

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Казанский национальный исследовательский технологический университет»

На правах рукописи



Шагеева Адиля Ильдусовна

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

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Сафин Р.Р.

Казань – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СВЧ-СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ.....	13
1.1. Физические основы процесса СВЧ-нагрева материала.....	13
1.2. Анализ применения СВЧ-нагрева в процессах сушки древесины....	15
1.3. Импульсные режимы сушки пиломатериалов.....	26
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВАКУУМНЫХ СВЧ-АППАРАТОВ	30
2.1. Физическая картина процесса	30
2.2. Формализация процесса	34
2.3. Математическое описание процессов вакуумной сушки пиломатериалов при СВЧ подводе тепловой энергии.....	35
2.3.1. Тепломассоперенос в процессе СВЧ-нагрева пиломатериала.....	36
2.3.2. Тепломассоперенос в условиях понижения давления среды.....	39
2.4. Алгоритм расчета процесса вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме.....	44
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВАКУУМНОЙ СВЧ-СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ.....	46
3.1. Описание экспериментальной установки для исследований процессов, протекающих при СВЧ-сушке в вакуумной среде.....	46
3.2. Методика проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных.....	48
3.3. Анализ результатов математического моделирования и экспериментальных исследований процесса осциллирующей сушки пиломатериалов в СВЧ-среде.....	51
ГЛАВА 4. РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРОМЫШЛЕННОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ СВЧ-СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ.....	76
4.1. Автономная энергосберегающая установка СВЧ-сушки пиломатериалов.....	76
4.2. Методика расчета вакуумной СВЧ камеры, реализующей осциллирующий режим конденсационной сушки.....	82
4.2.1. Определение основных конструктивных параметров сушильной камеры.....	82
4.2.2. Тепловой и аэродинамический расчет сушильной камеры.....	84
4.2.3. Расчет системы газификации.....	87
4.3. Рекомендации по режимным параметрам осциллирующей сушки пиломатериалов в вакуумной СВЧ установке.....	89
4.4. Техничко-экономический анализ эффективности внедрения вакуумной СВЧ-камеры для сушки древесины.....	92

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	96
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	99
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	103
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	115
Приложение А. Статическая обработка результатов исследований.....	116
Приложение Б1. Результаты численных исследований изменения температуры и влагосодержания древесины при двухстороннем воздействии СВЧ энергии.....	124
Приложение Б2. Параметры инженерного расчета сушильного комплекса.....	127
Приложение В. Акт внедрения.....	128
Приложение Г. Патент.....	129

ВВЕДЕНИЕ

Согласно Стратегии развития лесного комплекса и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2030 года приоритетным направлением является обеспечение деревообрабатывающих и сельскохозяйственных предприятий современным высокотехнологичным отечественным оборудованием для повышения долгосрочной конкурентоспособности получаемой продукции. В связи с интенсивным ростом потребления возобновляемых древесных и топливно-энергетических ресурсов поиск и внедрение новых эффективных и энергосберегающих технологий и способов обработки древесины является одним из важнейших направлений в деревообработке.

Актуальность темы. Процесс сушки является ключевой составляющей технологии производства пиломатериалов, а также наиболее энергоемкой и трудоемкой операцией, во многом определяющей качество получаемого продукта. На сегодняшний день широко известны способы сушки древесины, осуществляемые в условиях вакуумных аппаратов с подводом тепловой энергии контактным или конвективным методами. Каждый из этих способов обладает определенным рядом преимуществ и недостатков, однако для всех этих методов наиболее важной остается проблема большой продолжительности процесса. В связи с этим стремление к сокращению временных затрат подталкивает исследователей к поиску новых оптимальных технологий 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 способствует интенсификации процесса за счет объемного нагревания

материала, что позволяет создать градиент температуры, содействующий движению влаги к поверхности материала на протяжении всего процесса.

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 то же время одним из направлений развития сушильных технологий, позволяющих провести высококачественную сушку пиломатериалов без значительных перепадов влажности по толщине, является использование «импульсных» режимов, которые применительно к вакуумным технологиям получили развитие в виде осциллирующей сушки. Осциллирующий режим проводится циклами и представляет собой сушку с попеременно чередующимися стадиями нагрева и вакуумирования, состоящего из двух этапов – постепенного понижения давления в камере и выдержки при определенном значении вакуума.

Одним из наиболее изученных и используемых в промышленности осциллирующих режимов сушки древесины является вакуумно-конвективный способ, при котором происходит нагрев в среде горячего воздуха с последующим созданием вакуума. 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. Одним из первых отечественных исследователей, изучавших способ обезвоживания древесины с помощью электромагнитных полей, был Н.С. Селюгин. 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 [12, 36, 43, 44, 56, 68]. Благодаря их трудам разработаны конструкции вакуумных СВЧ-камер, отлажены режимы сушки отдельных пород древесины, научно обоснована возможность применения комбинированной конвективно-вакуумно-высокочастотной сушки [48, 49]. Вопросам СВЧ сушки древесных материалов, в том числе трудносохнущих пород и мореного дуба посвящены работы А.М. Бомбина, Н.В. Скуратовича, Е.В. Недорезовой [47]. Весомый вклад в исследование данных вопросов внесли и зарубежные авторы. Вопросам теплопереноса в технологиях сушки древесины и математическому моделированию данных процессов посвящены работы ученых N. Deliiski, R. Younsi, S. Poncsak, D. Kocaefe, D. Jia, M. Afzal, Xian-Jun Li, Bi-Guang Zhang, Wen-Jun Li, Sungsoontorn, S. [91, 96]; вопросам влияния процессов сушки на физико-механические, химические и эксплуатационные свойства материалов – A. Antti, D. Guanben, N.

Mollekopf, Ashis, K., Imenokhoyev I., Leiker, M., Raaholt, B.W., Ramdane Younsi, Sahbi Ouertani [86, 89].

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 тепломассопереноса 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 материал ниже 30 %, что способствует интенсификации удаления свободной влаги на начальном этапе и контролируемому развитию внутренних напряжений на этапе удаления связанной влаги.

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 аппаратного 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 сортимента 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 и инженерная методика расчета его основных конструктивных характеристик, а также 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 гг.), 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, а также 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 из 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 сортименты 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 с высоким качеством.

Теоретические аспекты процессов сушки древесины в СВЧ поле использованы в учебном процессе бакалавров по направлению подготовки 35.03.02 Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств при формировании лекционного материала, а экспериментальная установка и практические результаты исследований использованы при проведении лабораторных работ по дисциплине «Гидротермическая обработка и консервирование древесины» в ФГБОУ ВО «КНИТУ».

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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ СВЧ-СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

1.1. Физические основы процесса СВЧ-нагрева пиломатериалов

Исследования в сфере сверхвысокочастотного (СВЧ) нагрева осуществляются уже более семидесяти лет. Одним из первых, описавших применение электромагнитного поля высоких частот для сушки древесины, в нашей стране был Селюгин Н.С. [67]. За рубежом первые исследования СВЧ-нагрева в процессах сушки датируются 1950 – 1960 годами. Разработками в этой области занимались А. Antti, D. Guanben, N. Mollekorpf, E. Shelton, M. Disman, S. Avramidis.

Сушка в электромагнитном поле может протекать при применении высокочастотного (ВЧ) и сверхвысокочастотного (СВЧ) подвода энергии к древесине. В случае ВЧ энергии к древесине подводятся электроды с напряжением до 10 кВ. В процессе ВЧ сушки древесины широкое применение нашли частоты 5,28 и 13,56 МГц [26,28]. Основное отличие СВЧ от ВЧ сушки – в отсутствии ограничивающих пространство проводников, указывающих направление распределения энергии. Применительно к СВЧ промышленным аппаратам сушки материалов выделяют магнетроны, работающие в диапазоне частот 433, 915 и 2450 МГц. СВЧ-нагрев основывается на высокоэффективном поглощении электромагнитной энергии нагреваемым древесным образцом и ее превращении в теплоту. При этом распределение теплоты в материале происходит совершенно по-другому, нежели при традиционных способах нагрева: центр материала нагревается интенсивнее, чем его поверхность. Физическая сущность СВЧ-нагрева состоит в следующем: переменное электромагнитное поле, именуемое поляризацией, в ходе воздействия на объект нагрева способствует направленному движению внутри материала связанных электрических зарядов.

В случае, если материал имеет в своем составе молекулы воды,

поляризация будет дипольной, что связано с асимметричным расположением атомов водорода по отношению к атому кислорода. Дипольная поляризация состоит в том, что молекулы диполей направлены вдоль электрического поля. В случае, когда отсутствует внешнее электрическое поле, происходит произвольное хаотичное тепловое движение молекул (рис.1.1.а) без определенного выделенного направления. Если поместить диэлектрик в электрическое поле, то за счет электростатической силы диполи будут перевернуты и направлены вдоль силовых линий. Если поменять направление электрического поля на противоположное, то диполи будут поворачиваться и следовать за ним с большой скоростью. При этом степень их ориентации будет напрямую зависеть от напряженности данного поля (рис.1.1.б).

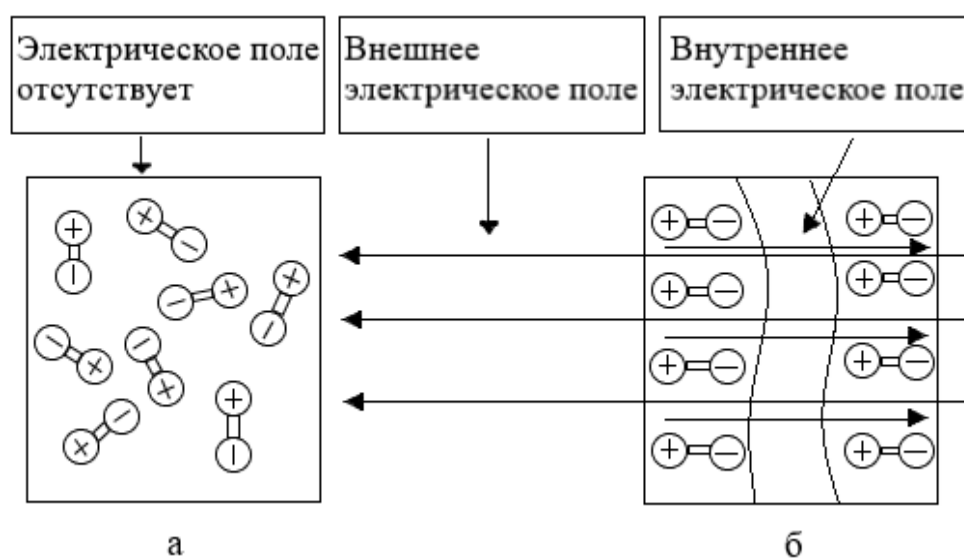


Рисунок 1.1 – Дипольная поляризация диэлектрика под воздействием внешнего электрического поля: а – электрическое поле отсутствует; б – воздействует внешнее электрическое поле

Таким образом, изменение во времени электрического поля в переменном поле конденсатора приводит к движению диполей и соответствующему нагреву диэлектриков.

Напряженность электрического поля представляет собой силовую характеристику данного поля и определяется как отношение силы,

действующей на заряд в электрическом поле, к величине этого заряда. Этот показатель является управляемой векторной физической величиной и зависит от исходной мощности СВЧ излучателя, при этом имеет свое направление, идентичное направлению действующей силы. В процессе сушки с уменьшением диэлектрической проницаемости материала, приводящего к уменьшению выделяемой в древесине теплоты, при проникновении в древесину напряженности электрического поля происходит его экспоненциальное затухание.

Таким образом при падении электромагнитной волны на поверхность диэлектрика часть волны будет отражена, а вторая будет поглощаться диэлектриком, что обусловлено преобразованием электромагнитной энергии в тепловую за счет возникновения переменной поляризации и токов проводимости. Вследствие этого электромагнитная волна будет постепенно затухать.

При этом в диэлектриках волна затухает достаточно медленно и ее глубина проникновения при применении метрового диапазона длин волн составляет десятки метров. Практически равномерный нагрев диэлектриков электромагнитной волной возможен при достаточно больших длинах волн по отношению к размерам нагреваемых тел. Обычно достаточно, чтобы длина волны в диэлектрике в 2 – 3 раза превышала размеры нагреваемого тела [19].

Следует отметить, что в случае падения электромагнитной волны на поверхность материала, обладающего большой удельной электропроводностью, например, на поверхность из алюминия, меди, железа и некоторых сплавов, происходит полное отражение электромагнитной волны, созданной электрическим полем. При этом интенсивность отраженной волны остается идентичной падающей.

1.2. Анализ применения СВЧ нагрева в процессах сушки древесины

В настоящее время наблюдается разнообразный характер технологий сушки древесины: используются конвективные, кондуктивные, микроволновые

и диэлектрические способы подвода тепла к высушиваемому материалу [8,20,26,28,37,50,51,52,54,59,60,62,63,82]. Каждый из этих способов сушки обладает определенными преимуществами и недостатками, однако для всех методов общей остается высокая энергоемкость процесса. Из-за требований к качеству сушки пиломатериалов возникают большие энергетические затраты на ведение процесса, часто вследствие его большой продолжительности. В связи с этим актуальным является усовершенствование имеющихся способов, а также поиск новых оптимальных технологий и оборудования сушки древесины, позволяющих устранить вышеперечисленные недостатки.

В [34,79] приведено описание процесса сушки древесины, который сопровождается протеканием множества физических явлений, наиболее важными из которых являются:

- передача тепла материалу от агента или источника тепловой энергии (явление теплообмена);
- перемещение тепла внутри материала (теплопроводность);
- испарение влаги с поверхности материала в окружающую среду (влагоотдача);
- перемещение влаги внутри материала (явление влагопереноса).

Необходимо учитывать тот факт, что роль приведенных выше физических явлений для каждого конкретного способа сушки не одинакова [55,56]. Относительная эффективность того или иного явления зависит от способа передачи тепла древесине и других условий. Некоторые из представленных физических явлений могут быть определяющими при одних методах сушки, но не оказывать значительного влияния при других методах.

Среди отечественных исследователей наибольший вклад в совершенствование теории и практики сушки древесины в электромагнитном поле высоких частот внесли А.А. Горяев, А.И. Расев, А.В. Нетушил Н.Ю. Попов [20,44,56]. По результатам их исследований были созданы конструкции вакуумных ВЧ аппаратов, отрегулированы технологические режимы сушки отдельных древесных пород, научно обоснована возможность

применения комбинированной вакуумно-конвективной ВЧ сушки. Разработкой промышленных СВЧ сушильных камер в России занимались А.М. Бомбин, В.П. Галкин, Ф.Х. Гареев, А.И. Расев, В.И. Мелехов и другие [11,14,16,17,18,36,43,47,48].

Результаты исследований по нагреву древесины в СВЧ-среде представлены в работах Торговникова Г.И. [69-70], Саяхова Ф.Л. [66] и др. Также Галкиным В.П. в статье [12] рассмотрены физические основы распределения электромагнитного излучения в процессе сушки пиломатериалов. Известны так же публикации зарубежных авторов [84-93,95,96,98-103].

Значительным достоинством процесса сушки материалов энергией СВЧ поля является высокая интенсивность процесса, благодаря чему она стала достаточно широко применяться в промышленности.

Ввиду высокой диэлектрической проницаемости древесины влага, содержащаяся в ней, эффективно поглощает большую часть СВЧ энергии, нагревается и начинает испаряться, создавая в замкнутом состоянии внутри древесины избыточное давление. Кроме того, при нагреве в СВЧ поле распределение температуры по всему объему древесины приводит к весьма благоприятным факторам для ускорения диффузии паровоздушной смеси из центральных слоев к поверхностным, так как в данном случае градиенты температуры и давления единопнаправлены и одновременно способствуют продвижению влаги к поверхности материала.

При этом одной из основных задач в процессах СВЧ нагрева является обеспечение равномерности по всему пиломатериалу. Интенсивность нагрева материала в конкретной точке характеризуется ее удалением от источника СВЧ-излучения и диэлектрической проницаемостью материала. Другими словами, для достижения равномерного высококачественного нагрева необходимо, чтобы значение напряженности электромагнитного поля (ЭМП) было приблизительно одинаковым по всему объему древесины [13,15,37].

В ходе анализа отечественных исследований было выявлено, что в

древесине лиственницы возникает наибольшее затухание ЭМП. В работе Галкина В.П. [13] представлен расчет глубины проникновения ЭМП в образец древесины лиственницы, приведенный на рис. 1.2 в зависимости от влажности и частоты электромагнитной энергии.

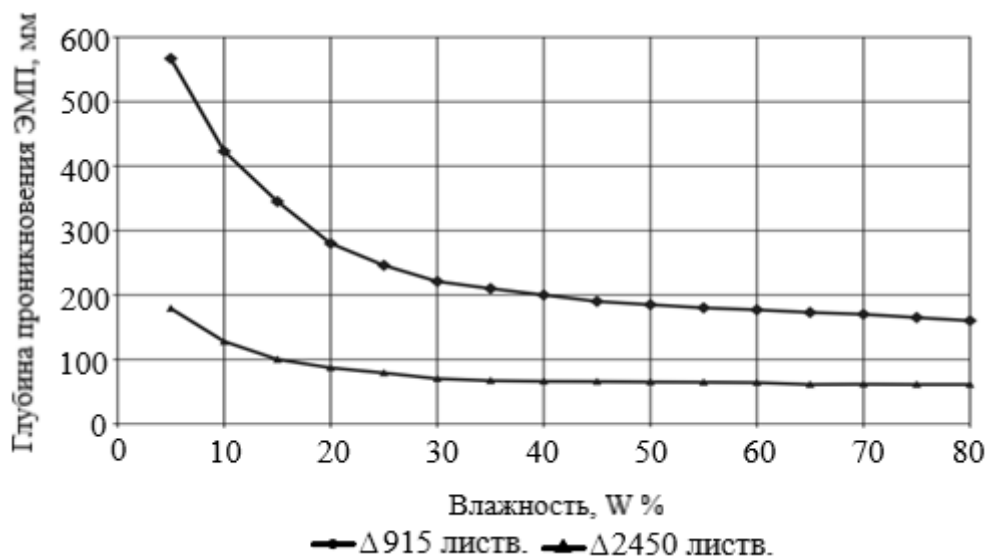


Рисунок 1.2 – Зависимость глубины проникновения электромагнитного поля при частоте $f = 915$ и 2450 МГц от влажности древесины лиственницы

Как видно из рисунка 1.2, при любом значении влагосодержания образца максимально возможная глубина проникновения электромагнитного поля на промышленной частоте 915 МГц в два раза больше, чем при частоте 2450 МГц. Для сушки толстых сортиментов с начальным влагосодержанием 60 % могут использоваться как частота 915 МГц, так и 2450 МГц. При этом максимальная толщина сортимента, высушиваемого на частоте 915 МГц не должна превышать 180 мм, а на частоте 2450 МГц – 70 мм. Повысить равномерность электромагнитного нагрева возможно при применении магнетронов с частотой 460 и 915 МГц, однако себестоимость производства сушильных установок с приведенными частотами по сравнению с магнетронами, работающими на частоте 2450 МГц, повышается в 10 – 15 раз [55].

К основным показателям электрических свойств древесины относятся электропроводность и диэлектрическая проницаемость [7,21].

Такие факторы, как температура, влагосодержание, порода древесины и расположение волокон напрямую влияют на ее электропроводность (рис.1.3) [3]. При постоянном подводе электрических токов на проводимость древесины также влияет и напряжение. Древесина становится изолятором при снижении влагосодержания меньше 7 % [24,25].

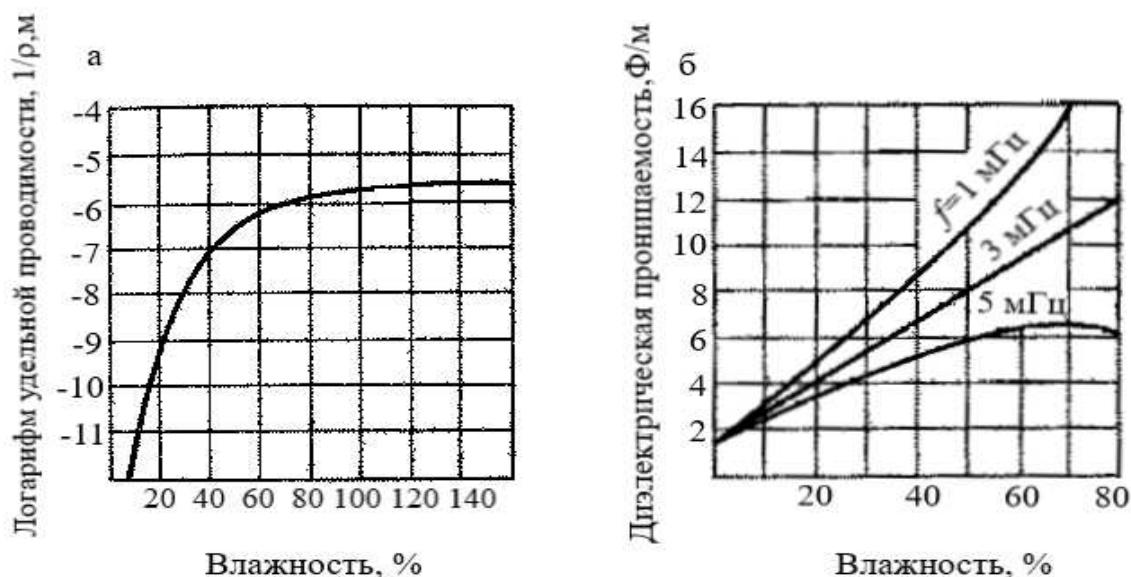


Рисунок 1.3 – Характер влияния влажности древесины: а – на удельную объемную проводимость вдоль волокон; б – на диэлектрическую проницаемость поперек волокон

Электрофизические параметры, такие как диэлектрическая проницаемость (ϵ , Φ/M) и тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\sigma$) характеризуют поведение древесины в ЭМП [2].

Диэлектрическая проницаемость материала характеризует сравнительную емкость конденсатора при использовании этого материала в качестве диэлектрика. Диэлектрическая проницаемость древесины зависит от ее влагосодержания, частоты ЭМП и его направления относительно волокон. Порода древесины практически не влияет на изменение диэлектрической проницаемости.

С повышением частоты диэлектрическая проницаемость уменьшается. В направлении вдоль волокон диэлектрическая проницаемость на 30 – 50 %

больше, чем поперек волокон [22]. На рис. 1.4 представлен график определения диэлектрической проницаемости древесного материала с разным влагосодержанием и плотностью при нагреве в ЭМП поперек волокон.

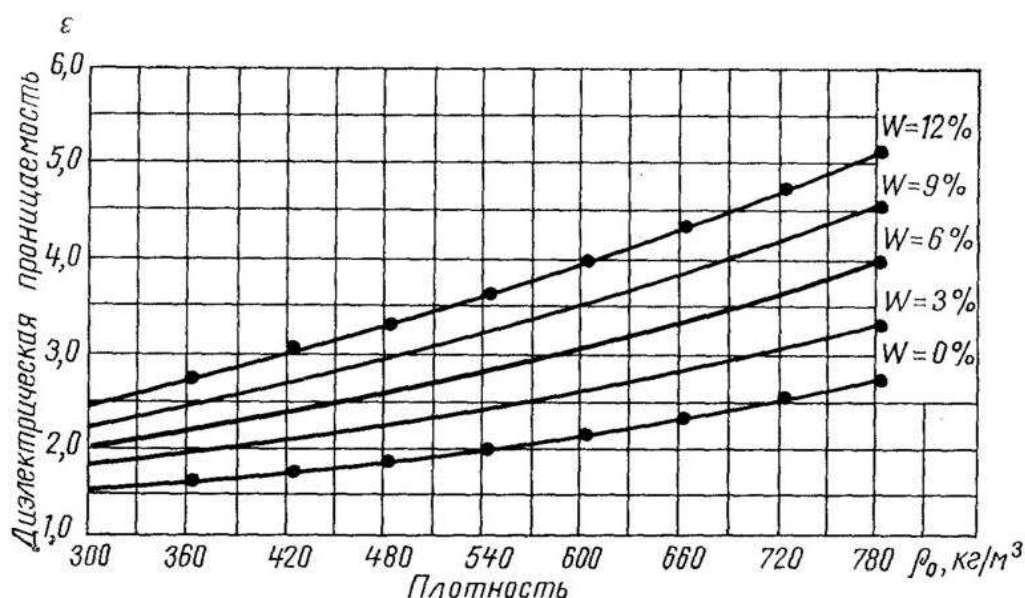


Рисунок 1.4 – Зависимость диэлектрической проницаемости ϵ древесины поперек волокон от плотности при разной влажности (по Р. Петерсону)

Тангенс угла диэлектрических потерь применяется для определения части подведенной к материалу мощности нагрева, которая поглощается ею и преобразуется в тепловую энергию. На изменение данного показателя напрямую влияют влагосодержание, плотность древесины, значение частоты электромагнитного излучения и его направление в процессе нагрева относительно волокон материала. Так же необходимо учитывать, что повышение температуры нагрева сухой древесины с одной стороны ведет к увеличению ϵ , а с другой стороны приводит к снижению значения $\operatorname{tg} \sigma$. Однако, при нагреве абсолютно сухой древесины в СВЧ поле, данный показатель значительно возрастает. Он также возрастает с повышением плотности. Например, в процессе сушки древесины плотностью 500 кг/м^3 поперек волокон при частоте электромагнитного нагрева до 10^{-1} МГц $\operatorname{tg} \sigma = 0,007$, а при плотности 800 кг/м^3 $\operatorname{tg} \sigma = 0,025$ [22].

