018. – С. 246-249.

14. **Шагеева А.И.** Математическое моделирование процессов сушки пиломатериалов в СВЧ-среде / Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р., Порфирьева К.М. // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2020. – № 57. – С. 71-74.

15. **Шагеева А.И.** Разработка экспериментальной установки сушки и термической обработки древесных материалов в вакуумной СВЧ среде / Мухаметзянов Ш.Р., Кайнов П.А. // Сборник научных статей 9-ой Международной научной конференции «Будущее науки – 2021». – 2021 г. – С. 331-334.

16. Саерова К.В. Исследование процессов сушки древесины в вакуумной СВЧ камере / **Шагеева А.И.**, Сафин Р.Р., Мухаметзянов Ш.Р. // Сборник материалов 10-й научно-технической конференции «Вакуумная техника и технология». – 2021 г. – С. 135-136.

17. **Шагеева А.И.** Разработка автономного комплекса для СВЧ сушки древесных материалов с применением альтернативных источников энергии / Маннапов А.Р., Шагеев Ф.Ф. // Сборник научных статей 12-ой Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология». – 2022. – С. 417-420.

18. **Шагеева А.И.** Применение и влияние СВЧ-нагрева на операции сушки древесных материалов для повышения эффективности протекающих процессов // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деравопереработки». – 2023. – С. 401-404.