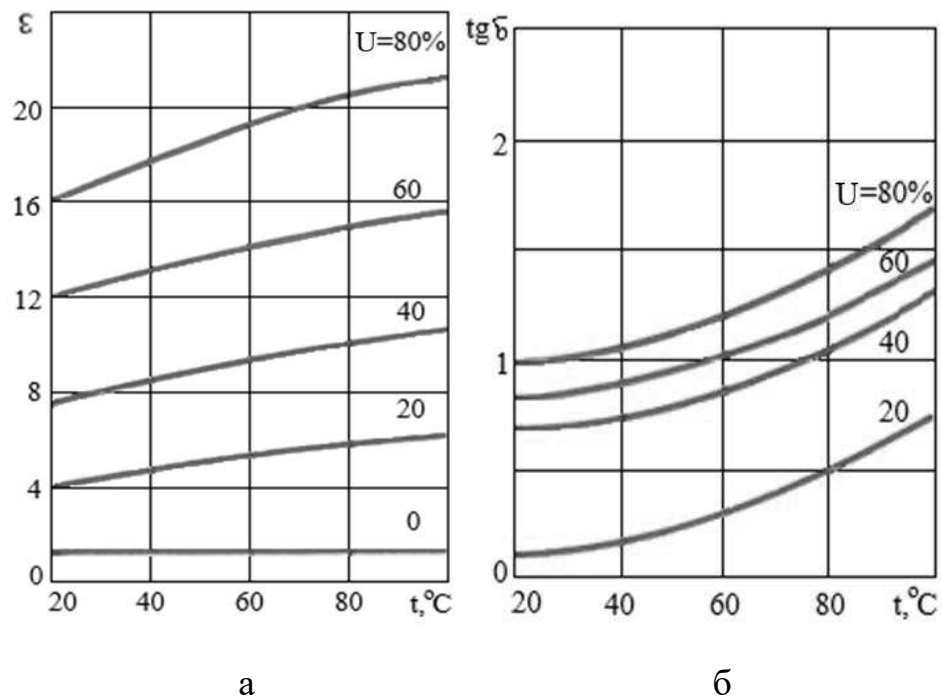


Рисунок 1.5 – Зависимость диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) древесины сосны от температуры и влажности

В [87] отмечается, что процесс сушки древесины в СВЧ поле приобретает наибольший эффект благодаря высокой плотности потока электромагнитной энергии и наименьшим размерам длин микроволн. В связи с этим наблюдается интенсивное равномерное поглощение энергии по всему объему высушиваемого материала.

Antti A.L. в своей работе [84] провел анализ воздействия на процесс СВЧ сушки древесины таких показателей, как диэлектрическая проницаемость материала, размер и количество пор, температура нагрева и давление в камере. В ходе исследований им было выявлено, что при сушке сосновых и еловых образцов в СВЧ поле можно достичь максимальной скорости сушки $0,2 - 0,5 \%$ в минуту.

Результаты исследований, посвященные нагреву материалов с подводом тепловой энергии СВЧ излучением, также отражены и в работах Guanben, D [89], Xian-Jun Li [102], Kent S. [92], Sungsoontorn S. [100], Jhony T. Teleken [101]. В [89] автор провел исследования характеристики СВЧ сушки

древесных стружек в зависимости от их геометрических размеров, удельной мощности СВЧ-нагрева и влагосодержания материала. Xian-Jun Li и др. [102] исследовали механизм переноса влаги и тепла в древесине во время микроволновой вакуумной сушки. Работы Kenta S. [92] посвящены микроволновому нагреву многослойных материалов с разной диэлектрической проницаемостью при воздействии однородной плоской волны. Sungsoontorn S. [100] в своих работах рассматривал воздействие микроволновой энергии на рост давления и тепломассоперенос в ненасыщенных пористых средах. При этом было выявлено, что разная частота, размеры частиц и напряженность электрического поля играют важную роль в общей кинетике сушки. Jhony T. Teleken в своей работе [101] описал модель СВЧ-нагрева пористых материалов в вакуумной среде. Анализ исследований показал, что константа скорости испарения является ключевым параметром при вакуумной СВЧ сушке, поскольку влияет на локальное повышение давления в среде.

Работа H.Zhao [85] посвящена математическому описанию процессов микроволнового нагрева анизотропных материалов, в котором СВЧ энергия передается к материалу по произвольно разработанному промышленному волноводу с целью определения влияния различных показателей электромагнитного поля на равномерность нагрева материала.

В работе Jianxiong Zhang и коллектива авторов [91] рассматривалось влияние размеров сечения древесного образца на коэффициент вариации температуры. При проведенных исследованиях установили: когда длина древесины не превышает размеры волновода, коэффициент изменения температуры составляет менее 40,5 %, а энергоэффективность более 90 %, что является наиболее оптимальным для ведения процесса.

Sahbi Ouertani с коллективом авторов [98] провели исследование тепломассопереноса для выявления оптимальных режимных параметров в процессе комбинированной микроволновой и конвективной сушки древесины при различных удельных СВЧ мощностях. Согласно полученным

результатам было установлено, что увеличение мощности СВЧ нагрева сокращает время сушки древесины, однако при этом увеличивает внутреннее давление газов, что приводит к ее растрескиванию. При комбинированной сушке древесины в диапазоне средней мощности микроволн и температуры можно добиться значительного сокращения времени сушки, при этом внутреннее давление газа в материале поддерживается на уровне оптимальных значений.

Таким образом, проведенный обзор показал повышенный интерес исследователей к СВЧ технологии, которая позволяет создавать новые технологические процессы или усовершенствовать уже существующие. При этом на сегодняшний день отсутствует решение определенного количества практических и теоретических вопросов, имеющих в процессах сушки материалов в СВЧ камерах.

В качестве примера рассмотрим процесс СВЧ сушки единичного образца древесного материала при постоянном атмосферном давлении в камере. На рисунке 1.6 приведены теоретические кривые изменения температуры, влажности материала и относительной влажности воздуха.

После включения СВЧ-генератора начинается прогрев материала и испарение влаги с поверхностных слоев, что вызывает увлажнение среды. Поэтому начальный период процесса нагрева пиломатериалов, осуществляющийся при закрытых приточно-вытяжных каналах, протекает до достижения относительной влажности воздуха 100 %. При этом температура поверхности материала напрямую зависит от значений относительной влажности и температуры воздуха. Вместе с этим происходит значительный рост температуры в центральной зоне и постепенный на поверхности материала. Быстрое испарение влаги с поверхности материала происходит до достижения относительной влажности воздуха в камере 100 %, далее поверхностные слои материала начинают увлажняться за счет переноса влаги из центральных слоев древесины. Следующая стадия протекает только при молярном переносе, при этом происходит выравнивание температур в центре

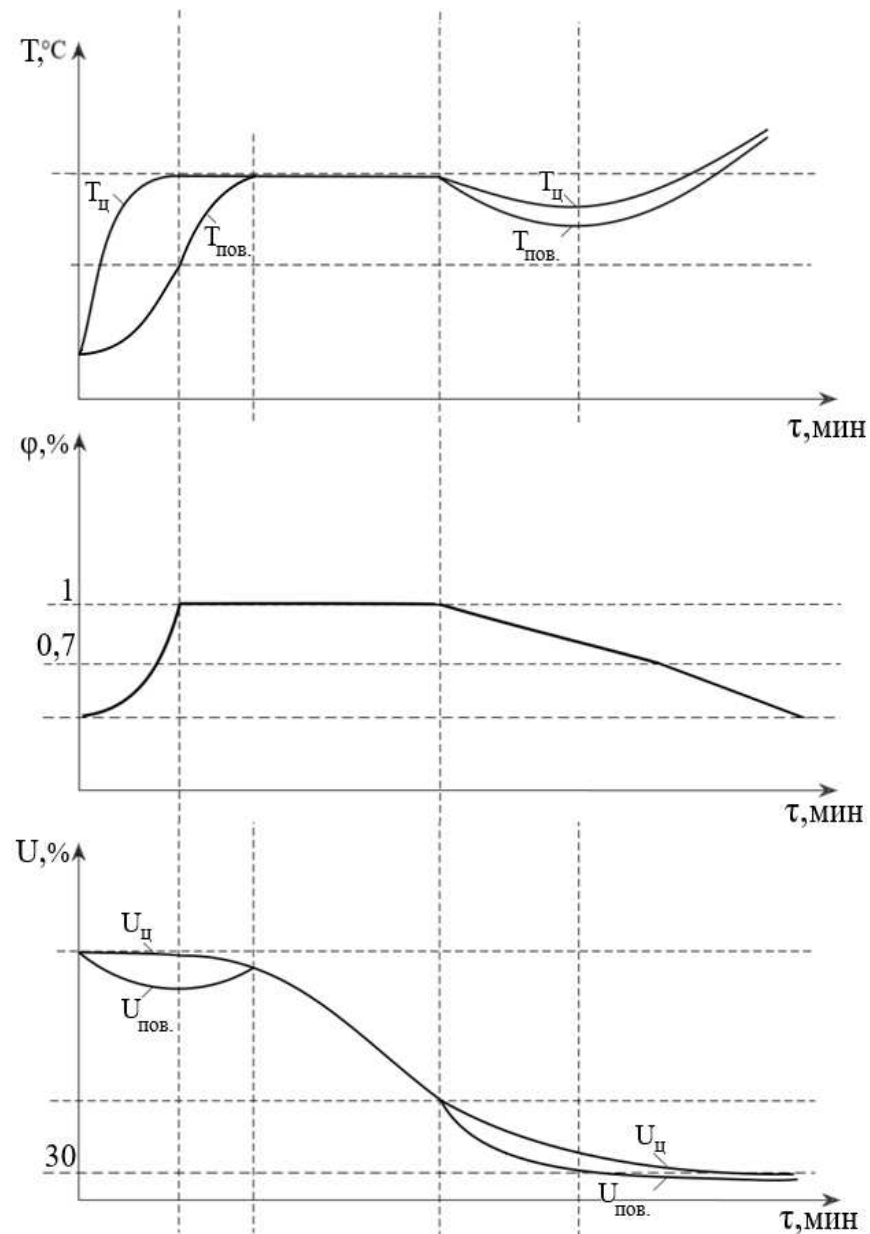


Рисунок 1.6 – СВЧ сушка пиломатериалов при атмосферном давлении в камере

и на поверхности материала на значениях, равных температуре кипения влаги в материале. В этот момент влагосодержание в центре и на поверхности материала также становится равным. Данная стадия протекает при наличии свободной влаги в материале. По мере снижения интенсивности внутреннего молярного массопереноса постепенно открываются приточно-вытяжные каналы сушильной камеры с целью снижения относительной влажности воздуха. В связи с этим начинается испарение влаги с поверхности, что вызывает снижение температуры поверхностных зон

материала и интенсифицирует внутренний массоперенос за счет термовлагопроводности. Снижение влагосодержания материала ниже влажности предела насыщения клеточных стенок вызывает смену молярного переноса на влагопроводность. Действие молярного переноса прекращается, поскольку связанная влага не кипит. В этот момент температура материала начинает расти, что может привести к неконтролируемому разогреву древесины. Кроме того, в толстых пиломатериалах может наблюдаться неравномерность прогрева по слоям материала с эффектом негативного действия термовлагопроводности.

В процессе проведенного анализа было выявлено, что применение СВЧ нагрева при атмосферном давлении среды является проблематичным из-за сложности обеспечения правильного распределения температуры внутри материала. Для решения данной проблемы на второй стадии процесса в момент понижения температуры поверхности ниже значения температуры центра материала, необходимо создать градиент влажности с помощью введения конвективной составляющей. Однако данный вариант проведения процесса сушки является сложно реализуемым и дорогостоящим.

Одним из перспективных вариантов комбинированной сушки пиломатериалов с СВЧ подводом энергии является сушка при пониженном давлении в камере. Благодаря тому, что влага внутри древесного образца при пониженном давлении начинает закипать при низких температурах, в древесине сохраняются физико-механические характеристики. Также в ходе высокотемпературной обработки происходит снижение механической прочности древесины [29]. Принцип подвода тепловой энергии к высушиваемому материалу в условиях пониженного давления является основным фактором, влияющим на эффективность использования вакуумных технологий сушки древесины. Применение в качестве источника теплового нагрева СВЧ полей позволяет проводить процесс сушки древесины с равномерным распределением температур по поверхности и в центральной зоне материала с сохранением ее природных свойств.

Таким образом, анализ полученной информации показал, что данный способ подвода тепловой энергии является достаточно сложно регулируемым без применения дополнительных мероприятий.

Поэтому одной из актуальных задач в процессах СВЧ сушки материалов является разработка принципов обеспечения равномерности сушки материала. Одним из вариантов решения данной задачи является применение импульсных режимов подвода тепловой энергии к образцу [82].

1.3. Импульсные режимы сушки пиломатериалов

Контактные и конвективные регламенты сушки предполагают, в основном, использование в технологическом процессе водяного пара, от которого из-за дороговизны и отсутствия подходящего технологического оснащения предприятия деревообрабатывающей отрасли на сегодняшний день стараются отказываться. Одним из направлений, позволяющих провести высококачественную сушку пиломатериалов без использования водяного пара, является применение «импульсных» режимов [32,38,40,41].

Процесс сушки пиломатериалов в импульсном режиме состоит из повторяющихся между собой циклов. При этом каждый цикл складывается из двух отдельных стадий: «нагрев», когда к высушиваемому материалу подводится тепловая энергия, и «пауза», во время которой подача тепловой энергии прекращается. На стадии нагрева материал прогревается при давлении среды равном или близком атмосферному. При этом стадия нагрева может проходить как при открытых, так и при закрытых приточно-вытяжных каналах. В зависимости от этого возможны два варианта проведения импульсной сушки. В первом случае стадия нагрева будет характеризоваться интенсивным испарением влаги из материала при жестком режиме сушки. Тогда стадия «пауза», осуществляющаяся при закрытых приточно-вытяжных каналах, предназначена для снятия возникающих в материале внутренних напряжений и выравнивания влажности по слоям. Во втором случае

испарение влаги с поверхностных слоев будет осуществляться только в начальный момент времени до достижения 100%-ной относительной влажности воздуха с последующим выравниванием температуры по сечению материала. В этом случае на стадии «пауза» обеспечиваются условия, при которых происходит интенсивное удаление влаги из материала. Для этого открываются приточно-вытяжные каналы или, что является более эффективным, создается пониженное давление среды. Таким образом обеспечивается равнонаправленное действие градиентов температуры и влажности по сечению материала, что значительно интенсифицирует процесс сушки.

Среди «импульсных» технологий особую популярность получил вакуумно-конвективный способ сушки, в котором в качестве источника теплоты на стадии нагрева используется горячий воздух. Данный способ при сушке дубовых пиломатериалов показал хорошие результаты. Однако и у этого способа в процессе сушки возникают проблемы регулирования режимных параметров. Так как процесс нагрева сопровождается испарением влаги из древесины, в материале происходит нарушение поверхностных слоев. Чтобы это предотвратить, необходимо провести быстрый прогрев материала без удаления из него влаги. Для этого в камере сушки создается высокая степень насыщенности среды. При влагосодержании древесины больше 25 %, степень насыщенности среды должна поддерживаться на уровне 0,98 – 1 %, а при влагосодержании меньше 25 % на уровне 0,90 – 0,92 %. В связи с этим применение на стадии нагрева в качестве источника теплоты горячего воздуха представляется возможным лишь при его комбинировании с насыщенным паром, иначе использование только горячего воздуха может привести к снижению качества высушиваемого материала.

Одной из разновидностей «импульсной» технологии является сушка древесины «сбросом» давления. Данный способ заключается в проведении процесса нагрева влажного древесного материала под определенным давлением с его последующим интенсивным снижением до значения ниже

атмосферного при применении вакуумного ресивера. Таким образом процесс протекает при молярном переносе пара. В момент «сброса» давления по всему объему древесины происходит интенсивное вскипание влаги между центральными и периферийными частями, образуя при этом перепад давления, который позволяет формировать направление потока испаряющейся влаги к поверхности материала. Увеличивая скорость понижения давления среды, можно достигнуть того, чтобы вместе с паром из древесины так же удалялось до 40 % влаги в виде жидкости, как при механическом обезвоживании древесины. Однако если провести резкий «сброс» давления, существует опасность нарушения структуры древесины. По этой причине при использовании данного способа удаления влаги из материала необходимо применять индивидуальный подход в процессе сушки. Также необходимость создания вакуумного ресивера, который позволяет производить «сброс» давления ниже атмосферного и по габаритам подобен вакуумной камере, приводит к значительному удорожанию всей сушильной установки.

Многие отечественные и зарубежные исследователи считают, что наиболее перспективным направлением в области сушки древесины является применение диэлектрических способов подвода тепловой энергии в импульсном режиме. По сравнению с другими способами подвода тепловой энергии при СВЧ-сушке прогрев материала осуществляется по всей толщине, однако при сушке толстых пиломатериалов и древесины твердых пород кипение воды происходит не по всему объему, а только в поверхностных слоях. В результате чего происходит большой перепад влажности по толщине материала и возникают сушильные напряжения, которые приводят к растрескиванию древесины. Однако применение осциллирующего режима СВЧ-сушки пиломатериалов позволит наряду с высокой скоростью процесса получать качественные пиломатериалы без использования дополнительных энергозатрат, в то время как другие способы обладают большой продолжительностью процесса.

Из проведенного литературного обзора исследований и разработок в области СВЧ-сушки древесных материалов была установлена перспективность предлагаемой в работе технологии сушки. Однако данная технология, из-за сложного регулирования параметров процесса, а также высоких энергозатрат не нашла широкого промышленного применения. Поэтому углубленное исследование существующей проблемы, усовершенствование и разработка новых энергоэффективных технологий сушки древесины и их аппаратное оформление с целью снижения энергетических затрат и повышения качества является актуальной для исследователей задачей.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВАКУУМНЫХ СВЧ-АППАРАТОВ

2.1. Физическая картина процесса

На практике вакуумную СВЧ-сушку пиломатериалов осуществляют в герметичной теплоизолированной камере, снабженной одним или несколькими СВЧ генераторами. Кроме того, установка дополняется системой вакуумирования, состоящей из конденсатора и вакуумного насоса. Принятый к сушке материал является пиленой продукцией, которая укладывается в штабель в соответствии с нормативными документами [30]. Температура и влажность материала в зависимости от условий хранения может быть различной по слоям.

При расположении СВЧ-генератора в одном определенном месте, сложно добиться равномерности нагрева по всему штабелю. В связи с этим применительно к данному виду сушки целесообразно рекомендовать применение осциллирующего режима нагрева, который без использования пара (т.е. дополнительных затрат на испарение воды) решает проблему неравномерной сушки пиломатериалов, при этом снижая внутренние напряжения в древесине.

Как было описано выше, при рассмотрении вакуумных методов СВЧ-сушки пиломатериалов, согласно «импульсным» технологиям ведения процесса, могут быть реализованы следующие варианты:

- осциллирующая технология, когда сушильный процесс складывается из последовательно чередующихся стадий прогрева при давлении в камере равном или близком атмосферному и вакуумирования, при этом на стадии прогрева материал нагревается в условиях, предотвращающих удаление влаги из древесины;
- нагрев материала с одновременной сушкой, что может протекать в условиях пониженного давления среды, и выдержка с целью снятия внутренних напряжений.

Важным преимуществом использования СВЧ-излучения в процессе сушки является возможность применения объемного нагрева обрабатываемого материала, происходящего за счет проникновения электромагнитной энергии в материал и преобразования ее в тепловую энергию. Вследствие высокой диэлектрической проницаемости вода поглощает большую часть СВЧ-излучения, нагревается и начинает интенсивно испаряться. Так как внутри образца вода находится в замкнутом пространстве, то с началом ее кипения в материале создается избыточное давление. Создаваемое при СВЧ-нагреве распределение температуры способствует эффективности процесса сушки благодаря тому, что градиенты температуры, концентрации влаги и давления направлены в одну сторону.

Первый вариант процесса вакуумной сушки с СВЧ подводом энергии в осциллирующем режиме начинается со стадии нагрева древесины путем подачи микроволновой энергии от магнетронов при постоянном атмосферном давлении в аппарате без кондиционирования воздуха, чтобы максимально интенсифицировать процесс и минимизировать удаление влаги с поверхности материала. Вслед за этим начинается стадия вакуумирования, при которой отключаются магнетроны, и сушка происходит за счет предварительно аккумулированной тепловой энергии в условиях вакуума. На начальном этапе сушки происходит освобождение капилляров и пор древесины от свободной влаги и далее в них начинается движение паровоздушной смеси. После создания в камере рабочего вакуума, материал еще сохраняет тепловую энергию, достаточную для удаления влаги. Поэтому высушиваемый пиломатериал выдерживается до снижения температуры в центре материала при остаточном давлении до значения, при котором градиент температуры не будет оказывать существенного влияния на процесс удаления влаги. После завершения стадии вакуумирования открываются напускные клапаны установки, давление в камере повышается до атмосферного и цикл «нагрев-вакуум» повторяется. Количество циклов определяется толщиной пиломатериала и породой древесины (рис.2.1).

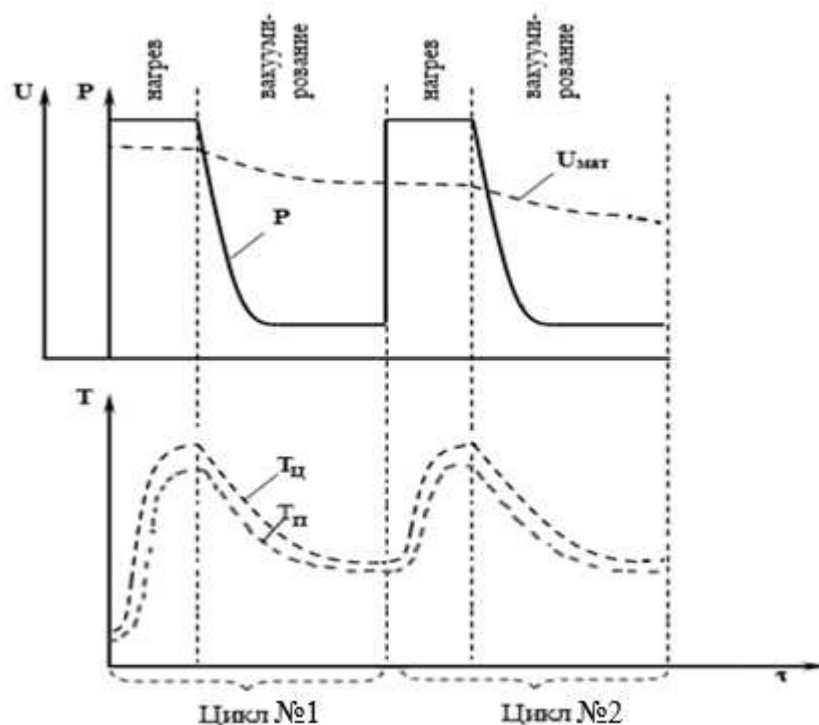


Рисунок 2.1 – Схема ведения процесса вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме без удаления влаги из материала на стадии нагрева

Второй вариант СВЧ-сушки пиломатериалов начинается с удаления воздуха из аппарата (рис.2.2), для чего в работу включается вакуумный насос. После создания вакуума начинается стадия СВЧ-нагрева, при которой за счет интенсивного испарения влаги из материала изменяется давление в камере. При этом вследствие отсутствия воздуха среда в камере представляет собой чистый водяной пар. После стадии СВЧ-нагрева магнетроны отключаются, и в работе остается только конденсатор, с помощью которого в сушильной камере происходит снижение давления среды с целью выравнивания температуры и влажности по сечению материала. Далее цикл «нагрев-выдержка» повторяется.

В предложенных схемах ведения процесса происходит попеременная работа вакуумного насоса и СВЧ генератора, что позволяет избежать больших энергозатрат и обеспечить выравнивание влажности по толщине пиломатериала и, как следствие, предотвратить развитие значительных сушильных напряжений и остаточных деформаций.

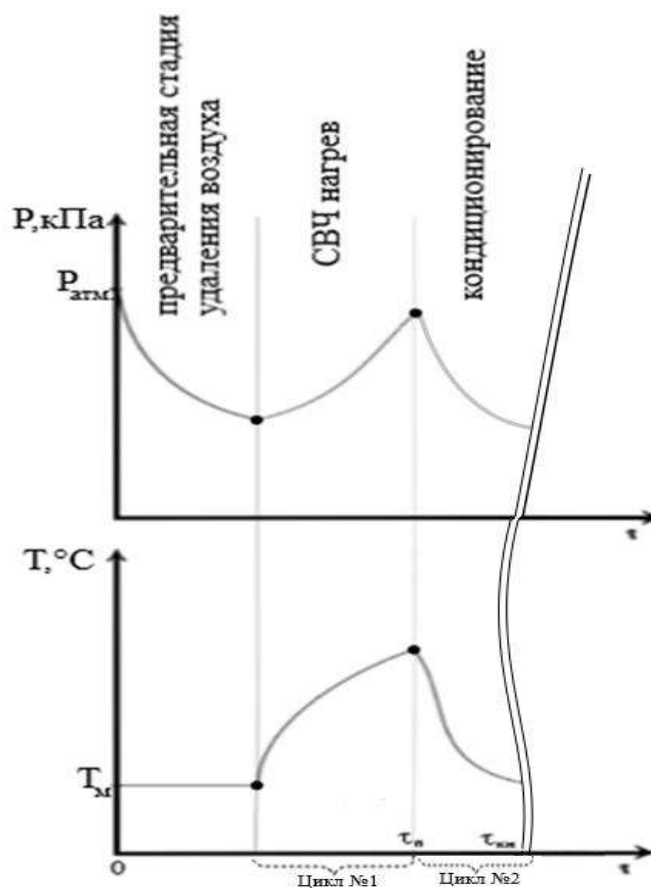


Рисунок 2.2 – Схема ведения процесса сушки пиломатериалов с СВЧ подводом тепла с попеременным кондиционированием среды

Структурная схема установки для реализации процессов вакуумной СВЧ сушки пиломатериалов представлена на рис. 2.3. Структурная схема включает камеру сушки, источники подвода тепловой энергии в виде СВЧ-генераторов, конденсатор и вакуумный насос. Для реализации стадии нагрева установка комплектуется СВЧ-генераторами, расположенными либо с одной стороны от материала, либо с обеих его сторон. Для проведения стадии вакуумирования в установке должна быть предусмотрена система вакуумирования, состоящая из конденсатора и вакуумного насоса. Конденсатор используется для удаления из камеры водяного пара, а вакуумный насос для удаления воздуха.

Таким образом, при рассмотрении физической картины удаления влаги из древесины при вакуумных методах сушки пиломатериалов с СВЧ подводом, были выявлены основные физические явления, требующие

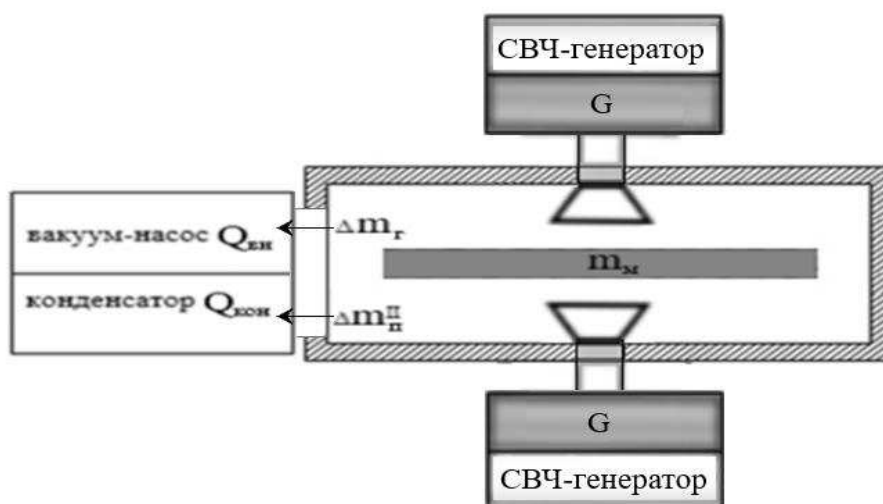


Рисунок 2.3 – Структурная схема сушки пиломатериалов при вакуумном СВЧ нагреве

дальнейшего теоретического изучения:

- 1) тепломассоперенос внутри пиломатериала на стадии СВЧ-нагрева;
- 2) тепломассоперенос в условиях внешней задачи для процессов, протекающих при понижении давления среды;
- 3) тепломассоперенос внутри пиломатериала на стадии вакуумирования.

2.2. Формализация процесса

Анализ, проведенный в первой главе, показал, что реальная физическая картина процессов, протекающих при СВЧ сушке пиломатериалов, достаточно сложна. Для получения конструктивной математической модели процесса неизбежно упрощение описания системы или её частей, обеспечивающее простоту и удобство её использования при сохранении необходимой степени адекватности. Принимая во внимание результаты исследований других авторов [67, 69-70, 84-93], введем следующие допущения:

- 1) высушиваемая древесина представляет собой пиломатериал, у которого ширина не менее, чем в три раза превышает толщину, а длина многократно

превышает остальные размеры. Поэтому процесс переноса тепла и массы в высушиваемом материале рассмотрим как одномерную задачу в неограниченной пластине;

- 2) высушиваемый материал рассматривается как капиллярно-пористое коллоидное тело;
- 3) исходный материал имеет равные по сечению значения температуры, влажности и давления;
- 4) удаляемая из капиллярно-пористого коллоидного материала в процессе сушки жидкость представляет собой дистиллированную воду и имеет соответствующие теплофизические свойства [79];
- 5) пары, ввиду протекания процесса в условиях пониженного давления, подчиняются законам идеальных газов [29];
- 6) значение влагосодержания поверхности пиломатериала, равновесное текущему значению давления над ней, устанавливается мгновенно; в связи с этим влагосодержание поверхности тела в ходе процесса будет оставаться все время равновесным по отношению к текущему парциальному давлению водяного пара над материалом при соответствующей температуре его поверхности [57].

2.3. Математическое описание процессов вакуумной сушки пиломатериалов при СВЧ подводе тепловой энергии

Анализ физической картины процессов вакуумной сушки пиломатериалов при СВЧ-нагреве показал, что совокупность физических явлений, составляющих исследуемый способ обработки древесины, согласно блочному принципу построения математического описания процесса, следует рассматривать, решая внутреннюю задачу – тепломассоперенос внутри материала, и внешнюю задачу – тепломассоперенос в среде при понижении давления.

При решении внешней задачи вначале исследуют гидродинамическую обстановку в аппарате, а затем переходят к изучению кинетики массо- и

теплопередачи с учетом выявленных гидродинамических условий модели. Для выявленной структуры потоков в процессах вакуумной сушки пиломатериалов с СВЧ подводом тепловой энергии (рис.2.4) основными характеристиками являются разность парциальных давлений удаляемой парогазовой смеси над поверхностью древесины и в окружающей среде и интенсивность теплоподвода к материалу [80].

2.3.1. Тепломассоперенос в процессе СВЧ-нагрева пиломатериала

В ходе анализа физической картины было определено, что существует два варианта введения процесса: нагрев в среде воздуха при атмосферном давлении в аппарате и нагрев за счет испаряющейся влаги с предварительным удалением воздуха из аппарата.

При сушке пиломатериалов с СВЧ подводом тепловой энергии расчет процессов нагрева в условиях внутренней задачи основывается на решении дифференциальных уравнений тепломассопереноса [71]. Для описания изменения во времени полей влажности, температуры и давления в материале воспользуемся уравнениями, выраженными в следующей форме [35,79]:

$$c_m \rho_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda'_m \left(\frac{\partial T_m}{\partial x} \right) \right) + q_{\text{СВЧ}}, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial U_m}{\partial \tau} = a' \frac{\partial^2 U_m}{\partial x^2} + a' \delta \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \frac{k_p}{\rho_0} \cdot \frac{\partial^2 p_m}{\partial x^2}, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial p_m}{\partial \tau} = \frac{RT_m}{P_0 \mu} \left[k_p \frac{\partial^2 p_m}{\partial x^2} + \xi \cdot \rho_0 \frac{\partial U_m}{\partial \tau} \right] + \frac{p_m}{T_m} \left(\frac{\partial T_m}{\partial \tau} \right). \quad (2.3)$$

Краевые условия для решения систем дифференциальных уравнений (2.1) – (2.3) можно представить в следующем виде:

- начальные условия, применительно к первому циклу:

$$T_m(0; x) = \text{const}; \quad (2.4)$$

$$U_m(0; x) = \text{const}; \quad (2.5)$$

$$p_m(0; x) = \text{const}; \quad (2.6)$$

• начальные условия для каждой последующей стадии процесса будут представлять собой поля температур, влажности и давления по сечению материала после предыдущей стадии:

$$\left. \frac{\partial T_m}{\partial x} \right|_{\tau_{\text{кон стадии } i+1}} = \left. \frac{\partial T_m}{\partial x} \right|_{\tau_{\text{нач стадии } i}}; \quad (2.7)$$

$$\left. \frac{\partial U_m}{\partial x} \right|_{\tau_{\text{кон стадии } i+1}} = \left. \frac{\partial U_m}{\partial x} \right|_{\tau_{\text{нач стадии } i}}; \quad (2.8)$$

$$\left. \frac{\partial p_m}{\partial x} \right|_{\tau_{\text{кон стадии } i+1}} = \left. \frac{\partial p_m}{\partial x} \right|_{\tau_{\text{нач стадии } i}}. \quad (2.9)$$

Граничные условия для решения систем дифференциальных уравнений (2.1) – (2.3) в общем случае могут быть представлены в следующем виде:

$$\alpha(T_{\text{пов.м.}} - T) = -\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial x} - r \cdot j + q_{\text{СВЧ}}; \quad (2.10)$$

$$j = \beta(U_m - U_{\text{равн.}}); \quad (2.11)$$

$$p_m(\tau; 0) = P_{\text{кам.}} \quad (2.12)$$

Левая часть уравнения (2.10) характеризует конвективный теплообмен, происходящий между поверхностью материала и окружающей средой: первое слагаемое в правой части – поток тепла к поверхности материала за счет теплопроводности; второе слагаемое учитывает затраты тепла на испарение влаги; третье слагаемое – количество теплоты, преобразуемое поверхностным слоем материала из СВЧ-энергии.

Поток влаги определяется выражением:

$$j_{\text{м.пов}} = \rho_0 \cdot \left(a_m \cdot \left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=0} + a_m \cdot \delta \cdot \left. \frac{\partial T_m}{\partial x} \right|_{x=0} + \frac{k_p}{\rho_0} \cdot \left. \frac{\partial p_m}{\partial x} \right|_{x=0} \right). \quad (2.13)$$

Пористость древесины можно определить из выражения:

$$P_0 = 1 - \rho_{\delta} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{\delta.г}} + \frac{W}{100 \cdot \rho_{жс}} \right). \quad (2.14)$$

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, рассчитывается согласно классическому закону Джоуля-Ленца:

$$q_{СВЧ} = 0,556 \cdot 10^{-6} \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \sigma \cdot f \cdot E^2. \quad (2.15)$$

Напряженность электрического поля, которое создает точечный заряд, в уравнении (2.15) определяется законом Кулона:

$$E = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{q_3}{r^2}, \quad (2.16)$$

при этом заряд

$$q_3 = C_0 \cdot U. \quad (2.17)$$

Емкость конденсатора в этом случае может быть определена выражением:

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{h}. \quad (2.18)$$

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

$$\operatorname{tg} \sigma = \frac{\sigma_f}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon}. \quad (2.19)$$

Угловая частота и полная удельная активная проводимость на данной частоте в уравнении (2.18) определяется как:

$$\omega = 2\pi f; \quad (2.20)$$

$$\sigma_f = \frac{1}{R}. \quad (2.21)$$

Значения коэффициента диэлектрической проницаемости древесины в уравнении (2.15) можно определить из графических зависимостей рис. 1.4, 1.5.

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

$$\rho_{CM} c_{CM} V_{CB} dT = \alpha (T_{M.ПОВ} - T) F_M d\tau + c_{П} F_M j_{ПОВ} T_{ПОВ} d\tau, \quad (2.22)$$

где левая часть уравнения – это изменение количества теплоты паровоздушной среды в камере; первое слагаемое правой части – теплообмен между средой в камере и поверхностью материала за счет теплоотдачи, второе слагаемое – приток тепловой энергии с парами испаренной влаги.

Откуда определяем изменение температуры среды в камере:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\alpha F_M (T_{M.ПОВ} - T) + c_{П} F_M j T_{ПОВ}}{\rho_{CM} c_{CM} V_{CB}}. \quad (2.23)$$

Представленная система уравнений описывает стадию нагрева пиломатериала при осциллирующей СВЧ-сушке.

2.3.2. Тепломассоперенос в условиях понижения давления среды

Следующей стадией 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 [61] во внешней среде определяется уравнениями материального и теплового балансов. Для нестационарных условий протекания процесса разница между притоком и отводом составит накопление массы и энергии в свободном объеме аппарата:

$$V_{CB} d\rho_{П} = dm_{П} - dm_{C.П}; \quad (2.24)$$

$$V_{CB} d\rho_{Г} = -dm_{C.Г}; \quad (2.25)$$

$$\rho_{CM} c_{CM} V_{CB} dT = \alpha (T_{M.ПОВ} - T) F_M d\tau - Q_{C.ПГ} \rho_{CM} c_{CM} T d\tau + c_{П} F_M j_{ПОВ} T_{ПОВ} d\tau. \quad (2.26)$$

Левая часть уравнения (2.24) характеризует скорость изменения массы пара в парогазовой фазе в единице свободного объема аппарата; первое слагаемое правой части – скорость подвода массы пара в парогазовую фазу, а второе слагаемое – скорость его отвода в вакуумную линию. Соотношение (2.25) отличается от (2.26) отсутствием слагаемого, характеризующего подвод массы воздуха в единицу свободного объема вследствие

герметичности аппарата.

В уравнении переноса энергии (2.26) 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.

В системах «твердое тело-пар», имеющих поверхность раздела фаз, приток массы пара в свободный объем аппарата можно представить в виде выражения:

$$dm_{\Pi} = j_{\Pi} F d\tau. \quad (2.27)$$

В тоже время отвод массы пара из свободного объема аппарата в вакуумную систему характеризуется интенсивностью системы удаления парогазовой смеси:

$$dm_{\Pi} = Q_{с.пг} \rho_{\Pi} d\tau. \quad (2.28)$$

Аналогично уравнению (2.28) отвод массы газа из свободного объема аппарата определяется соотношением

$$dm_{Г} = Q_{с.г} \rho_{Г} d\tau. \quad (2.29)$$

В уравнениях (2.26) и (2.28) фигурирует объемная производительность системы удаления пара и газа $Q_{с.пг}$, которая складывается из объемных производительностей системы удаления пара $Q_{с.п}$ и системы удаления газа $Q_{с.г}$. Обычно при сушке понижением давления сушильная камера подключается к вакуумному насосу через конденсатор, который работает как своеобразный насос по пару. В этом случае объемная производительность системы удаления пара будет определяться объемными производительностями вакуумного насоса и конденсатора:

$$Q_{с.п} = Q_{вн} + Q_{кон}, \quad (2.30)$$

а объемная производительность системы удаления газа в уравнении (2.29) будет равна объемной производительности вакуумного насоса:

$$Q_{C.\Gamma} = Q_{BH}. \quad (2.31)$$

Производительность вакуумного насоса можно определить, задавая время, в течение которого давление в камере необходимо понизить с $P_{атм}$ до рабочего остаточного $P_{ост}$:

$$Q_{BH} = \frac{V_{CB}}{\tau_0} \cdot \ln \frac{P_{атм}}{P_{ост}}. \quad (2.32)$$

Объемная производительность конденсатора может быть определена из уравнения теплового баланса:

$$Q_{кон} \rho_n \left[c_{n.пер} (T - T_{нас}) + c_n T_{нас} + r_n \right] = K_{кон} \Delta t_{кон} F_{кон}, \quad (2.33)$$

где левая часть уравнения учитывает тепловой эффект охлаждения пара до полной конденсации; правая часть характеризует количество теплоты, переданного в единицу времени от пара хладагенту. Из уравнения (2.33) следует, что:

$$Q_{кон} = \frac{K_{кон} \Delta t_{кон} F_{кон}}{\rho_n \left[c_{n.пер} (T - T_{нас}) + c_n T_{нас} + r_n \right]}. \quad (2.34)$$

Температура пара в состоянии насыщения может быть определена по уравнению Антуана:

$$T_{нас} = \frac{B}{A - \ln p_{нас}}. \quad (2.35)$$

Уравнения (2.24) и (2.25) с учетом уравнений (2.27) – (2.29) можно представить в виде:

$$V_{CB} \frac{d\rho_{\Pi}}{d\tau} = j_{\Pi} F d\tau - Q_{C.\Pi} \rho_{\Pi}; \quad (2.36)$$

$$V_{CB} \frac{d\rho_{\Gamma}}{d\tau} = -Q_{C.\Gamma} \rho_{\Pi}. \quad (2.37)$$

Плотность компонента идеальной парогазовой смеси можно связать с давлением с помощью уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$\rho_{\Gamma(\Pi)} = \frac{p_{\Gamma(\Pi)} \cdot \mu_{\Pi} p_{\Pi}}{R \cdot T}. \quad (2.38)$$

После подстановки в уравнения (2.36) и (2.37) значений плотностей в виде соотношений (2.38) и некоторых преобразований, а также при наличии в аппарате воздуха, скорость изменения парциальных давлений пара и газа определяем из выражения:

$$\frac{dp_{\Gamma}}{d\tau} = p_{\Gamma} \left(\frac{1}{T} \frac{dT}{d\tau} - \frac{Q_{C,\Gamma}}{V_{CB}} \right); \quad (2.39)$$

$$\frac{dp_{\Pi}}{d\tau} = \frac{F \cdot R \cdot T}{V_{CB} \mu_{\Pi}} j_{\Pi} - p_{\Pi} \left(\frac{Q_{C,\Pi}}{V_{CB}} - \frac{1}{T} \frac{dT}{d\tau} \right). \quad (2.40)$$

С понижением давления среды снижается температура парогазовой смеси в аппарате. Изменение температуры паровой среды можно определить с помощью следующего дифференциального уравнения:

$$\frac{dT}{d\tau} = \left[\frac{(\alpha F_M (T_{M,ПОВ} - T) + c_{\Pi} F_M j T_{ПОВ}) R}{(\mu_{\Pi} p_{\Pi} + \mu_{\Gamma} p_{\Gamma}) c_{CM} V_{CB}} - \frac{Q_{C,ПГ}}{V_{CB}} \right] T. \quad (2.41)$$

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 (2.1) – (2.3) без слагаемого, учитывающего внутренний источник тепла $q_{СВЧ}$.

Граничные условия для решения дифференциальных уравнений аналогичны выражениям (2.10) – (2.12). Однако, в уравнении (2.10) также отсутствует слагаемое $q_{СВЧ}$, учитывающее подвод тепла СВЧ-энергией.

При наличии воздуха в аппарате относительная влажность воздушной среды определяется по уравнению:

$$\varphi = \frac{P_{\Pi}(T_{\Pi})}{P_{\Pi}(T)}. \quad (2.42)$$

После завершения стадии вакуумирования цикл «нагрев-вакуум» повторяется. Представленная система уравнений (2.1) – (2.3) с учетом краевых условий (2.9) – (2.12) и выражений, определяющих мощность СВЧ энергии и значения ее компонентов, а также значений параметров внешней среды

(2.15) – (2.42) позволяет полностью описать процессы, протекающие при осциллирующей сушке пиломатериалов в СВЧ поле.

Таким образом, моделирование с помощью представленной математической модели позволит определить рациональные режимные параметры процесса СВЧ сушки пиломатериалов в вакуумной среде в режиме осцилляции.

2.4. Алгоритм расчета процесса вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме

На основе формализации физической картины согласно блочному принципу построения математического описания была разработана модель процессов тепломассопереноса при СВЧ нагреве материала, а также при понижении давления среды. На рисунке 2.4. представлен алгоритм расчета математической модели процесса СВЧ сушки пиломатериалов в режиме осцилляции давления среды, включающий ввод данных и 2 основных блока: I – блок расчета стадии нагрева древесины в СВЧ поле; II – блок расчета тепломассопереноса в условиях понижения давления среды.

Расчет начинается с ввода исходных данных, представляющих собой начальные условия процесса, теплофизические характеристики материала и теплоносителя, а также структурные характеристики штабеля, технологические параметры сушильного аппарата и другие сведения, необходимые для расчета на ЭВМ.

Процесс сушки в осциллирующем режиме состоит из двух циклов и может протекать при наличии или отсутствии воздуха в аппарате. В первом случае, когда в аппарате содержится воздух и при давлении в камере, равном атмосферному, происходит переход к блоку I для расчета первого цикла – стадии нагрева. Во втором случае, когда в аппарате отсутствует воздух, происходит расчет предварительного удаления парогазовой смеси из аппарата с помощью уравнений (2.32), (2.39) и (2.41) с дальнейшим

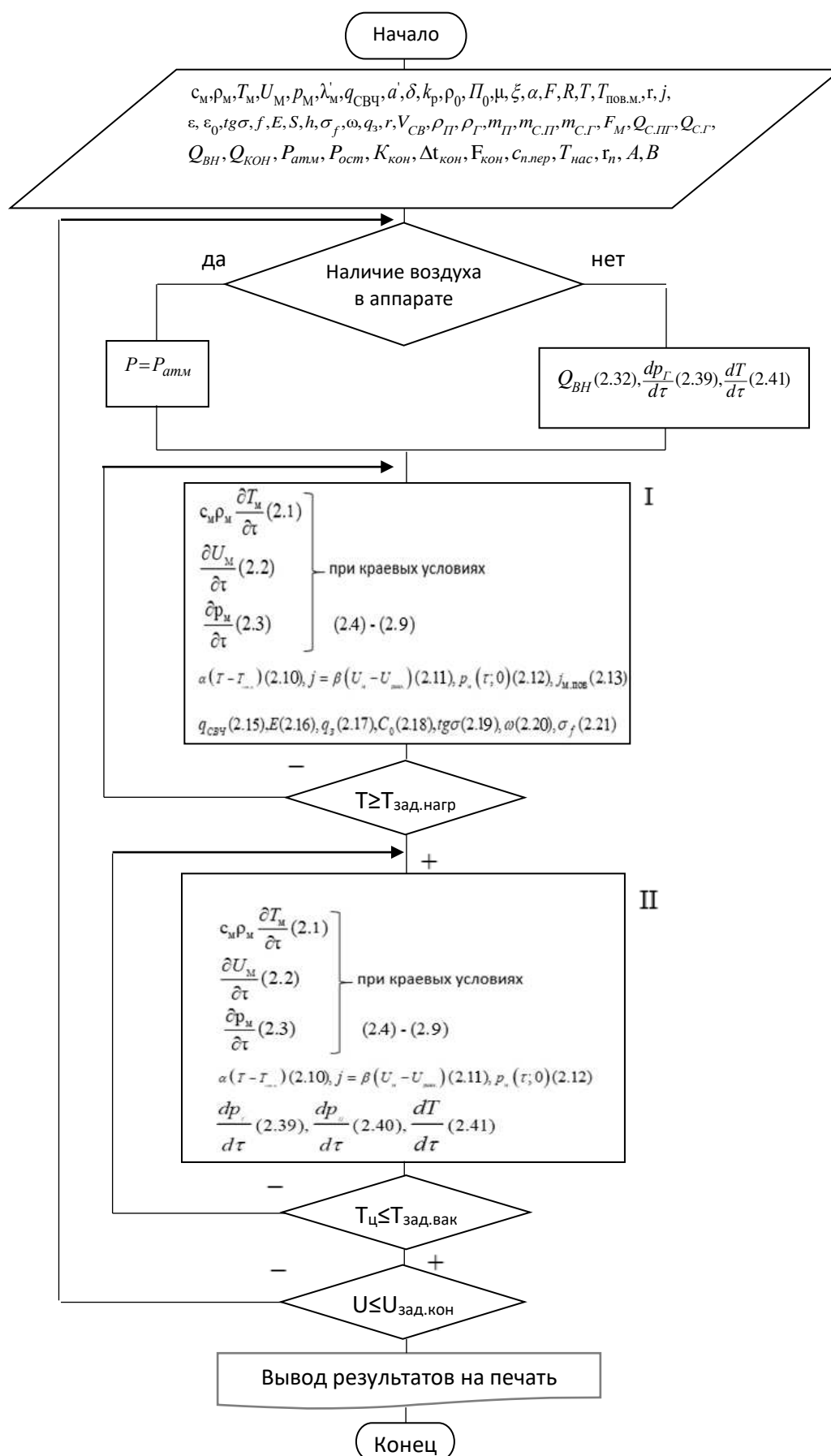


Рисунок 2.4 – Алгоритм расчета процесса вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме

переходом к блоку I для расчета стадии нагрева. Определение параметров стадии нагрева осуществляется путем решения дифференциальных уравнений тепломассопереноса внутри пиломатериала (2.1) – (2.3) при соответствующих граничных условиях (2.4) – (2.9) и выражениях, определяющих мощность СВЧ энергии и значения ее компонентов (2.15) – (2.21). При достижении температурой в центре пиломатериала заданного значения осуществляется переход к блоку II – расчету стадии вакуумирования. В случае, когда температура в центре материала на стадии нагрева не достигает заданного значения, происходит возврат к блоку I для повторения первого цикла до достижения в центре пиломатериала заданного значения.

В блоке II происходит расчет стадии вакуумирования пиломатериала путем решения уравнений (2.1) – (2.3) без учета слагаемого, учитывающего источник СВЧ-энергии при соответствующих краевых условиях и расчет тепломассопереноса в парогазовой фазе (2.39) – (2.41). Условием окончания стадии вакуумирования считается снижение температуры в центре материала до значения, определенного градиентом температуры. Если температура в центре материала на стадии вакуумирования не достигает заданного значения, происходит возврат к началу блока II. Условием перехода к окончанию процесса вакуумной СВЧ сушки в режиме осцилляции давления среды является достижение высушиваемым пиломатериалом конечного заданного значения влагосодержания. При влагосодержании в высушиваемом пиломатериале больше установленного конечного значения, происходит возврат к началу алгоритма и расчету циклов «нагрев-вакуумирование» до достижения конечного заданного значения влагосодержания. Далее осуществляется вывод результатов на печать.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВАКУУМНОЙ СВЧ-СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

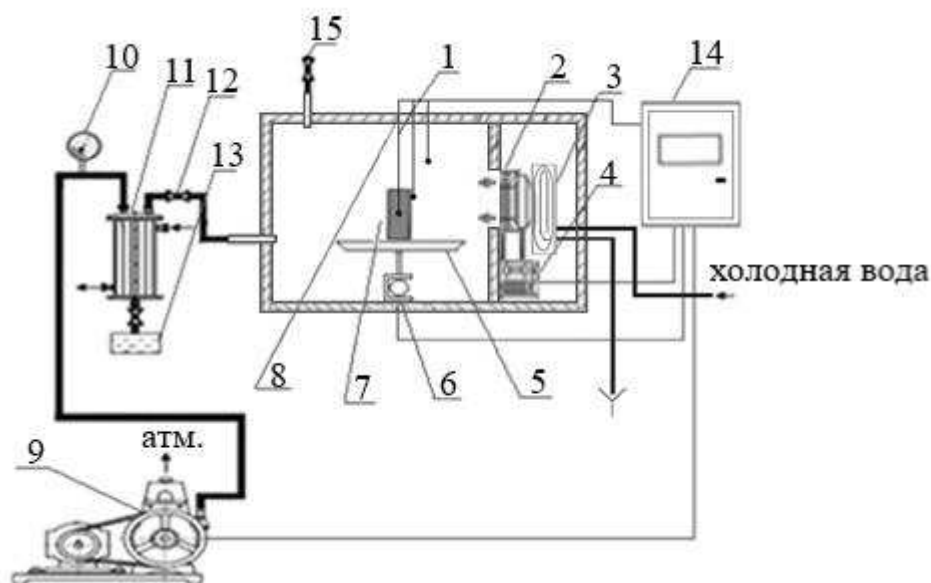
3.1. Описание экспериментальной установки для исследований процессов, протекающих при СВЧ сушке в вакуумной среде

Для проверки математической модели на адекватность и физического моделирования процессов сушки была разработана и создана экспериментальная установка, обеспечивающая подвод к материалу СВЧ-энергии и создание вакуума [74,75].

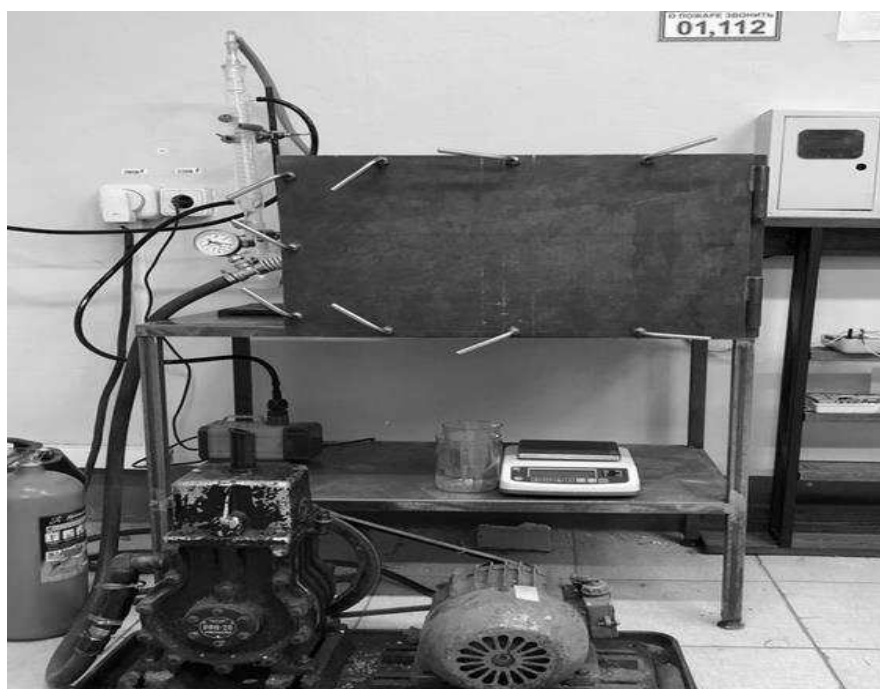
При разработке экспериментальной установки учитывались характерные особенности процессов, проявляющиеся в условиях СВЧ нагрева и в процессе сушки под вакуумом. В ходе экспериментов в качестве образцов использовались пиломатериалы сосны, березы и дуба с разной базисной плотностью и начальной влажностью, торцы которых были обработаны масляной краской, чтобы максимально исключить перенос влаги вдоль волокон древесины.

Схема и внешний вид созданной экспериментальной установки вакуумной СВЧ сушки древесины представлены на рис. 3.1. Установка содержит герметичную камеру 1, закрытую крышкой, сообщающуюся с линией конденсации и вакуумирования и разделенную на зоны: рабочую, которая используется для установки образцов 7 и проведения исследований, и техническую, предназначенную для генерации СВЧ-энергии в камере. Также установка включает вакуумный насос 9, вакуумметр 10, вакуумный кран 12 для отключения линии вакуумирования, вакуумный кран 15 для напуска воздуха, конденсатор 11 с конденсатосборником 13. Модуль СВЧ-нагрева, расположенный в технической зоне камеры 1, состоит из СВЧ-магнетрона 2 с волноводами, системы водяного охлаждения 3, состоящей из медных трубок и шлангов, и высоковольтного конденсатора 4. Подвод тепловой энергии к

пиломатериалу осуществляется электромагнитным СВЧ полем от микроволнового генератора 2, который имеет мощность 700 Вт и частоту 2450 МГц. Для определения изменения текущей массы образца камера 1 снабжена тензометрическим датчиком 6 с тарелкой 5. Установка дополнена щитком управления 14, соединенным с электрооборудованием и термопарами 8, размещенными внутри камеры 1.



а



б

Рисунок 3.1 – Схема (а) и общий вид (б) экспериментальной установки

3.2. Методика проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных

При рассмотрении процесса СВЧ сушки в зависимости от плана эксперимента в качестве материала для исследования были подготовлены образцы сортиментов сосны, березы и дуба с различным начальным влагосодержанием и размерами.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, представленной на рис.3.1, следующим образом. Высушиваемый образец, обладающий высокой естественной влажностью, на начальном этапе взвешивался, затем для замера температуры по центру через подготовленное в образце отверстие устанавливалась термопара. Для замера температуры поверхности термопара устанавливалась в поверхностной зоне. Для контрольных замеров температуры поверхности материала применялся пирометр, а для определения значения температуры среды в камере использовалась третья термопара. Все термопары были подключены к щитку управления, на котором регистрировались значения температуры. Для определения среднего значения влагосодержания в связи с тем, что процесс сушки протекает в разреженной среде, использовался весовой метод. При этом изменение текущей массы влажного образца определялось с помощью тензометрического датчика, регистрирующего в постоянном режиме текущую массу образца. После того, как образец помещался на тарелку тензометрического датчика, камеру сушки герметизировали с помощью крышки.

Осциллирующий режим СВЧ сушки пиломатериалов состоит из чередующихся стадий нагрева и вакуумирования. При этом осциллирующую СВЧ-сушку отработывали в двух режимах:

- 1) при давлении на стадии нагрева, равном атмосферному, путем соответствующего напуска воздуха в камеру;
- 2) с предварительным удалением воздуха из аппарата и созданием вакуума с

последующим ведением стадии нагрева при постепенно повышающемся давлении в камере за счет испаряющейся влаги, а также стадией понижения давления за счет конденсации испаренной влаги путем включения в работу конденсатора. При этом работа СВЧ магнетрона и вакуумного насоса осуществляется на разных стадиях: магнетрон включается в работу на стадии нагрева, вакуумный насос – на стадии вакуумирования, то есть одновременная работа СВЧ-магнетрона и вакуумного насоса не допускается.

В первом режиме процесс начинается с нагрева древесины при атмосферном давлении включением модуля СВЧ нагрева и продолжается до достижения температурой в центре высушиваемого материала заданного планом эксперимента значения. После этого происходит отключение СВЧ магнетрона. Затем с помощью блока управления в работу задействуется вакуумный насос и конденсатор. Начинается стадия вакуумирования, при которой происходит постепенное понижение давления в аппарате с последующей выдержкой при постоянном пониженном давлении. Выдержка под вакуумом осуществляется до снижения температуры в центре пиломатериала до заданного значения. После завершения одного цикла процесса открывают кран для напуска сухого воздуха в камеру и цикл «нагрев-вакуум» повторяется.

Во втором режиме процесс начинается с создания в камере разрежения путем удаления воздуха и снижения давления в камере до значения не более 2,5 кПа. После чего начинается стадия нагрева путем включения в работу СВЧ-магнетрона. За счет быстрого повышения температуры материала происходит интенсивное испарение влаги с ее поверхности, что приводит к определенному росту давления в камере за счет изменения температуры материала и испарения влаги. Стадия нагрева считается завершенной при достижении в центре пиломатериала заданной температуры. После завершения стадии СВЧ нагрева происходит отключение магнетрона с последующим переходом к стадии понижения давления – для этого в работу включается конденсатор. Включение вакуумного насоса не требуется,

поскольку воздух из аппарата был предварительно удален в начале процесса. Данная стадия завершается после достижения заданного значения температуры в центре материала. После завершения стадии конденсации цикл «нагрев-выдержка» повторяется.

Таким образом, продолжительность стадий процесса в обоих случаях определяется значением температуры в центре материала.

Для более корректного определения влияния режимных параметров на процесс сушки, экспериментальные исследования проводились в двух интервалах: при начальной влажности выше и ниже предела насыщения клеточных стенок. Для этого были проведены серии экспериментов с образцами, у которых начальная влажность значительно превышала 30 %, а также с образцами, у которых влажность была около 30 %.

Согласно плана эксперимента для первого варианта использовалась свежесрубленная древесина, средняя влажность которой к началу проведения конкретного эксперимента варьировалась в интервале 60 – 85 %. Для второго варианта использовались образцы с влажностью 28 – 30 %, при этом применялось увлажнение транспортно сухих пиломатериалов выдержкой во влажной среде.

При проведении исследований образец располагался на тарелке тензометрического датчика таким образом, чтобы СВЧ-излучение воздействовало перпендикулярно широкой пласти пиломатериала. Причем образец находился в неподвижном состоянии на протяжении полного цикла «нагрев-вакуумирование». Перед началом следующего цикла образец разворачивался на 180° с целью воздействия СВЧ-лучей на противоположную пласт материала.

Таким образом, проводился процесс СВЧ-сушки древесины до заданной конечной влажности. Количество проведенных циклов зависело от толщины пиломатериала, породы древесины и режимных параметров. После окончания эксперимента, путем разгерметизации вакуумной камеры, осуществлялся процесс естественного охлаждения материала и дальнейшее

исследование высушенного образца на имеющиеся внутренние напряжения путем выпиливания силовых секций [68,72,78].

3.3. Анализ результатов математического моделирования и экспериментальных исследований процесса осциллирующей сушки пиломатериалов в СВЧ-среде

Математическое моделирование вакуумной СВЧ сушки древесины в осциллирующем режиме представляет собой исследование влияния различных режимных и конструктивных параметров на кинетику и динамику процессов и преследует цель выявления рациональных режимов для конкретных сортиментов пиломатериалов.

Для численного моделирования распределения тепловых полей и влагосодержания по толщине сортимента и по штабелю пиломатериалов, в первую очередь, нужно учитывать диэлектрические свойства материала, характеризующие его поведение в СВЧ поле.

На рис.3.2 приведены зависимости изменения диэлектрической проницаемости от влагосодержания и температуры по толщине высушиваемых образцов сосны, полученные в результате обработки литературных данных [2,3,12,16,70].

Из приведенного 3D представления видно, что уменьшение влажности в образцах приводит к снижению диэлектрической проницаемости, что влияет на продолжительность процесса СВЧ сушки и будет увеличивать время каждого последующего цикла. Проведенная аппроксимация представленных данных позволила получить полиномиальное уравнение с величиной достоверности равной 1:

$$\varepsilon = 269.66493 - 13.763366U - \frac{11887.056}{T} + 0.2195558U^2 - \frac{162582.75}{T^2} + \frac{367.98546U}{T} - 0.0010975366U^2 + \frac{74759.852}{T^3} + \frac{1986.8309U}{T^2} - \frac{2.7096945U^2}{T}.$$

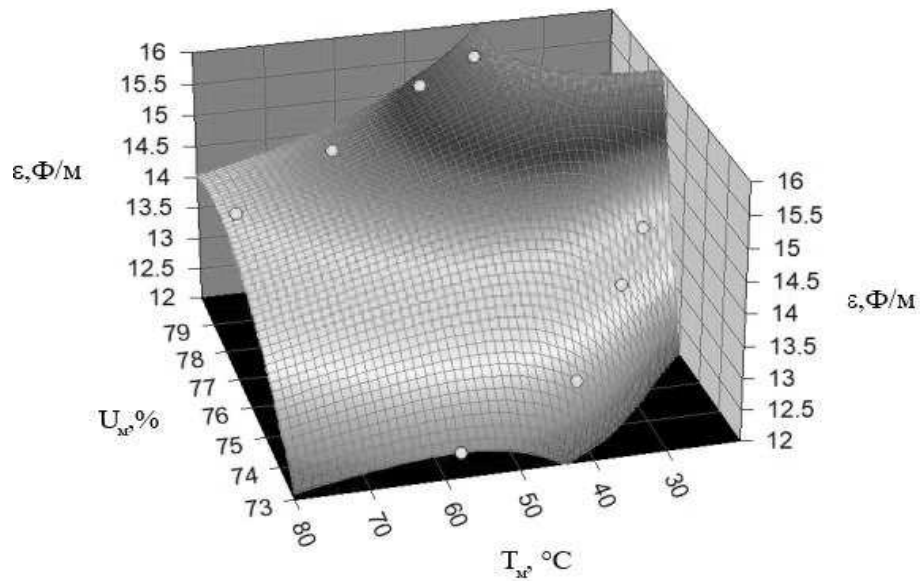


Рисунок 3.2 – 3D представление аппроксимации результатов изменения диэлектрической проницаемости сосновых образцов в зависимости от влагосодержания и температуры

С целью проверки разработанной математической модели СВЧ-сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме на адекватность были проведены экспериментальные исследования на вышеописанной установке (рис. 3.1). Проверка адекватности формализованных моделей реальным процессам производилась сопоставлением результатов экспериментальных исследований с результатами теоретических расчетов в идентичных условиях [73,76,77]. Эти результаты иллюстрированы в виде графических зависимостей, на которых сплошными линиями изображены данные, полученные расчетным путем, точками – результаты экспериментов.

Проверка адекватности математической модели проводилась на единичных сортиментах. В целях повышения точности математического описания изменения величины влагосъема от различных факторов, процесс целесообразно рассматривать в двух интервалах: сушка образца с влажностью выше и ниже предела насыщения клеточных стенок.

Для определения изменения полей температуры, давления и влажности материала было проведено математическое моделирование одного полного

цикла вакуумно-импульсной СВЧ сушки пиломатериалов сосны толщиной 50 мм в сопоставлении с экспериментом в идентичных условиях (рис.3.3). При этом сравнительный анализ проводился по значениям температуры поверхности и центра материала, замеренных с помощью установленных в образцах термопар, а также по значениям среднего влагосодержания, определенного весовым методом. В ходе статистической обработки полученных экспериментальных и теоретических данных было выявлено, что расхождение между ними не превышает 18 % и разработанная математическая модель может быть признана адекватной и использоваться для определения рациональных параметров.

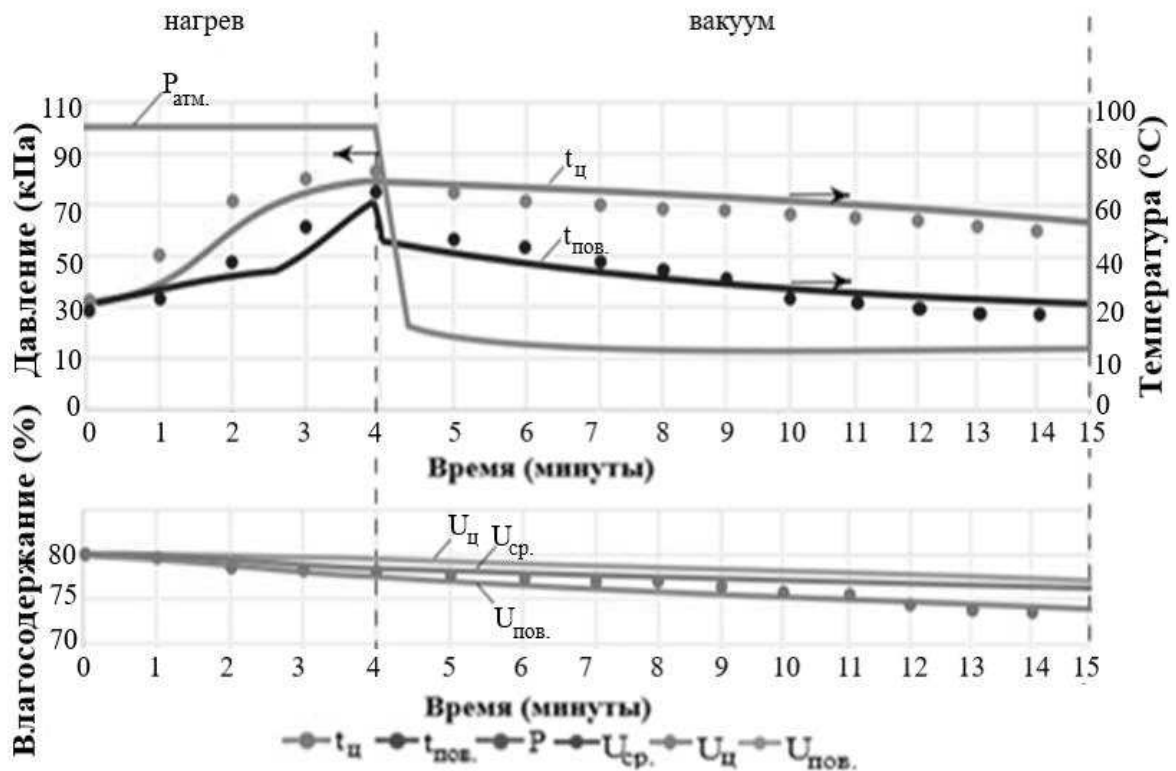


Рисунок 3.3 – Цикл процесса вакуумно-импульсной сушки сосновых пиломатериалов в СВЧ среде при влагосодержании 80 %

На основании проведенного моделирования одного цикла процесса вакуумной СВЧ сушки сортиментов сосны в режиме осцилляции давления среды были получены кривые, характеризующие изменение полей температуры и влагосодержания в материале при нагреве сортимента (рис.3.4-

3.7). СВЧ магнетрон на протяжении всего опыта располагался с одной стороны образца.

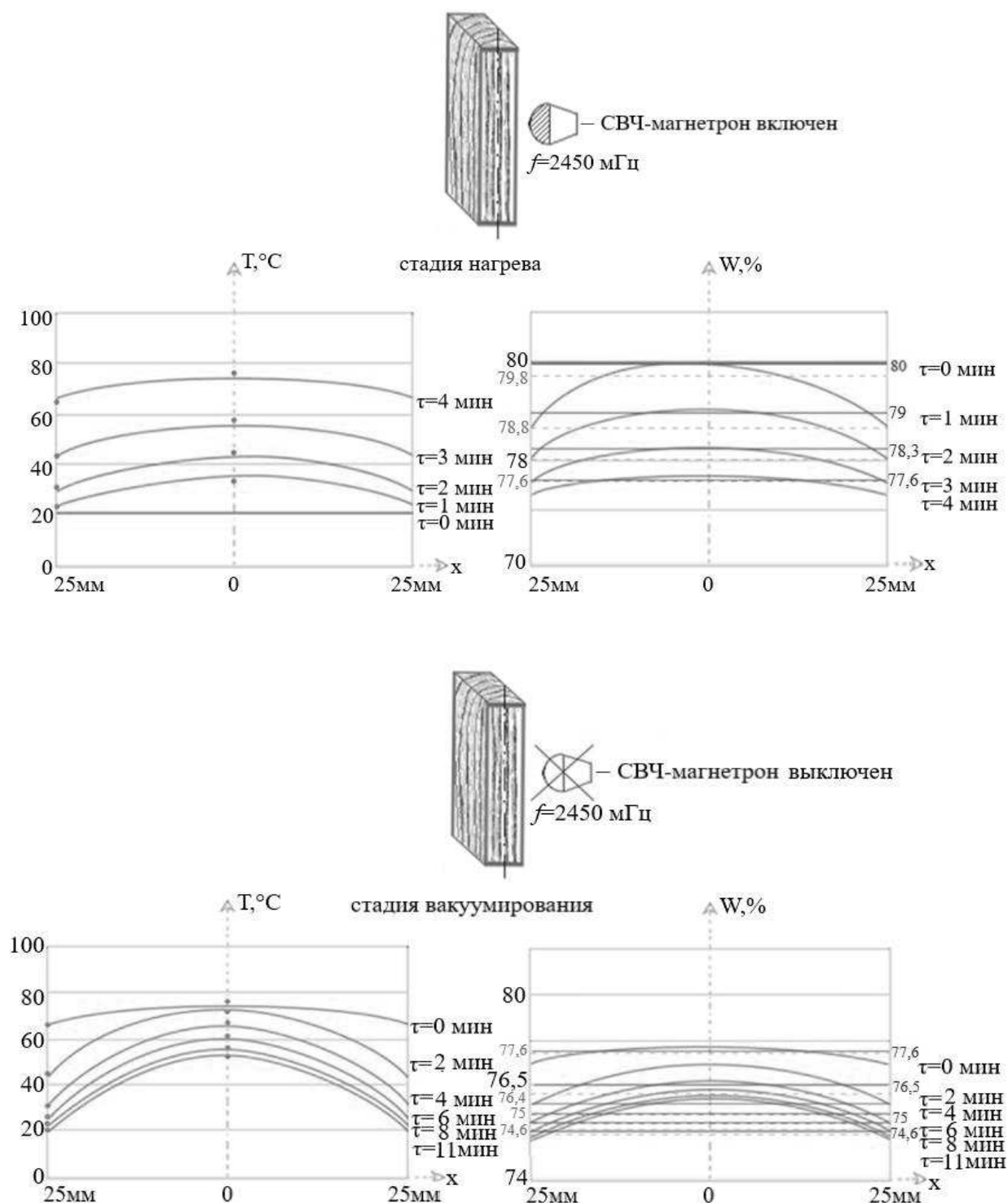


Рис.3.4 – Расчетные и экспериментальные кривые распределения температуры и влагосодержания единичного сортимента сосны с начальным влагосодержанием 80 % и $\varphi = 100$ %

На представленных графических зависимостях, отражающих изменение температуры и влагосодержания по сечению материала, прослеживаются основные закономерности процесса сушки древесины при осциллирующем режиме подвода СВЧ энергии с облучением перпендикулярно пласти. Средние значения влажности, полученные расчетным путем, отображены на графиках в виде пунктирной линии, а данные средней влажности, полученные экспериментально, – в виде сплошной линии. Из рис.3.4 видно, что на этапе нагрева, когда поток испаряющейся влаги равен нулю, вследствие относительной влажности среды $\phi = 100 \%$, происходит только конвективный теплообмен и внутренний перенос тепла и массы за счет теплопроводности и тепловлагопроводности, соответственно, что приводит к малому перепаду влажности по толщине пиломатериала. При этом наблюдается несимметричная картина полей температуры и влагосодержания со сдвигом пика температуры в сторону включенного в работу СВЧ-магнетрона. При этом градиент температуры оказывает влияние на влагоперенос, смещая пик влажности в противоположную сторону от центра пиломатериала.

На стадии вакуумирования наблюдается постепенное выравнивание температуры и влажности со смещением пиков к центру материала, вследствие чего картина становится более симметричной.

Из графиков на рис.3.5 видно, что при наличии в древесине только гигроскопической влаги наблюдается незначительный перепад температуры по слоям, что объясняется тем, что не наблюдается интенсивного испарения влаги с поверхности материала. Кроме того, при высоком содержании влаги в образцах пиломатериалов сосны наблюдается высокая диэлектрическая проницаемость, способствующая увеличению скорости нагрева и более симметричной картине. Снижение диэлектрической проницаемости материала, возникающее за счет снижения влаги, приводит к уменьшению скорости нагрева и к более резкому смещению пиков температуры и влажности от центра материала.

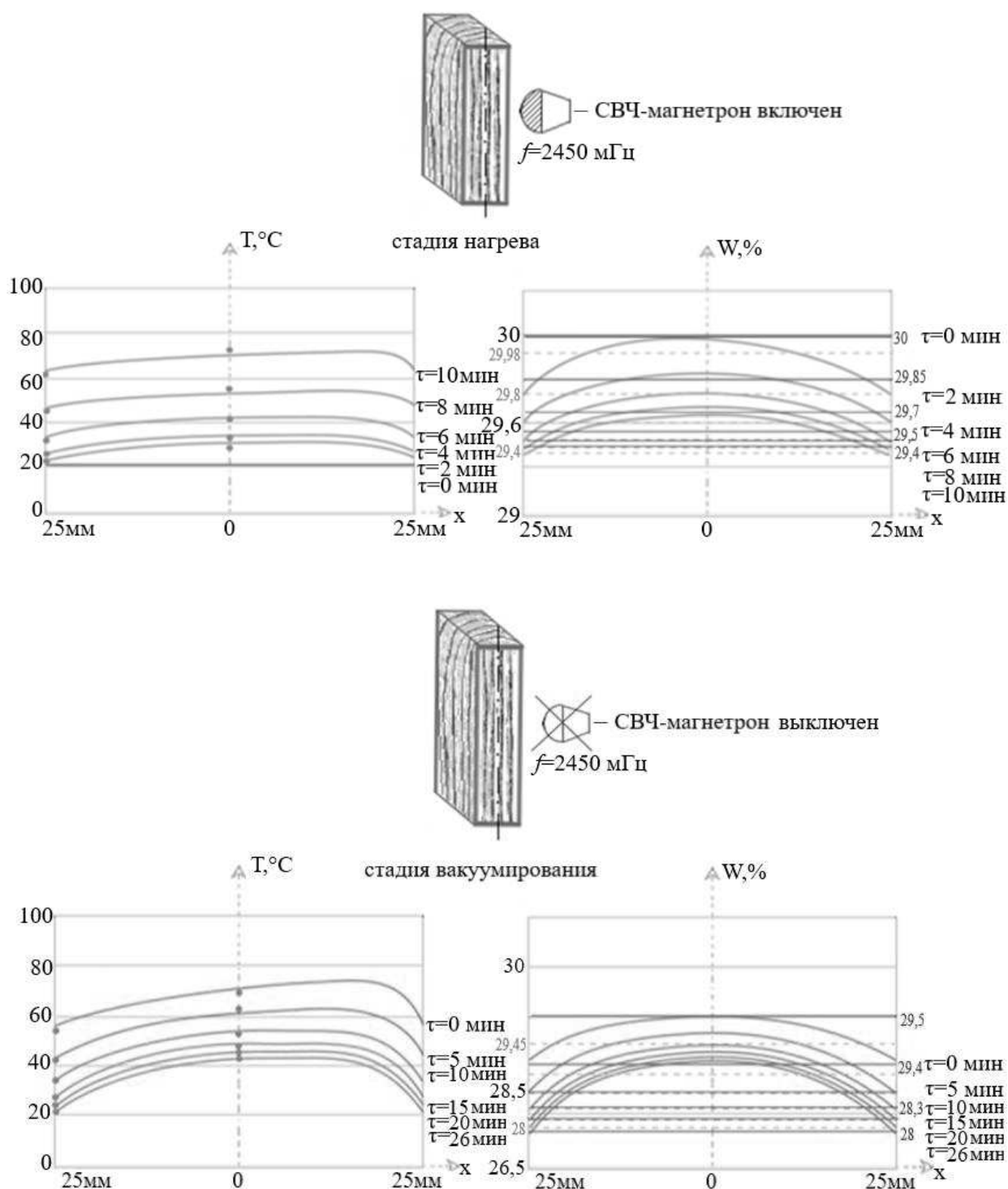


Рис.3.5 – Расчетные и экспериментальные кривые распределения температуры и влагосодержания единичного сортимента сосны с начальным влагосодержанием 30 % и $\phi = 100$ %

В ходе анализа полученных кривых было установлено, что при нагреве сортимента только с одной стороны на каждой стадии цикла постоянно наблюдается перекося температуры и влагосодержания. По этой причине

необходимо проводить нагрев сортимента с двух противоположных сторон с чередующимся включением источника СВЧ излучения для выравнивания картины сушки.

Таким образом, дальнейшее моделирование происходило с изменением стороны облучения материала. Каждая следующая стадия нагрева проводилась с изменением облучаемой пласти пиломатериала: в первом цикле СВЧ магнетрон располагался условно «справа» от сортимента, во втором цикле – «слева».

Результаты вычислений стадии нагрева и вакуумирования толстых сортиментов с начальным влагосодержанием 60 % при расположении излучателя СВЧ энергии справа от сортимента и облучением перпендикулярно к пласти представлены на рис.3.6. Из характера кривых 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 нем. В этом случае температура поверхности растет лишь с ростом влажности среды в камере.

На этапе вакуумирования, вследствие выключения СВЧ-нагрева, происходит снижение температуры в материале. Влажность начинает постепенно выравниваться и стремится к симметричному распределению относительно оси материала. За один полный цикл происходит постепенное снижение влажности образца в интервале примерно с 60 % до 55 %.

После завершения одного полного цикла в работу включается второй СВЧ магнетрон, расположенный условно слева от сортимента (рис.3.7) – начинается второй цикл при влажности образца, равной 55 %. В данном случае происходит постепенное смещение пика температуры влево, в то 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. Рассмотренные в работе кривые отражают влияние

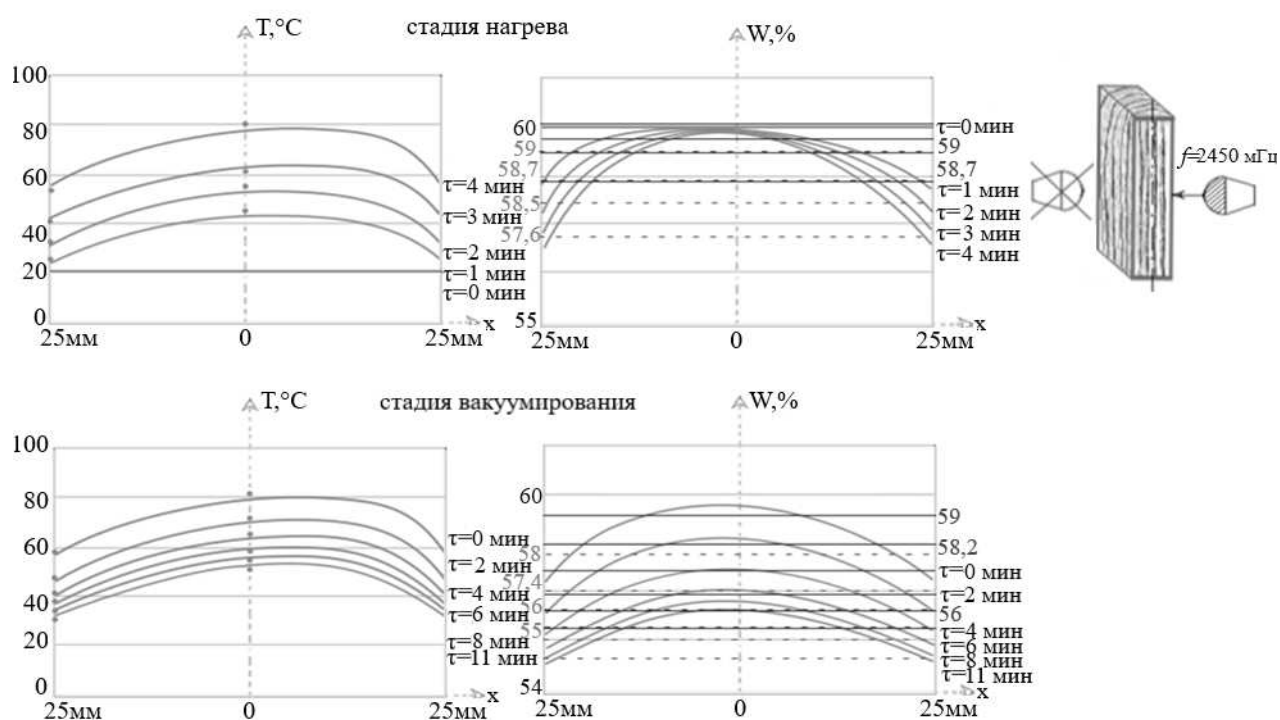


Рисунок 3.6 – Распределение температуры и влагосодержания по сечению сортимента сосны при облучении перпендикулярно пласти с включением СВЧ магнетрона справа (цикл №1)

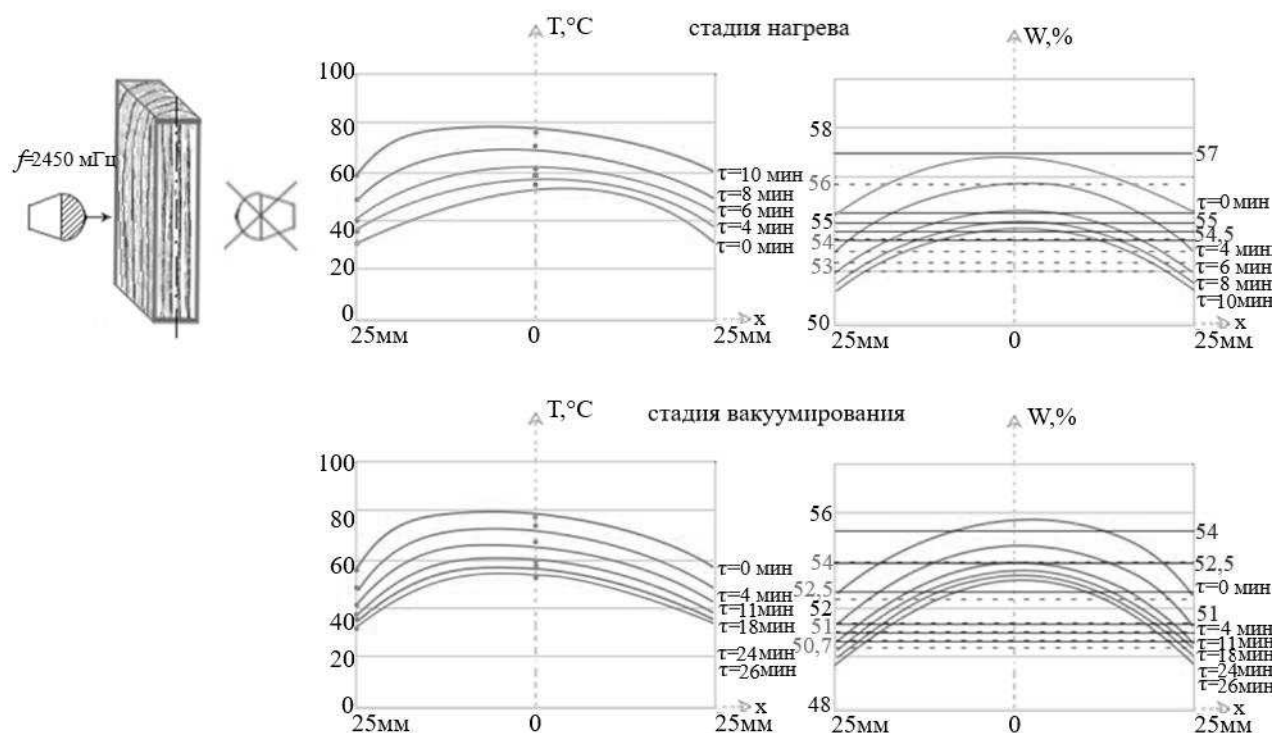


Рисунок 3.7 – Распределение температуры и влагосодержания по сечению сортимента сосны при облучении перпендикулярно пласти с включение СВЧ магнетрона слева (цикл №2)

электромагнитного СВЧ поля на физическую картину сушки единичного сортимента, поэтому далее были проведены расчетные исследования изменения удельной мощности СВЧ-нагрева в штабеле пиломатериалов в зависимости от влагосодержания, длины сортиментов, расстояния между СВЧ-магнетроном и пиломатериалом (рис.3.8). Из рисунка видно, что чем больше содержание влаги в материале и чем меньше расстояние между СВЧ-генератором и пиломатериалом, тем больше напряженность электрического поля, за счет чего возрастает удельная мощность СВЧ-нагрева материала.

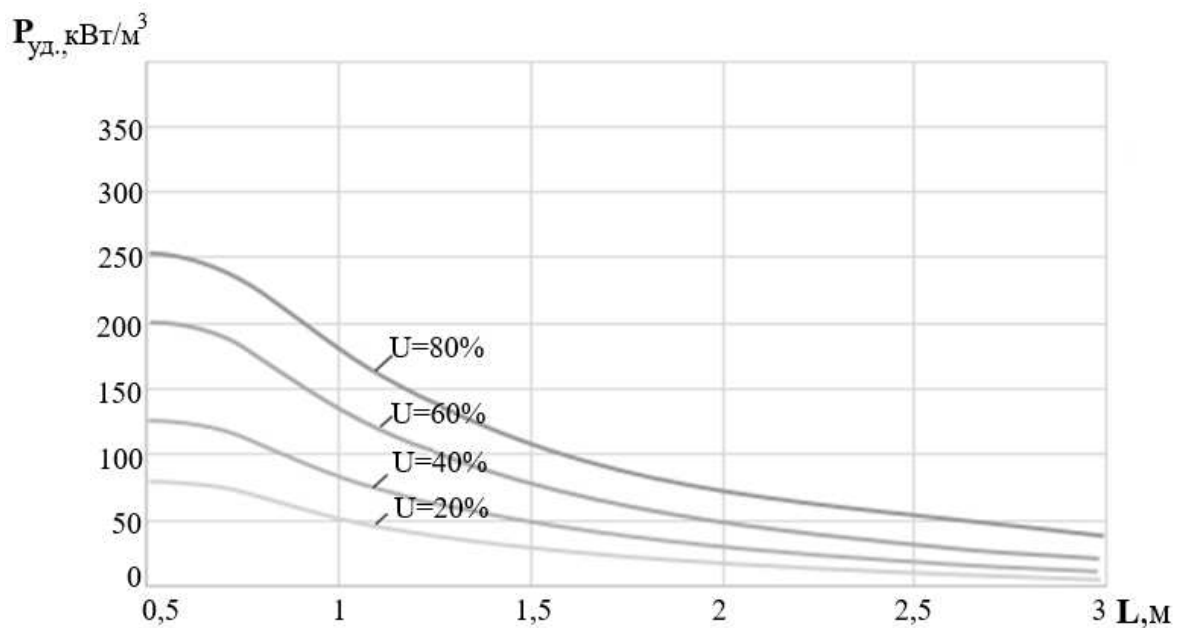


Рисунок 3.8 – Расчетные кривые изменения удельной мощности СВЧ-нагрева образцов сосны в зависимости от влажности и расстояния между СВЧ-генератором и пиломатериалом

Далее рассматривалась одномерная симметричная модель процесса сушки единичных сортиментов в привязке к их расположению в штабеле. Магнетроны располагают в верхней и нижней частях камеры при воздействии СВЧ излучения перпендикулярно пласти сортиментов. Для получения полной физической картины распределения температуры и влажности по сечению пиломатериалов в процессе осциллирующей вакуумной СВЧ сушки была создана схема расчета, представленная на рис.3.9, на которой определены сортименты в верхнем, среднем и нижнем рядах штабеля и их удаленность от

магнетронов.

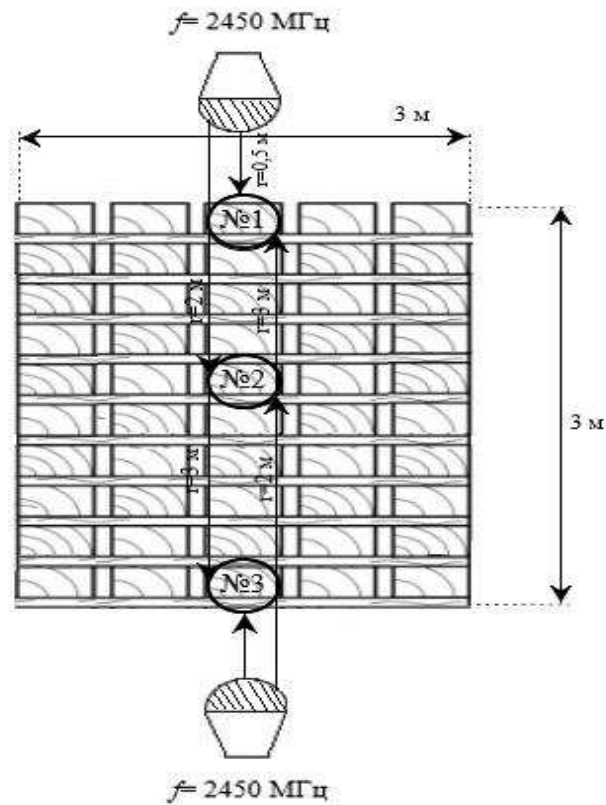


Рисунок 3.9 – Схема для расчета распределения полей температуры и влагосодержания по сечению сортиментов в зависимости от расположения сортимента в штабеле при двухстороннем воздействии СВЧ излучения

Результаты численного исследования температуры и влагосодержания высушиваемых сортиментов в процессе СВЧ сушки при двухстороннем воздействии СВЧ-энергии частотой 2450 МГц представлены на рис. Б1.1 Приложения Б1. В процессе расчета пренебрегаем суммарным действием двух магнетронов на конкретный сортимент, рассматривая лишь воздействие СВЧ-излучения от ближайшего источника ввиду высоких потерь микроволновой энергии при ее прохождении через штабель пиломатериалов от более удаленного источника. Как видно из кривых, при одновременном включении СВЧ магнетронов наблюдается несимметричная картина полей температуры и влагосодержания внутри сортиментов №1 и №3 на протяжении всего цикла и процесса сушки, соответственно. В это же время поля температуры и влажности для сортимента №2 носят симметричный характер. Таким образом,

одновременное включение двух СВЧ магнетронов по разные стороны штабеля не только не позволяет получить равномерное распределение конечной влажности по сечению сортимента, но и влечет неравномерность конечной влажности пиломатериалов по штабелю.

При рассмотрении процесса сушки, когда нагрев штабеля осуществляется с попеременным включением СВЧ магнетронов в разных циклах, моделировалось влияние СВЧ излучения в четырех точках штабеля (рис.3.10).

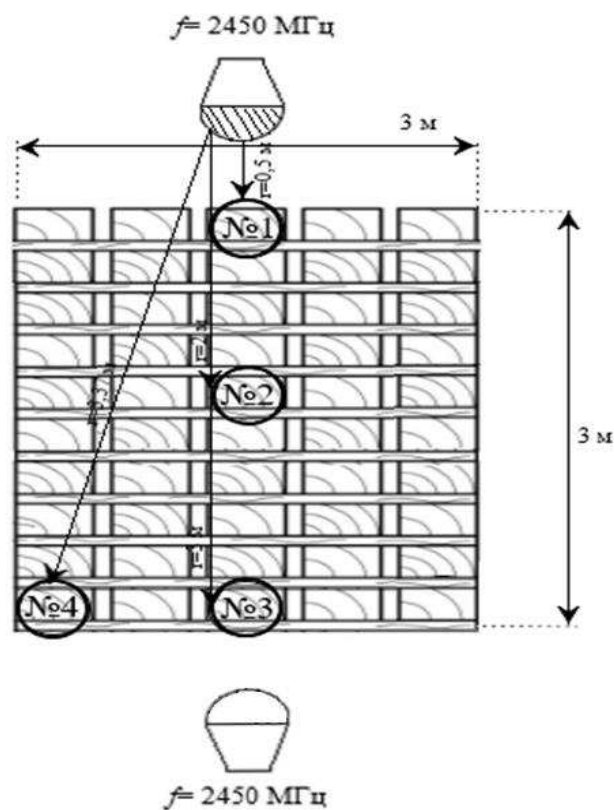


Рисунок 3.10 – Схема для расчета распределения полей температуры и влагосодержания в материале при переменном включении СВЧ-излучателей

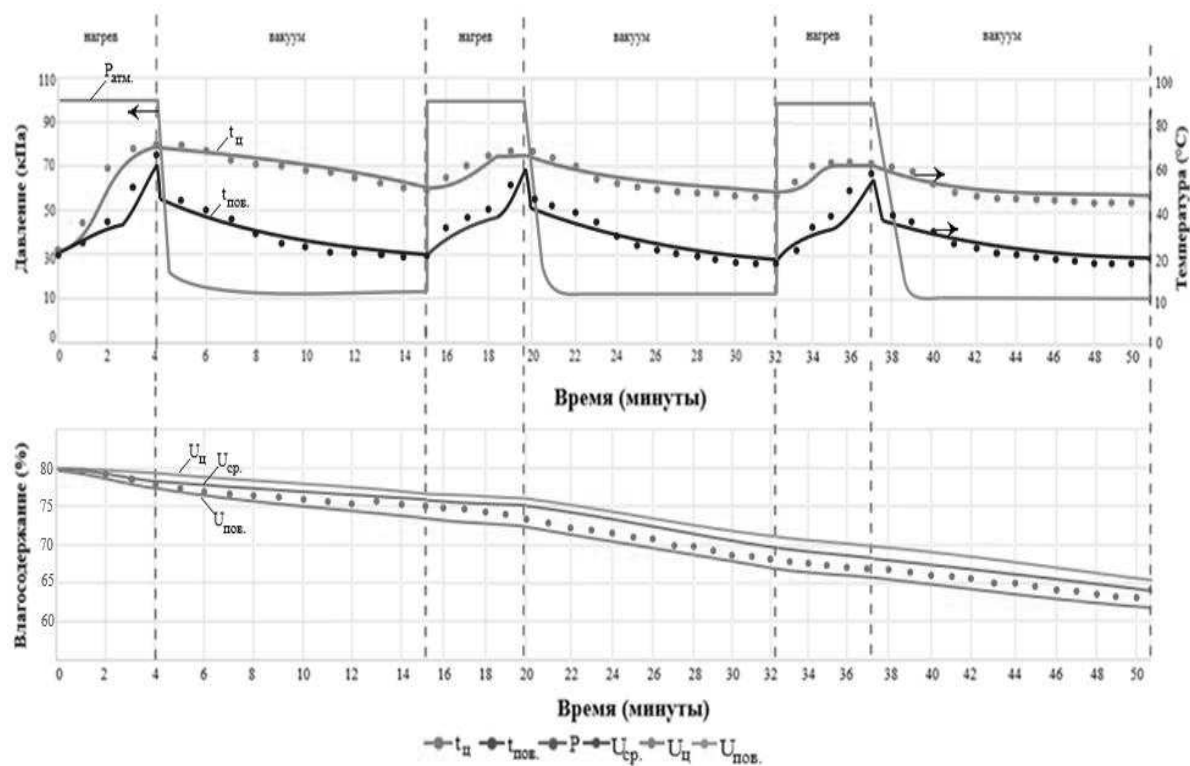
На рис. Б1.2 и Б1.3 Приложения Б1 представлены графические зависимости изменения температуры и влажности по сечению сортимента в зависимости от расстояния между СВЧ излучателем и определенной зоной пиломатериалов. Как и в случае сушки единичных сортиментов, осциллирующий режим состоит из стадий нагрева и вакуумирования. Из графических зависимостей видно, что с увеличением расстояния между

источником СВЧ излучения и рассматриваемым сортиментом наблюдается снижение температуры нагрева материала и соответствующее уменьшение влагосъема.

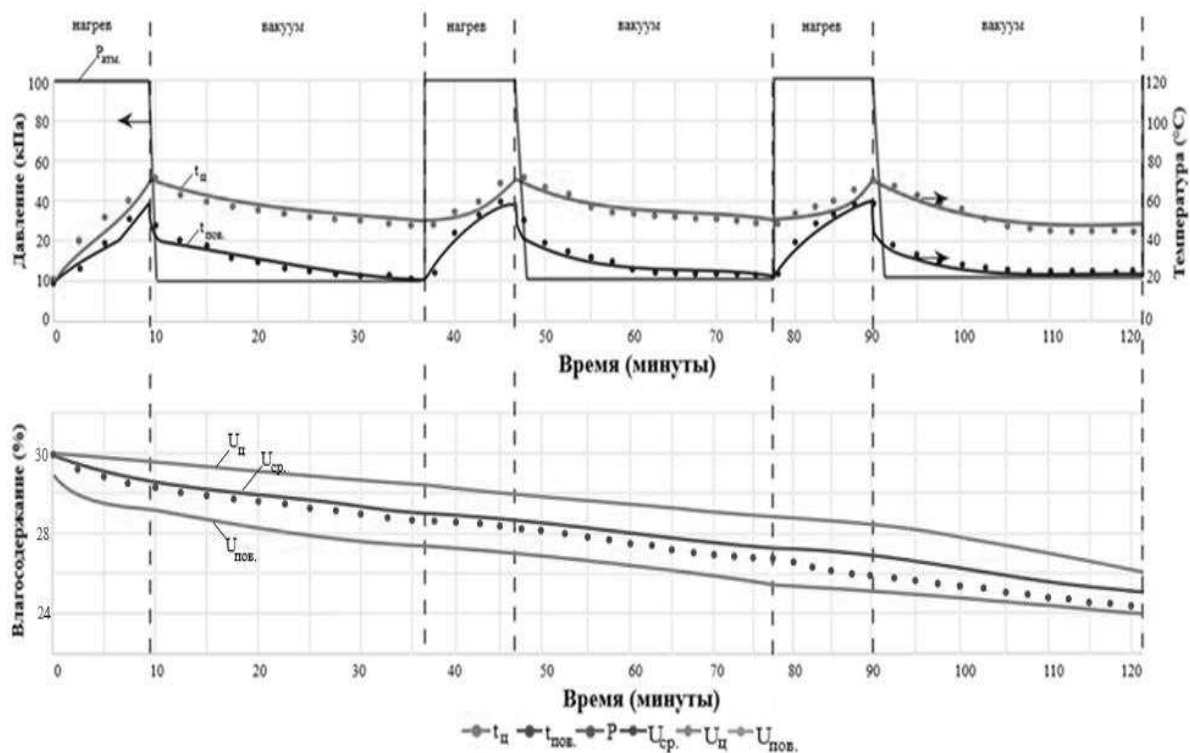
В первом цикле на стадии нагрева при условном расположении СВЧ магнетрона сверху штабеля осуществляется прохождение СВЧ поля через верхнюю пластъ сортимента, что вызывает постепенное смещение пика температурной кривой вправо – ближе к источнику излучения. Во втором цикле при включении СВЧ магнетрона с противоположной стороны от сортимента наблюдается обратный эффект. Таким образом, изменение точки излучения в разных циклах сушки позволяет повысить равномерность конечной влажности пиломатериалов по штабелю.

В ходе проведенного выше математического моделирования были рассмотрены картины процесса вакуумной СВЧ сушки пиломатериалов в осциллирующем режиме только по 1 – 2 начальным циклам. Поэтому была рассмотрена картина процесса в динамике с несколькими циклами. На рис. 3.11 представлены полученные в ходе расчетов кинетические зависимости температуры, давления, влажности среды и материала в процессе сушки в осциллирующем режиме для образцов сосны с толщиной 50 мм и начальной влажностью $U_n = 80 \%$ (а), $U_n = 30 \%$ (б) с подводом СВЧ энергии и последующей выдержкой в разреженной среде с остаточным давлением 10 кПа.

Как видно из рис. 3.11.а, один цикл процесса сушки состоит из двух стадий – нагрева и вакуумирования. Нагрев древесины проводится при атмосферном давлении, чтобы максимально интенсифицировать данный процесс и минимизировать удаление влаги с поверхности пиломатериала. Повышение температуры материала вызывает испарение влаги с поверхностных слоев, вследствие чего начинает расти влажность среды. С ростом влажности среды растет температура поверхности материала, поскольку она равна температуре «мокрого» термометра и к моменту



а



б

Рисунок 3.11 – Графики протекания процесса вакуумно-импульсной сушки сосновых пиломатериалов в СВЧ среде: а – при начальном влагосодержании 80 %; б – при начальном влагосодержании 30 %

повышения относительной влажности среды до 100 % достигает 37 °С, что отображается в виде перегиба на кривых температуры поверхности материала и относительной влажности воздуха. Стадия нагрева заканчивается при достижении температуры в центре материала 70 °С. Далее начинается стадия вакуумирования, при которой происходит понижение давления в камере по экспоненциальному закону с последующей выдержкой при постоянном давлении 10 кПа. При этом на данной стадии происходит значительное по скорости снижение температуры поверхности материала до значения 45 °С с ее последующим, более плавным, понижением до температуры окружающей среды. Вместе с этим понижается температура центра материала. Стадия вакуумирования длится до достижения в центре материала заданной температуры 50 °С.

В связи с ведением процесса нагрева образца СВЧ излучением при влажности выше предела насыщения клеточных стенок, за первый полный цикл процесса сушки продолжительностью 15 минут средняя влажность в материале уменьшилась, практически, на 5 %. При этом было установлено, что влага из зоны поверхности высушиваемого образца испаряется более интенсивно, нежели из центральной зоны.

После завершения одного цикла процесса происходит открытие клапанов для напуска сухого воздуха в камеру сушки, что ведет к повышению давления в камере до атмосферного. В этот момент относительная влажность воздуха резко понижается до значения 40 %. Далее цикл повторяется. Процессы нагрева и вакуумирования в каждом последующем цикле увеличиваются по времени вследствие того, что с уменьшением влажности древесины происходит значительное уменьшение значения диэлектрической проницаемости материала, влияющего на интенсивность нагрева. Таким образом, в ходе моделирования и экспериментальных исследований было выявлено, что диэлектрическая проницаемость материала напрямую оказывает существенное влияние на протекание процесса сушки.

Результаты расчета процесса вакуум-осциллирующей СВЧ сушки

пиломатериалов с начальным влагосодержанием 30 % продемонстрированы на рис. 3.11.б. Стадия нагрева древесины, как и в случае сушки древесины с начальной влажностью 80 %, проводится при атмосферном давлении в камере. При этом скорость повышения температуры в центре материала также выше скорости нагрева поверхности материала, с которой происходит испарение влаги. Однако, вследствие снижения как внутреннего влагопереноса, так и скорости испарения связанной влаги с поверхности материала, перепад температуры между центральной и поверхностной зонами менее значителен. Влажность центральной зоны за период нагрева практически не изменяется. Стадия нагрева считается завершенной при достижении в центре пиломатериала заданной температуры – 60 °С. После этого начинается стадия вакуумирования, длительность которой, в среднем, практически вдвое превышает продолжительность данной стадии при содержании в пиломатериале свободной влаги. Первый цикл заканчивается при достижении центром материала заданного значения (в данном случае – 50 °С). Температура поверхности при этом составляет порядка 20 °С, то есть градиент температуры по сечению материала составляет 1,2 °С/мм.

Как и в предыдущем случае, после завершения полного цикла процесса происходит напуск сухого воздуха в камеру сушки, что ведет к повышению давления до атмосферного, после чего цикл «СВЧ-нагрев – вакуумирование» повторяется. Из представленных графических зависимостей видно, что за период сушки приблизительно в 3 часа влажность материала снижается примерно на 36 %. Общая продолжительность процесса до достижения влажности сосновым пиломатериалом 8 % составляет порядка 32 часов.

На рис. 3.12 представлены результаты математического моделирования процесса осциллирующей СВЧ-вакуумной сушки образцов сосны толщиной 50 мм с начальной влажностью $U_n = 80 \%$ (а), $U_n = 30 \%$ (б) без напуска воздуха в камеру на стадии нагрева в виде графических зависимостей кинетики температуры, давления и влажности высушиваемого материала.

Процесс сушки начинается удалением воздуха из аппарата путем

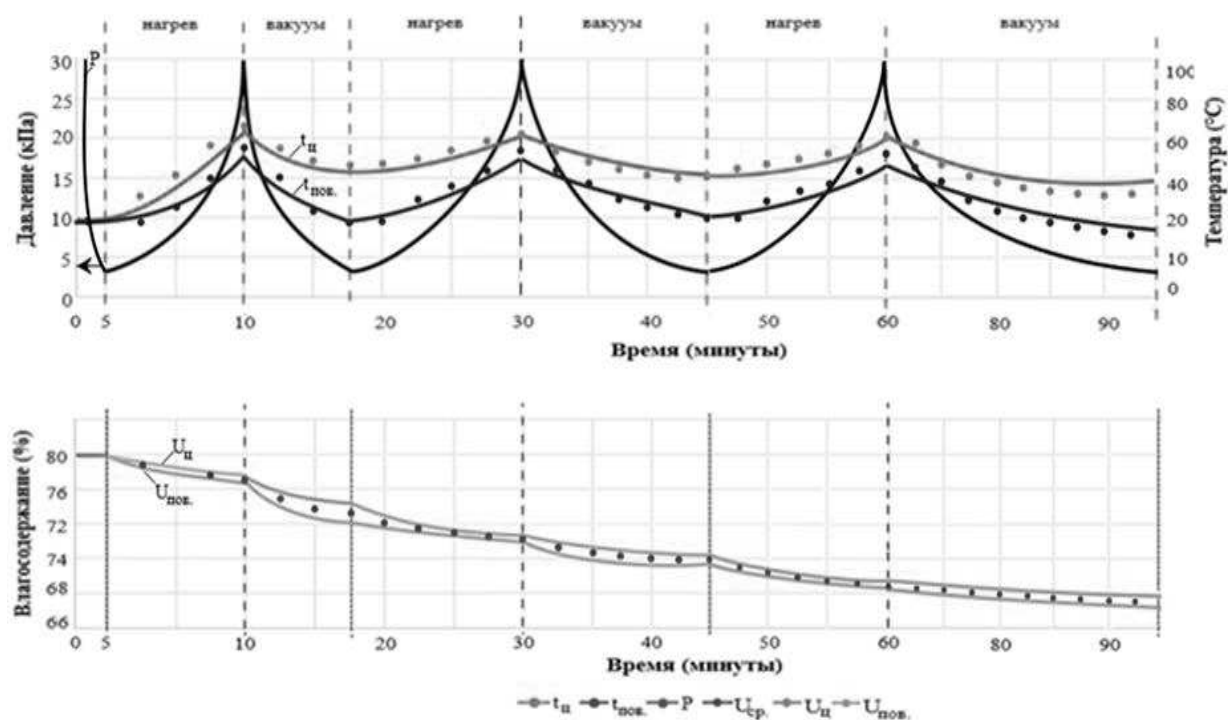
включения вакуумного насоса в работу. Изменения параметров в процессе сушки при начальной влажности $U_n = 80 \%$ отображены на рис. 3.12.а. Как видно из графиков, давление в камере и температура поверхности материала взаимосвязаны $P = f(T_{\text{пов.}})$. Процесс при этом начинается со снижения давления от атмосферного до значения 2,5 кПа без подвода СВЧ энергии. Начальная стадия нагрева из-за большого содержания свободной влаги в пиломатериале является достаточно долгим процессом с медленным подъемом температуры поверхности материала. Вместе с этим повышение температуры в центре благодаря СВЧ нагреву выше температуры поверхности приводит к движению влаги в материале за счет возникающих градиентов температуры и давления. При этом с поверхности материала происходит интенсивное испарение влаги. В этой связи влажность материала снижается практически равномерно по всему сечению. Данная стадия считается завершенной при достижении в центре заданной температуры 70°C , давление среды при этом достигает 30 кПа за счет испарения влаги из пиломатериала. После этого в работу включается конденсатор и начинается стадия понижения давления пара за счет конденсации до значения 2,5 кПа и температуры поверхности порядка 20°C , поскольку на данной стадии температура поверхности образца зависит от значения давления в камере $T_{\text{пов.}} = f(P)$. Вследствие выключенного из работы СВЧ-генератора начинается снижение температуры центра материала, стремясь к температуре поверхности. При достижении значения температуры материала в центре 40°C , цикл повторяется и в работу включается СВЧ генератор для возобновления нагрева материала, а конденсатор выключается, вследствие чего давление в камере снова начинает расти за счет испарения влаги. На этой стадии наблюдается снижение градиента влагосодержания по слоям пиломатериала. В первые два периода продолжительность стадии нагрева древесины протекает практически без изменений, лишь в последующих периодах процесс нагрева становится с каждым разом все короче, однако при этом стадия конденсации пара, наоборот, увеличивается по времени.

Таким образом, за каждый полный цикл осциллирующей сушки материала с начальной влажностью 80 %, продолжительностью в среднем 20 минут, удаляется порядка 7 % влаги.

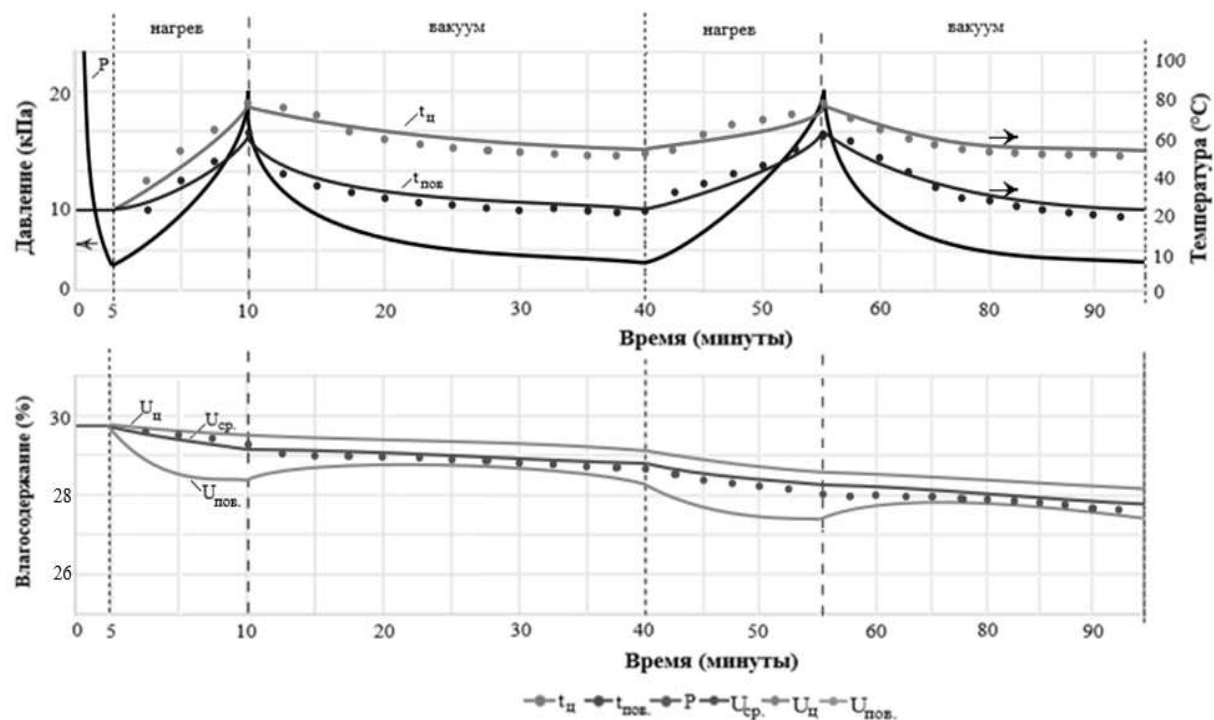
На рис. 3.12.6 в виде графических зависимостей продемонстрирован второй этап процесса сушки при влажности древесины ниже предела насыщения клеточных стенок. Как и в предыдущем случае, процесс начинается с удаления воздуха из камеры и, соответственно, со снижения давления от 100 кПа до значения 2,5 кПа без подвода СВЧ энергии. Далее на стадии нагрева древесины происходит интенсивное повышение температуры в центральной зоне, в то время как поверхность материала нагревается медленнее, не достигая значения температуры центра материала. Стадия нагрева считается завершенной при достижении в центре пиломатериала температуры 70 °С. К этому моменту давление в камере достигает порядка 20 кПа. После этого начинается стадия конденсации пара с понижением давления в камере до значения 2,5 кПа. Так как содержащаяся в древесине связанная влага не подвержена процессу кипения, движение влаги к поверхности происходит только за счет градиентов температуры и влагосодержания.

При этом в периоде нагрева за счет испарения большого количества влаги с поверхности, влагосодержание поверхностных зон значительно снижается с возникновением существенного перепада влажности по слоям и развития соответствующих внутренних напряжений. На стадии конденсации пара происходит перемещение влаги из центральных слоев к поверхности, что ведет к ее увлажнению и снятию напряжений. Таким образом, в ходе осциллирующей СВЧ-сушки без напуска воздуха на стадии нагрева при удалении связанной влаги стадией, приводящей к наиболее опасному развитию внутренних напряжений, является стадия нагрева. Стадия понижения давления является релаксирующей.

В первой части данной главы были проведены исследования, направленные на определение рационального расположения и принципа



а



б

Рисунок 3.12 – Расчетные кривые изменения температуры, давления и влагосодержания образцов сосны при импульсном подводе СВЧ энергии в процессе сушки с конденсацией пара: а – при начальном влагосодержании 80 %; б – при начальном влагосодержании 30 %

включения в работу СВЧ магнетрона, как при сушке единичных сортиментов, так и штабеля древесины. В ходе проведенных расчетных и экспериментальных исследований было установлено, что регулировать равномерность сушки как по сечению пиломатериала, так и по штабелю в целом можно путем включения в смежных циклах осциллирующей сушки источника СВЧ излучения то с одной стороны, то с другой стороны штабеля перпендикулярно пластям пиломатериалов, что делает данный вариант приоритетным по сравнению с ведением процесса сушки при одновременном двухстороннем нагреве.

В процессе рассмотрения предложенных в работе двух режимов проведения импульсной СВЧ сушки был сделан вывод, что при влагосодержании в материале выше насыщения клеточных стенок целесообразнее использовать режим, описанный на рис. 3.12, при котором стадия нагрева осуществляется без напуска воздуха в аппарат. Создаваемое в таком случае разрежение благодаря молярному переносу влаги позволяет интенсифицировать удаление свободной влаги из пиломатериала на стадии нагрева. Напуск воздуха в камеру сушки по режиму, исследованному на рис.3.11, осуществляется после одного полного цикла осциллирующей сушки и является целесообразным, когда влагосодержание в материале становится ниже 30 %, поскольку позволяет снизить риск развития значительных внутренних напряжений в материале на стадии нагрева. Таким образом, комбинируя данные режимы можно получить наибольшую интенсификацию процесса СВЧ сушки при минимальных перепадах влажности по толщине пиломатериала и, как следствие, высокое качество сушки.

Теперь основная задача состоит в определении рациональных режимных параметров процесса вакуумной СВЧ сушки в режиме осцилляции давления среды. Для этого необходимо рассмотреть изменение величины влагосъема на стадиях СВЧ нагрева и вакуумирования и определить рациональную продолжительность данных стадий (рис.3.14-3.16).

На рис. 3.14, 3.15 представлены кривые изменения продолжительности

стадии нагрева и влагосъема при сушке сосновых сортиментов толщиной 50 мм с разной влажностью в зависимости от величины конечной температуры нагрева материала на данной стадии. В процессе моделирования и экспериментальных исследований было установлено, что увеличение температуры нагрева не приводит к серьезному снижению диэлектрической проницаемости материала. При этом происходит значительное увеличение величины влагосъема с одновременным увеличением продолжительности процесса сушки. Однако температура нагрева оказывает существенное влияние на физико-механические свойства древесины, поэтому целесообразным представляется проводить нагрев пиломатериалов при поддержании температуры в диапазоне порядка 70 – 80 °С. Также отмечено, что с уменьшением влажности материала наблюдается уменьшение величины влагосъема за один цикл. 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.

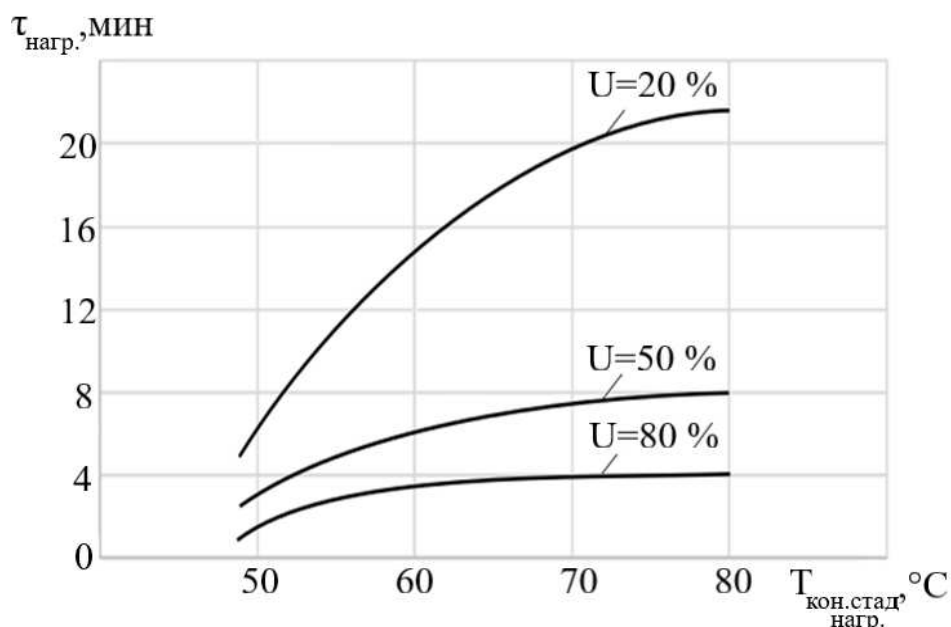


Рис.3.14 – Зависимость продолжительности стадии СВЧ нагрева в одном цикле сушки сосновых сортиментов ($s = 50$ мм) при разном содержании влаги от величины конечной температуры нагрева

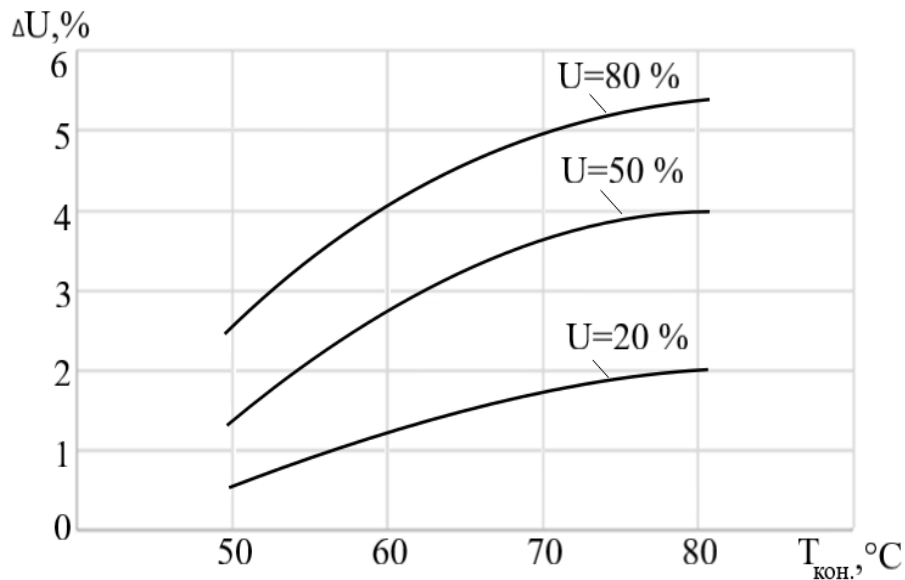


Рис.3.15 – Зависимость величины влагосъема за один полный цикл при сушке сосновых сортиментов ($s = 50 \text{ мм}$) при разном содержании влаги от величины конечной температуры нагрева

На рис. 3.16 представлена зависимость величины влагосъема при сушке в осциллирующем режиме сосновых пиломатериалов толщиной 50 мм , прогретых в центре до $70 ^\circ\text{C}$ при разном начальном содержании влаги в образцах от продолжительности стадии вакуумирования. Из кривых видно, что величина влагосъема зависит от продолжительности вакуумирования: чем больше продолжительность стадии и содержание влаги в материале, тем выше влагосъем. Однако после определенного времени значение величины влагосъема перестает значительно расти, в этой связи было определено, что целесообразнее регулировать данную величину не по времени, а по конечному значению градиента температуры.

Для определения рациональной продолжительности стадии вакуумирования была исследована длительность процесса сушки соснового пиломатериала до конечной влажности $W_k = 12 \%$ в зависимости от величины конечного градиента температуры образца. Проведенное моделирование позволило установить значение перепада температуры по слоям пиломатериала, которое вызывает интенсивное движение влаги из центральных слоев (зона с высокой температурой) к поверхности (зона с

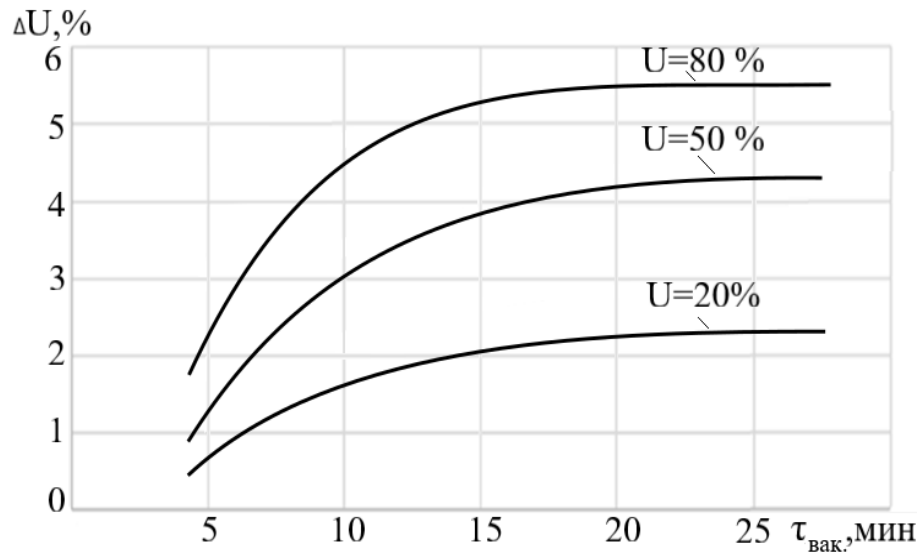


Рис.3.16 – Зависимость величины влагосъема за один полный цикл сушки сосновых сортиментов ($s = 50 \text{ мм}$) при разном содержании влаги от продолжительности стадии вакуумирования

низкой температурой) (рис.3.17). Из характера кривой видно, что конечное значение градиента температуры на стадии «паузы» в интервале $1,3 - 1,4 \text{ } ^\circ\text{C/мм}$ позволяет высушивать пиломатериал при наименьшей продолжительности.

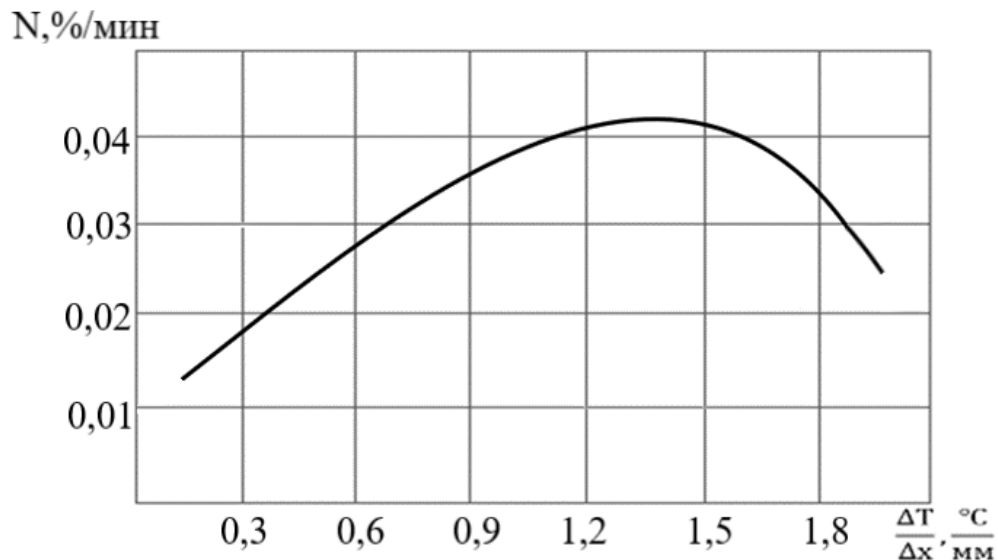


Рисунок 3.17 – Зависимость средней скорости сушки соснового образца от конечной величины градиента температуры по толщине на стадиях вакуумирования

По данным режимным параметрам были получены кривые СВЧ сушки различных пород древесины в режиме осцилляции давления среды (рис.3.18-3.20). Так продолжительность процесса СВЧ сушки сортиментов дуба толщиной 50 мм с начальным влажосодержанием 60 % (рис.3.18) при СВЧ-сушке в осциллирующем режиме составляет не более двух суток. В то же

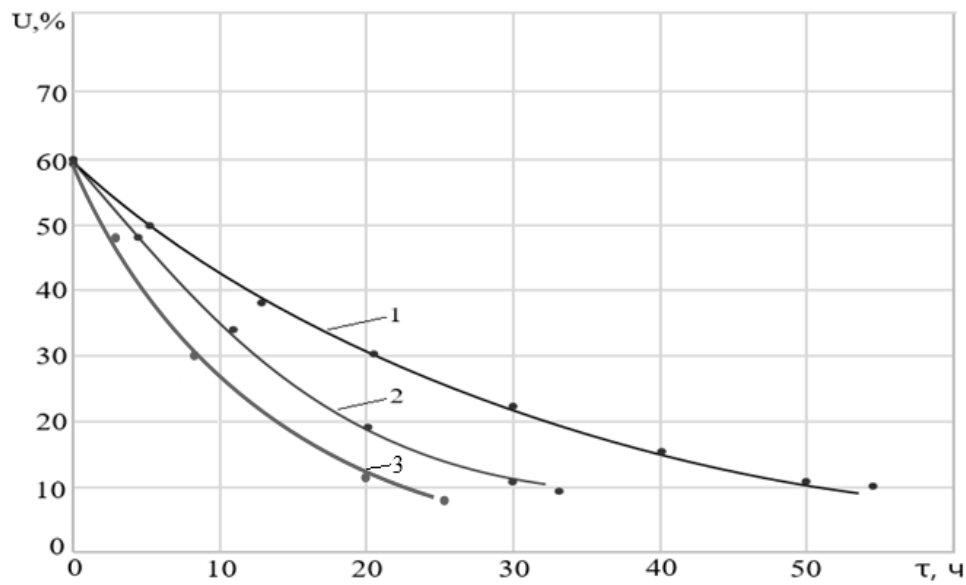


Рисунок 3.18 – Кривая сушки пиломатериалов толщиной 50 мм:

1 – дуб; 2 – береза; 3 – сосна

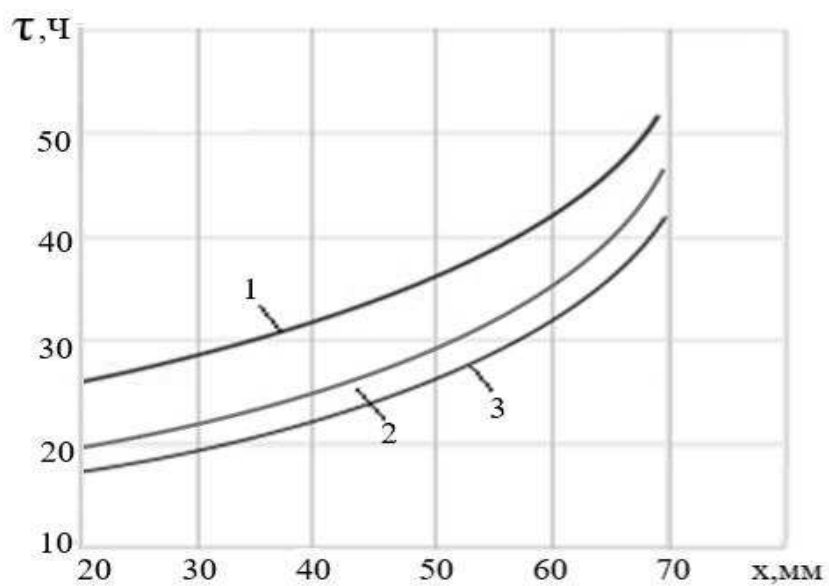


Рисунок 3.19 – Зависимость продолжительности сушки от толщины

пиломатериалов: 1 – дуб; 2 – береза; 3 – сосна

время продолжительность сушки березы при данном режиме практически в 2 раза быстрее, а для сосны примерно в 3 раза быстрее. Из кривых видно (рис.3.18), что повышение толщины высушиваемых образцов увеличивает продолжительность процесса сушки.

В ходе анализа экспериментальных и расчетных данных удаления влаги из образцов сосны, березы и дуба были построены кривые скорости сушки (рис.3.20). Из графиков видно, что для СВЧ-сушки в осциллирующем режиме характерна такая же закономерность, что и для других технологий сушки: для пород древесины с наименьшей плотностью наблюдается более высокая интенсивность процесса.

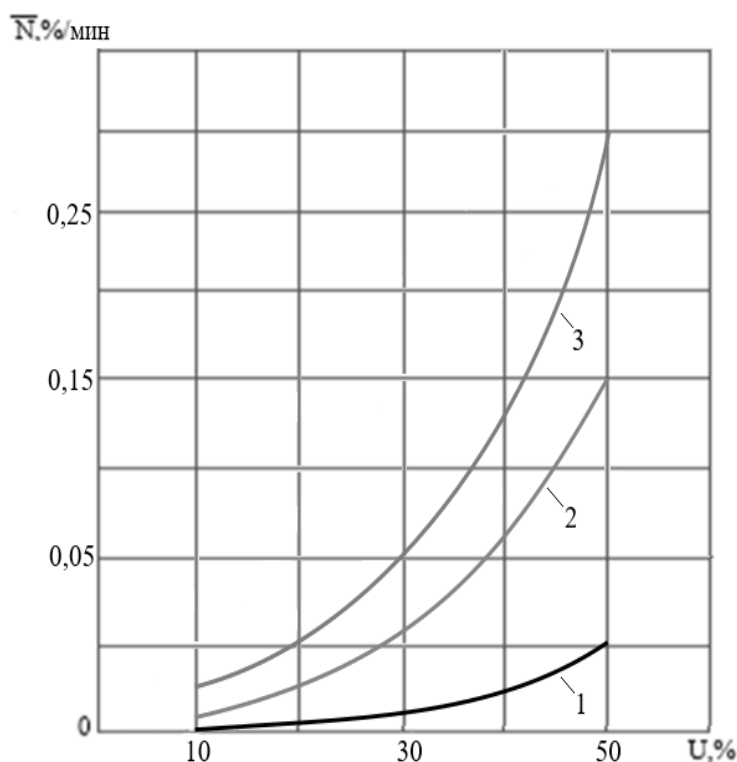


Рисунок 3.20 – Кривые скорости СВЧ сушки пиломатериалов толщиной 50 мм: 1 – дуб; 2 – береза; 3 – сосна

Таким образом, на основе анализа проведенного математического моделирования и экспериментальных исследований была предложена технология СВЧ-сушки, при которой удаление свободной влаги осуществляется при отсутствии воздуха в аппарате на стадии нагрева и,

соответственно, при пониженном давлении в камере сушки. Удаление же связанной влаги происходит в режиме осцилляции, при которой на стадии нагрева устанавливается атмосферное давление среды путем напуска воздуха в аппарат. Проведенные исследования позволили определить пути интенсификации процесса вакуумной СВЧ сушки пиломатериалов и сформулировать рекомендации по режимным параметрам.

ГЛАВА 4. РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРОМЫШЛЕННОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ СВЧ-СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что технология вакуумной сушки с импульсным подводом СВЧ тепловой энергии является перспективным направлением в области сушки древесины благодаря значительному сокращению продолжительности процесса и сохранению качественных показателей материала. Однако ведение процесса нагрева в электромагнитном поле при использовании классической электроэнергии является высоко энергозатратным. Поэтому в работе была поставлена задача по разработке рекомендаций для промышленного использования результатов исследования, в частности, разработки энергосберегающего сушильного комплекса осциллирующей СВЧ-сушки пиломатериалов.

Кроме того, в данной главе представлены рекомендации по рациональным режимам сушки пиломатериалов и технико-экономический анализ эффективности внедрения предложенной технологии.

4.1. Автономная энергосберегающая установка СВЧ-сушки пиломатериалов

В целях повышения энергоэффективности технологического процесса сушки является целесообразным использование альтернативных источников энергии, в частности, отходов деревообработки. Для ведения СВЧ сушки пиломатериалов была разработана схема процесса, реализующая разные режимы сушки, рассмотренные в третьей главе, при которых на стадии нагрева используется СВЧ-энергия, на стадии вакуумирования в работу включается вакуумный насос и/или тепловой насос. При этом энергоснабжение СВЧ генератора, теплового и вакуумного насосов

осуществляется от электрогенератора, работающего на генераторном газе, получаемом из отходов деревообработки, что обеспечивает автономность работы всей установки (рис.4.1).

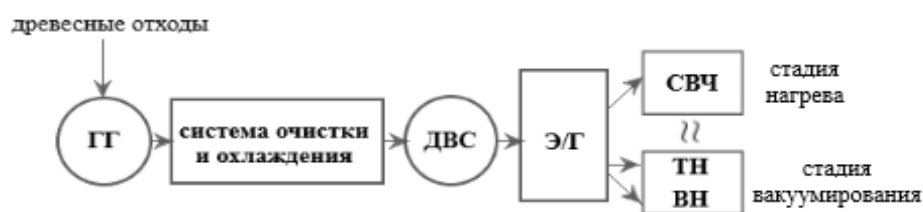


Рисунок 4.1 – Схема установки сушки, работающей на продуктах газификации отходов деревообработки

По предложенной схеме введения процесса сушки сырье в виде древесных отходов со склада поступает в газификатор, в котором происходит процесс термического разложения растительных отходов с получением генераторного газа, который после очистки поступает в двигатель внутреннего сгорания, приводя в движение ротор электрогенератора и, тем самым, вырабатывая электроэнергию для обеспечения попеременной работы СВЧ генератора на стадии нагрева, теплового и вакуумного насоса на стадии вакуумирования. В связи с этим мощность, потребляемая СВЧ генератором, и суммарная потребляемая мощность теплового и вакуумного насосов должны быть приблизительно равны мощности вырабатываемой электрогенератором энергии.

На основе проведенных аналитических исследований и патентного поиска была разработана промышленная установка для реализации осциллирующей сушки пиломатериалов в СВЧ среде [53] (рис.4.2), на основные принципы которой получен патент Российской Федерации на изобретение № 2732325.

Установка включает изолированную сушильную камеру, содержащую модуль СВЧ нагрева, систему вакуумирования и конденсации пара, установленные снаружи сушильной камеры. Рабочая камера имеет прямоугольные стенки из листового проката, укрепленные шестью ребрами

жесткости с сечением 50x100 мм для того, чтобы корпус сушильной камеры смог выдерживать перепад давлений снаружи и внутри установки, а кроме того снизить толщину металлической стенки. Стенки и дверь сушильной камеры должны быть изнутри покрыты углеродной пленкой, хорошо поглощающей СВЧ излучение. При двухстороннем расположении СВЧ магнетронов 1, помещенных в экранирующий кожух, штабель формируется из горизонтальных рядов пиломатериалов 2, укладываемых через шпации 3. Проникновение преобразованного в высоковольтном трансформаторе 4 электромагнитного излучения через высоковольтный конденсатор 5 внутрь корпуса сушильной камеры осуществляется через СВЧ излучающий рупор 6, подсоединенный к латунным СВЧ волноводам, располагаемым внутри установки через технологические отверстия с фторопластовыми заглушками, предотвращающими проникание испарившейся влаги в СВЧ магнетроны 1. Магнетроны снабжены принудительной системой воздушного охлаждения 7, включающей вентилятор 8. Система конденсации и вакуумирования состоит из компрессора 9 теплового насоса, конденсатора 10 с конденсатосборником, вакуумного насоса 11 и вентилятора 12 для подсушки влажных растительных и древесных отходов в сушильном бункере 17, электроснабжение которых осуществляется электрогенератором 16. Электрогенератор 16 соединен с двигателем внутреннего сгорания 20 снаружи сушильной камеры. Установка снабжена газификатором 18, который содержит систему очистки и охлаждения 19, включающую в себя циклон и фильтр тонкой очистки. Такая установка позволяет обеспечить автономность и сократить затраты на электроэнергию за счет выработки собственной электроэнергии из древесных и растительных отходов.

Принцип работы установки, используемой для сушки пиломатериалов, заключается в следующем. Измельченные влажные растительные и древесные отходы из бункера хранения поступают в сушильный бункер 17, куда вентилятором 12 нагнетается горячий воздух для предварительной подсушки

с помощью тепловой энергии, отведенной тепловым насосом от испаренной в камере сушки влаги. Далее подсушенные древесные отходы подаются питателем из бункера 17 в газификатор 18, в котором происходит термохимическая конверсия отходов древесного сырья с последующим получением генераторного газа. Полученный генераторный газ после очистки от пылевидных частиц и остаточных смол в системе очистки 19, состоящей из циклона и фильтра тонкой очистки, и охлаждения с помощью теплообменников и конденсатора, поступает в двигатель внутреннего сгорания 20, приводя в движение ротор электрогенератора 16 для выработки электроэнергии. Полученная электроэнергия обеспечивает работу компрессора 9 теплового насоса, вакуумного насоса 11, вентилятора 12 на стадии вакуумирования и СВЧ генератора с магнетронами 1, вентилятором 8 и высоковольтным трансформатором на стадии нагрева.

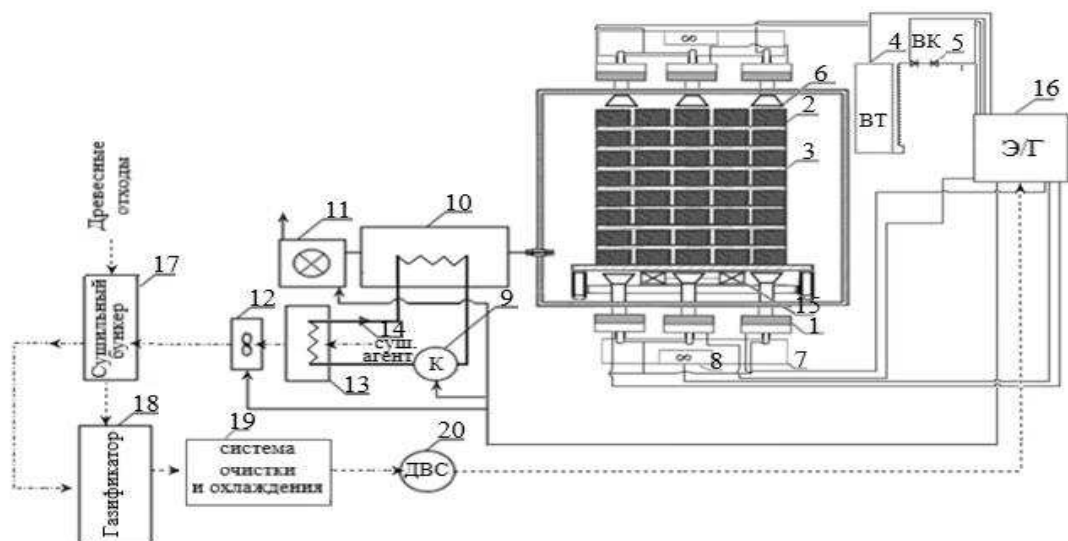


Рисунок 4.2 – Пилотная установка для сушки пиломатериалов в СВЧ среде:

1 – СВЧ магнетроны; 2 – ряд пиломатериалов; 3 – шпации; 4 – высоковольтный трансформатор; 5 – высоковольтный конденсатор; 6 – излучающий рупор; 7 – система воздушного охлаждения; 8 – вентилятор; 9 – компрессор теплового насоса; 10 – конденсатор; 11 – вакуумный насос; 12 – вентилятор; 13 – калорифер; 14 – дроссель; 15 – тензометрический датчик; 16 – электрогенератор; 17 – сушильный бункер; 18 – газификатор; 19 – система очистки и охлаждения газа; 20 – двигатель внутреннего сгорания

Проведенные в предыдущей главе исследования позволили определить, что процесс осциллирующей СВЧ сушки пиломатериалов на стадии нагрева целесообразно проводить при двух режимах: 1) с предварительным удалением газа из аппарата; 2) при атмосферном давлении среды в камере.

Процесс сушки штабеля пиломатериалов с высокой влажностью начинают по первому режиму, который состоит из последовательно чередующихся стадий нагрева материала при пониженном давлении и вакуумирования. Для этого после загрузки штабеля пиломатериалов 2 в сушилку и герметизации в работу включают вакуумный насос для удаления воздуха из аппарата, далее вакуум-насос отключают и в работу включают СВЧ-магнетроны. Продолжительность стадии начального нагрева определяется достижением температуры в центре высушиваемого материала 2 заданного значения.

Вслед за этим ведут стадию вакуумирования. Для этого выключают СВЧ-магнетроны и в работу включают компрессор 9 теплового насоса для постепенного понижения давления в аппарате путем конденсации испаренной влаги. Сушка древесины происходит за счет предварительно вакуумированной тепловой энергии с последующей выдержкой при постоянном пониженном давлении. Отводимая из сушилки тепловая энергия испаренной влаги передается тепловым насосом 9 из конденсатора 10 в калорифер 13 для нагрева агента сушки, подаваемого в сушильный бункер 17 вентилятором 12.

Выдержка под вакуумом осуществляется до снижения температуры в центре высушиваемого материала 2 до заданного значения, при котором градиент температуры не будет оказывать существенного влияния на процесс дальнейшего удаления влаги до конечного градиента $1,3 - 1,4$ °C/мм. На стадии вакуумирования происходит увеличение влажности воздушной среды в сушильной камере и выравнивание влажности по сечению пиломатериала, что способствует снятию возникших напряжений.

После окончания стадии вакуумирования снова начинается стадия СВЧ нагрева материала – цикл «нагрев-вакуум» повторяется в таком режиме до снижения средней влажности материала до 30 %.

После достижения материалом средней влажности 30 % молярный перенос влаги в материале прекращается, в связи с чем целесообразным становится переход на второй режим. Для этого после стадии вакуумирования осуществляется напуск воздуха в аппарат. Стадия нагрева начинается отключением теплового и вакуумного насосов и включением в работу СВЧ-магнетронов. Стадия нагрева считается завершенной при достижении в центре пиломатериала заданной температуры. После этого в работу включается вакуумный насос и компрессор 9 теплового насоса и начинается стадия вакуумирования. Данная стадия считается завершенной при достижении заданного значения температуры в центре материала. После завершения данной стадии цикл «нагрев-вакуумирование» повторяется до тех пор, пока влагосодержание пиломатериалов не достигнет заданного конечного значения (8 – 10 %).

В результате анализа предложенных выше режимов осциллирующей СВЧ сушки пиломатериалов было выявлено, что процесс целесообразнее проводить, комбинируя эти два режима. Но применительно к мягким листовым породам древесины, а также к сортаментам, не требующим высокого качества сушки, с целью сокращения продолжительности процесса является допустимым применение первого режима на протяжении всего сушильного процесса.

После определения рациональных режимов осциллирующей сушки с воздействием СВЧ полей на штабель пиломатериалов для разработки конструкции сушильных камер необходимо, в первую очередь, создать инженерную методику расчета основных конструктивных и энергетических параметров агрегатов, используемых в промышленной установке.

4.2. Методика расчета вакуумной СВЧ камеры, реализующей осциллирующий режим конденсационной сушки

4.2.1. Определение основных конструктивных параметров сушильной камеры

Коробчатые обечайки при работе аппарата под вакуумом изготавливают из листового проката с помощью соединения прямоугольных стенок сваркой.

Проектирование сушильной камеры начинается с определения требуемых габаритных параметров обечайки, основанных на заданном разовом объеме загрузки и длине высушиваемого пиломатериала.

Для объема пиломатериалов имеем:

$$V_{шт} = \frac{V_m}{\beta'}, \quad (4.1)$$

где β' – объемный коэффициент заполнения штабеля, определяемый в зависимости от толщин прокладок и высушиваемого пиломатериала.

Зная длину высушиваемых пиломатериалов, находим поперечное сечение штабеля:

$$S_{шт} = \frac{V_{шт}}{L}. \quad (4.2)$$

Для наиболее равномерного СВЧ-облучения пиломатериалов формирование штабеля в поперечном сечении осуществляется в форме квадрата, отсюда [56]:

$$B = \sqrt{S_{шт}}. \quad (4.3)$$

При конструировании коробчатых обечаек плоские прямоугольные стенки целесообразно укреплять ребрами, что позволяет снизить их толщину и сделать эти стенки значительно более жесткими, что особенно важно для аппаратов, работающих под избыточным давлением или вакуумом.

Расчетная толщина прямоугольной плоской стенки коробчатых обечаек с ребрами жесткости, работающих под давлением, определяется по

формуле:

$$s' = Kb \sqrt{\frac{P}{\sigma_{\text{уд}}}}, \quad (4.4)$$

где b – меньшая сторона прямоугольной плоской стенки с ребрами жесткости, м; $K = f\left(\frac{l}{b}\right)$ – коэффициент, зависящий от способа закрепления стенки; l – большая сторона прямоугольной стенки, м; $\sigma_{\text{уд}}$ – окончательное допускаемое напряжение, МН/м².

Расчет сопротивления укрепляющих поперечных ребер, считая закрепление ребер на опорах жесткими, определяем по формуле:

$$W'_p = \frac{B^2 l P}{4K \sigma_{\text{уд}}}. \quad (4.5)$$

Номинальная расчетная толщина поперечных ребер определяется как:

$$s'_p = 0,62 \sqrt[3]{W'_p}. \quad (4.6)$$

Номинальная расчетная площадь поперечного сечения поперечных ребер находится по формуле:

$$F'_p = 5(s'_p)^2. \quad (4.7)$$

Конструктивными элементами сушильной установки являются днище корпуса и крышка аппарата, которые изготавливаются из того же материала. Для аппаратов, работающих под избыточным давлением, конструкция плоских прямоугольных днищ должна иметь профиль типа плоских круглых днищ с отбортовкой.

Номинальная расчетная толщина плоской стенки днища, считая $b=d$, определяется по формуле:

$$s'' = \frac{Kd}{K_0} \sqrt{\frac{P}{\sigma_{\text{уд}}}}, \quad (4.8)$$

где K_0 – коэффициент, учитывающий ослабление днища отверстиями.

Для того, чтобы корпус сушильной камеры смог выдерживать перепад давления, целесообразным представляется его усиление шестью ребрами жесткости. По результатам расчетов сечение поперечных ребер принимаем 50x100 мм. Основные параметры проведенного расчета представлены в Приложении Б2.

4.2.2. Тепловой и аэродинамический расчет сушильной камеры

Для определения основных энергетических показателей различных агрегатов сушильного комплекса была разработана методика теплового и аэродинамического расчета.

Имея объем пиломатериалов при разовой загрузке камеры, находим массу сухой древесины:

$$m_m = V_m \cdot \rho_m. \quad (4.9)$$

Массу влажной древесины можно вычислить из выражения влагосодержания древесины как:

$$m_{вл.м} = U \cdot m_m + m_m. \quad (4.10)$$

Основным параметром в инженерной методике расчета узлов предложенной конструктивной схемы сушильной установки является поток влаги, испаряющейся из материала, определяемый из уравнения (2.18).

Площадь поверхности материала определяется уравнением:

$$F_{пов.м} = \frac{V_{др.}}{S_{пил.}} \cdot 2. \quad (4.11)$$

Расход влаги, испаряющейся из древесины в секунду, находится как:

$$P_{исп.вл.} = F_{пов.м.} \cdot j_{м.пов.} \quad (4.12)$$

При этом тепловой напор конденсатора:

$$Q_{тепл.} = P_{исп.вл.} \cdot r. \quad (4.13)$$

Зная, что на передачу 1 кВт тепловой энергии тепловым насосом затрачивается в 3÷5 раз меньше электроэнергии, то требуемая мощность теплового насоса равна:

$$N_k = \frac{Q_{\text{тепл.}}}{3 \div 5} \cdot \eta_k. \quad (4.14)$$

Тепловая нагрузка аппарата определяется по уравнению теплового баланса [35,57]. При этом полная тепловая нагрузка на конденсатор складывается из процесса охлаждения образовавшегося в камере пара, конденсации при температуре насыщения и охлаждении конденсата до некоторой конечной температуры T_k .

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3; \quad (4.15)$$

$$Q_1 = \Pi_{\text{п}} \cdot c \left[T_{\text{пер}} - T_{\text{нас}}(P(\tau)) \right]; \quad (4.16)$$

$$Q_2 = r \cdot \Pi_{\text{п}}; \quad (4.17)$$

$$Q_3 = \Pi_{\text{п}} \cdot c_{\text{ж}} \left[T_{\text{нас}}(P(\tau)) - T_k \right]. \quad (4.18)$$

Это тепло передается хладагенту:

$$Q = K \cdot \Delta t_{\text{ср.кон}} \cdot S_{\text{кон}}, \quad (4.19)$$

где K – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·С°; $\Delta t_{\text{ср.кон}}$ – средняя разность температур конденсатора, С°; $S_{\text{кон}}$ – поверхность теплообмена конденсатора, м².

Изменяющаяся во времени тепловая нагрузка приводит к сложности расчета параметров конденсатора, что следует из выражений (4.15) – (4.17), поэтому необходимая поверхность теплообмена конденсатора рассчитывается для начальных параметров процесса при максимальной тепловой нагрузке [31,81]. Таким образом, необходимая поверхность теплообмена конденсатора определяется как:

$$S_{\text{кон}} = \frac{\Pi_{\text{п}} \left[c \cdot \left(T_{\text{пер}} - \frac{B}{A - \ln P_{\text{н}}} \right) + r + c_{\text{ж}} \cdot \Delta T_k \right]}{K \cdot \Delta t_{\text{ср.кон}}}, \quad (4.20)$$

где $\frac{B}{A - \ln P_{\text{н}}} = T_{\text{нас}}$ – температура насыщения для давления пара в начале стадии вакуумирования; $\left[T_{\text{нас}}(P(\tau)) - T_k \right] = \Delta T_k$ – температура переохлаждения конденсата. Начальное давление на стадии вакуумирования определяется в результате математического моделирования.

Задавая время τ_0 , в течение которого давление газа необходимо

понизить с барометрического $P_{\text{атм}}$ до рабочего остаточного значения $P_{\text{ост}}$, определяем производительность вакуумного насоса из уравнения (2.37).

Мощность вакуумного насоса можно определить из выражения:

$$N_{\text{вн}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot V_{\text{сг}}}{\eta_{\text{вн}}}. \quad (4.21)$$

Производительность вентилятора, обеспечивающего сушку отходов с необходимой производительностью бункера можно определить из выражения:

$$P_{\text{вен}} = \left(\frac{Q}{c_{\text{возд.}} \cdot \Delta T} \cdot \frac{1}{\rho_{\text{возд.}}} \right). \quad (4.22)$$

Скорость подаваемого вентилятором в сушильный бункер с древесными отходами воздуха определяется как:

$$v = \frac{P_{\text{вен.}}}{R_{\text{кам.}}}. \quad (4.23)$$

Тогда мощность вентилятора определяем из выражения:

$$N_{\text{вен}} = \xi \frac{\rho_{\text{возд.}} \cdot v^2}{2} \cdot P_{\text{вен}} \cdot \eta_{\text{вен}}. \quad (4.24)$$

Удельный расход топлива на выработку 1 кВт · ч энергии определяется из выражения:

$$B_{\text{уд}} = \frac{B_{\text{об.}}}{Q_{\text{от.}}} = \frac{3600}{\eta_{\text{з}} \cdot Q_{\text{сг.}}}. \quad (4.25)$$

Необходимая мощность СВЧ-генератора определяется как:

$$N_{\text{СВЧ ген.}} = \frac{c_{\text{др.}} \cdot m_{\text{др.}} \cdot \Delta T}{\tau_{\text{стад.нагр.}}} \cdot \eta_{\text{СВЧ}}, \quad (4.26)$$

где ΔT – определяется режимными параметрами стадии нагрева древесины.

Отсюда мощность электрогенератора, необходимая для обеспечения работы вентилятора, теплового и вакуумного насосов, определяется как:

$$N_{\text{э/Г}} \approx N_{\text{к}} + N_{\text{вн}} + N_{\text{вен}} \approx N_{\text{СВЧ-ген.}}. \quad (4.27)$$

В целях повышения точности инженерного расчета параметров разработанного сушильного комплекса были использованы следующие данные (прил.Б2).

4.2.3. Расчет системы газификации

Корпус газификатора (рис.4.3) выполнен из стали марки 12Х18Н10Т, так как процесс протекает при высоких температурах до 440 С°.

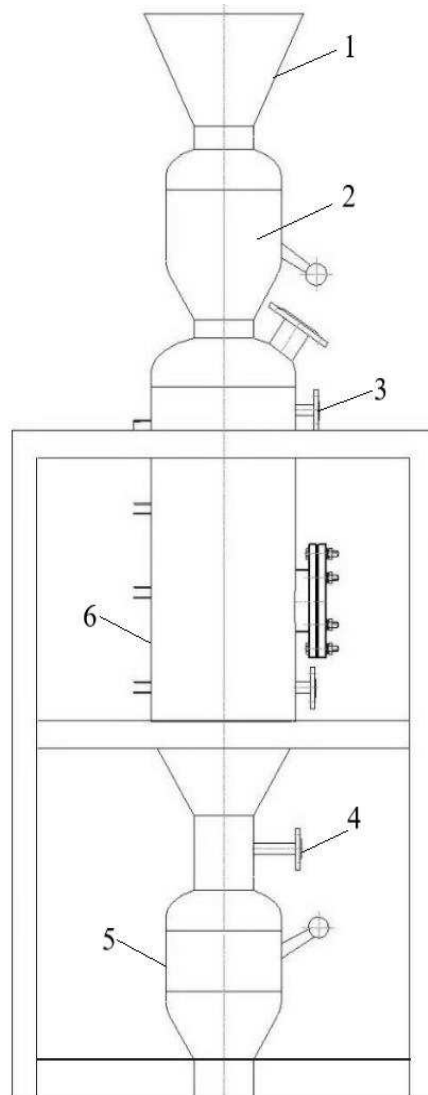


Рисунок 4.3 – Схема газогенератора для расчета конструктивных параметров:
1 – узел загрузки сырья; 2 – бункер для подсушки сырья; 3 – патрубок выхода газа; 4 – патрубок подачи воздуха; 5 – зольник с колосниковой решеткой; 6 – зона газификации

Расчет диаметра патрубков происходит по формуле и выбирается стандартное значение по ГОСТ 10704-91:

$$d = \sqrt{\frac{4S}{V \cdot \pi}}. \quad (4.28)$$

Толщина стенок обечайки рассчитывается по формуле:

$$S_p = \frac{p \cdot D_n}{2 \cdot \sigma_{дон} - p}. \quad (4.29)$$

Конструктивным элементом газогенератора является днище, его размеры определяются из ГОСТ 6533-78 Днища эллиптические стальные. Фланцы плоские приварные выбираются по ГОСТ 12820-80. Шпонки круглые по ГОСТ 14739-69. Ушки по ГОСТ 4739-68. Заглушки фланцевые по ГОСТ 22815-83. Прокладки плоские эластичные по ГОСТ 15180-60. Болты с шестигранной головкой класса точности А по ГОСТ 7805-70. Болты с шестигранной головкой класса точности С по ГОСТ 15589-70. Гайки шестигранные низкие класса точности А по ГОСТ 5929-70. Гайки шестигранные низкие класса точности В ГОСТ 5916-70. Гайки шестигранные низкие с уменьшенным размером «под ключ» класса точности В по ГОСТ 5916-70. Шайбы пружинные по ГОСТ 6402-70.

Схема получения генераторного газа из отходов деревообработки представлена на рис. 4.4.

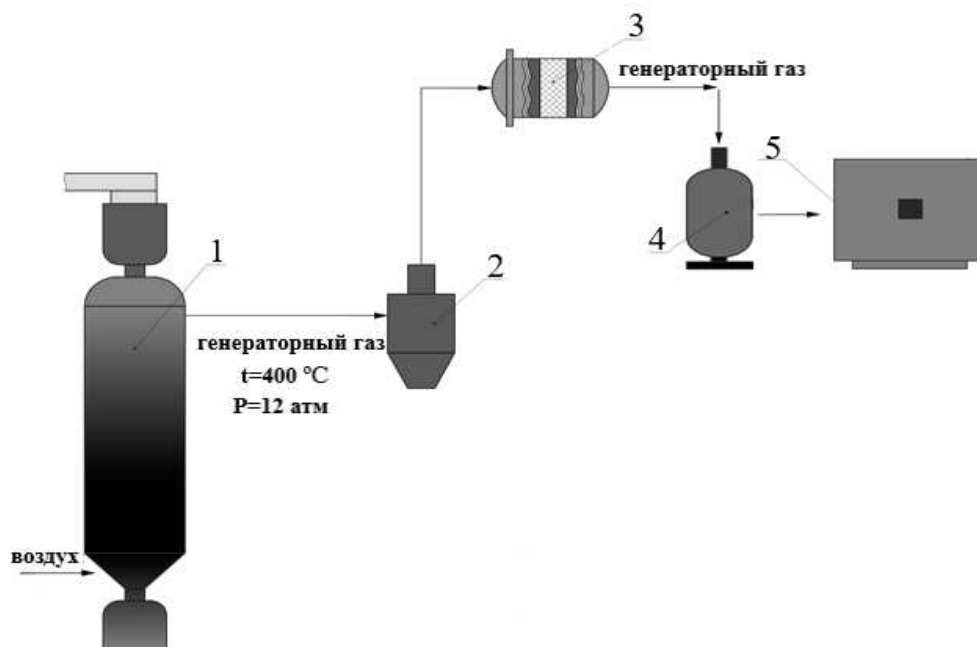


Рисунок 4.4 – Схема получения генераторного газа из отходов деревообработки: 1 – газогенератор; 2 – циклон; 3 – фильтр тонкой очистки; 4 – двигатель внутреннего сгорания; 5 – электрогенератор

По данной схеме подача древесных отходов осуществляется сверху газогенератора 1, где происходит термохимическая конверсия отходов с последующим получением генераторного газа. Далее генераторный газ отводится из верхней части газогенератора 1 над слоем топлива в циклон 2, а шлак удаляется с колосниковой решетки в нижней части газогенератора 1. После прохождения циклона газ нагнетается для очистки от частиц золы в фильтр тонкой очистки 3. После чего очищенный генераторный газ поступает в двигатель внутреннего сгорания 4 для активации движения ротора электрогенератора 5.

Получаемый генераторный газ из древесных и растительных отходов обладает лучшими антидетонационными свойствами, что ведет к увеличению ресурса работы двигателя внутреннего сгорания [58].

4.3. Рекомендации по режимным параметрам осциллирующей сушки пиломатериалов в вакуумной СВЧ установке

Для управления процессом вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов разработан технологический регламент в зависимости от толщины и влажности материала, представленный в таблице 4.1. Согласно результатам математического и физического моделирования, проведенным в предыдущей главе, наиболее целесообразным является проведение процесса сушки путем комбинирования двух, предложенных в работе, импульсных режимов с попеременным включением системы вакуумирования, СВЧ генератора и системы кондиционирования для получения пиломатериалов по II категории качества с конечным влагосодержанием 6 – 8 %.

Продолжительность процесса сушки сортиментов сосны толщиной 50 мм в вакуумной СВЧ среде при осциллирующем режиме составляет 13 часов и включает 26 циклов чередования стадий «нагрева» и «вакуумирования». При высоком содержании влаги в сортименте процесс начинается с предварительного удаления газа из аппарата без напуска воздуха по первому режиму осциллирующей СВЧ сушки. Один цикл состоит из

следующих стадий:

- нагрев при пониженном давлении в аппарате, составляющем 10 кПа, до достижения температуры центральной зоны сортамента 70 С° в течение 4 – 6 мин при включенных трех СВЧ-магнетронах, расположенных снизу сушильного аппарата;
- охлаждение сортамента до температуры в центральной зоне 40 С° с понижением давления в аппарате до 2,5 кПа с последующей выдержкой в течении 11 – 15 мин.

После проведения 15 циклов при достижении сортаментом влажности 30 % происходит напуск воздуха в аппарат и переход ко второму режиму осциллирующей СВЧ сушки с продолжительностью 11 циклов. Один цикл состоит из следующих стадий:

- нагрев при атмосферном давлении в аппарате, составляющем 100 кПа, до достижения температуры центральной зоны сортамента 70 С° в течение 10 – 15 мин при включенных СВЧ-магнетронах, расположенных сверху сушильного аппарата;
- вакуумирование с охлаждением сортамента до температуры центральной зоны 50 С° с понижением давления в аппарате от атмосферного до 10 кПа с последующей выдержкой в течении 15 – 26 мин.

Таблица 4.1. – Режимы вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов сосны (s = 50 мм) при осциллирующем подводе тепловой энергии

Влажность пиломатериалов, %	Параметры процесса (t, С°; Р, кПа; Р _{уд} , кВт; τ, мин)											
	Режим осциллирующей сушки											
	с предварительным удалением газа из аппарата						с поддержанием атмосферного давления среды в аппарате					
	нагрев			вакуум			нагрев			вакуум		
	Р _{кам} , кПа	t _ц , С°	τ, мин	Р _{ост} , кПа	t _ц , С°	τ, мин	Р _{кам} , кПа	t _ц , С°	τ, мин	Р _{ост} , кПа	t _ц , С°	τ, мин
<60	30	70	4 – 6	2,5	40	11 – 15	-	-	-	-	-	-
<30	-	-	-	-	-	-	100	70	10 – 15	10	50	15 – 26

С целью подтверждения энергетической эффективности использования в качестве топлива древесного сырья для выработки электроэнергии были проведены исследования процесса СВЧ сушки пиломатериалов в режиме осцилляции давления среды, позволяющие определить исходные данные для инженерного метода расчета вентилятора, теплового и вакуумного насосов для предложенной конструкции промышленной установки.

По предложенной в данной главе инженерной методике расчета была создана номограмма (рис.4.5), по которой можно определить требуемую мощность электрогенератора от объема загрузки сушильной камеры, вырабатываемой мощности электрогенератора и толщины высушиваемых пиломатериалов.

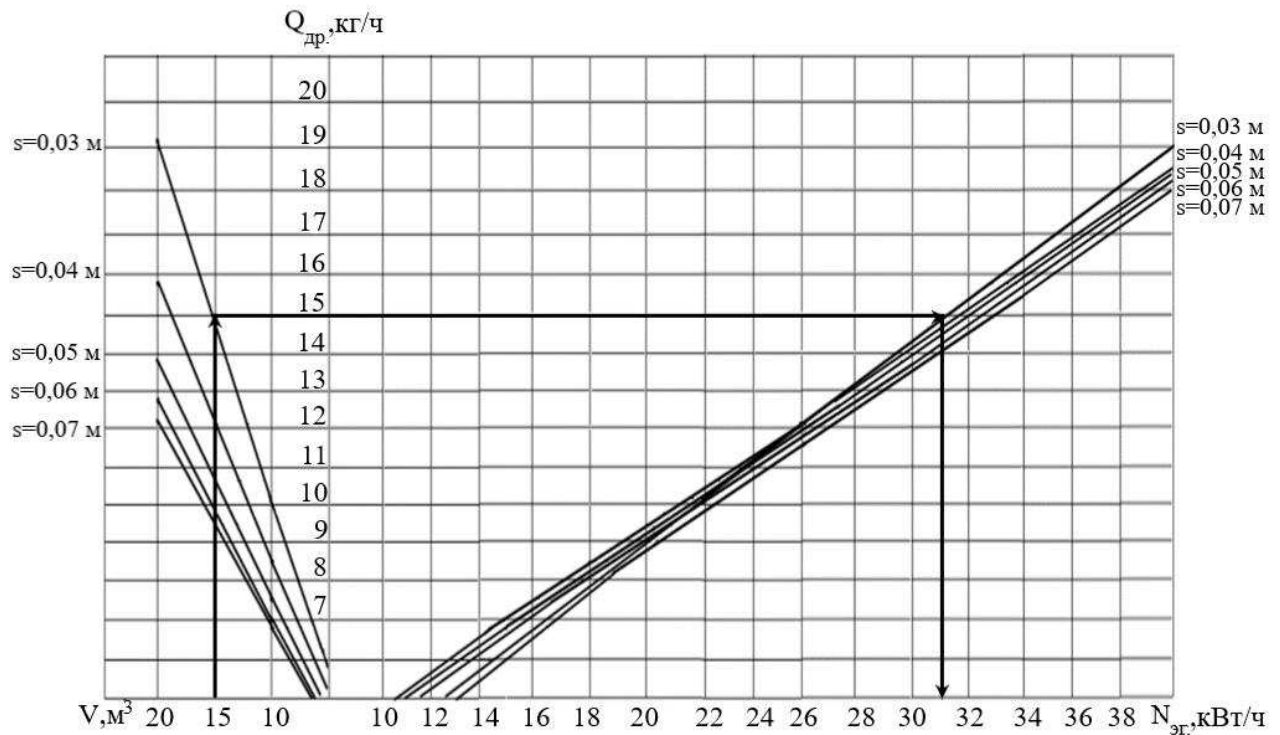


Рисунок 4.5 – Номограмма расчета мощности электрогенератора в зависимости от объема загрузки сушильной камеры и толщины высушиваемых пиломатериалов

Кроме того, в ходе проведенных расчетов был установлен необходимый для поддержания процесса сушки в течении двух часов объем сушильного бункера с древесными отходами в зависимости от объема загрузки сушильной камеры (рис.4.6). Из рисунков видно, что с увеличением

толщины высушиваемых пиломатериалов наблюдается снижение расхода древесного топлива и требуемой установленной мощности электрогенератора, что свидетельствует об энергоэффективности разработанного сушильного комплекса применительно к пиломатериалам большого сечения.

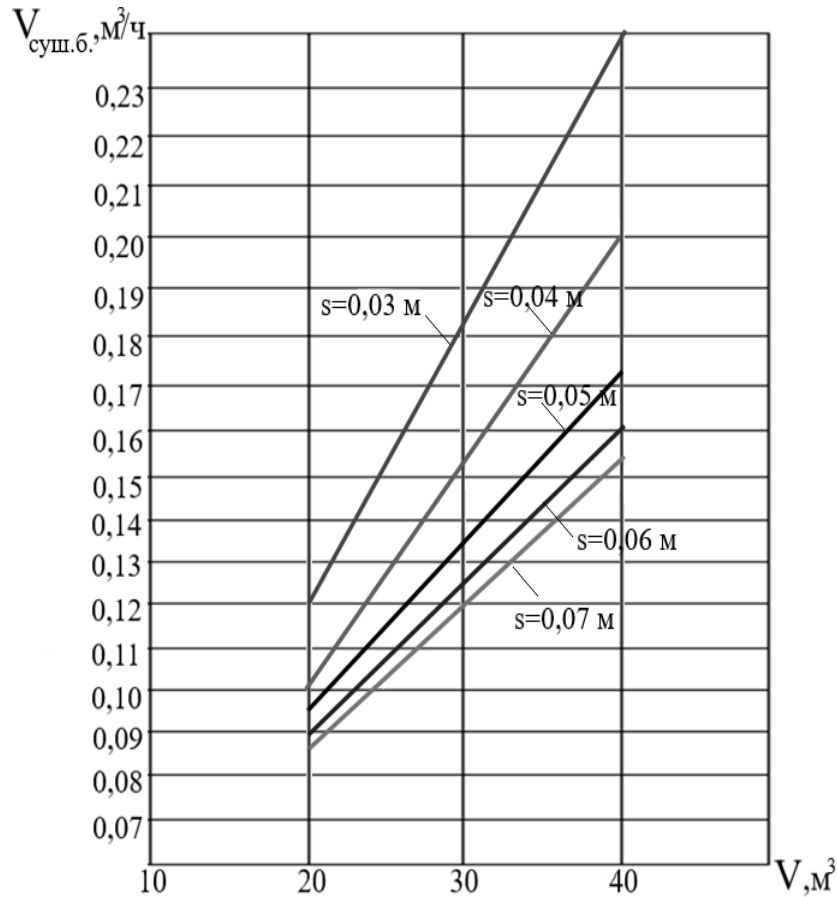


Рисунок 4.6 – Зависимость объема сушильного бункера с древесными отходами от объема загрузки сушильной камеры и толщины пиломатериалов

4.4. Техничко-экономический анализ эффективности внедрения вакуумной СВЧ-камеры для сушки древесины

Для выявления экономической целесообразности предлагаемой технологии вакуумной СВЧ сушки пиломатериалов был проведен сравнительный анализ исследуемого способа в сравнении с наиболее распространенной конвективной технологией сушки. Экономическая эффективность была выражена в экономии удельных энергетических затрат на сушку пиломатериалов толщиной 50 мм.

Анализ и оценка эффективности рассматриваемых технологий выполнены применительно к пиломатериалу сосны. При этом объем разовой загрузки конвективной и СВЧ сушильных камер составляет 15 м³. Продолжительность процесса конвективной сушки составляет 130 ч, продолжительность вакуумной СВЧ сушки – 25 ч.

Энергетические затраты классического конвективного способа сушки складываются из:

- тепловых затрат на нагрев древесины, камеры, потерь в окружающую среду и испарения влаги из древесины;
- затрат электроэнергии на использование дополнительного оборудования в виде вентилятора и циркуляционного насоса.

В конвективной камере для нагрева паровоздушной смеси применяется калорифер с водяным теплоносителем, нагреваемым путем сжигания топливных гранул. При этом скорость движения воды составляет 0,2 м/с, а воздуха 2,5 м/с.

Общая сумма энергетических затрат на один цикл процесса конвективной сушки пиломатериалов определяется как сумма затрат на тепловую и электрическую энергии, необходимые для сушки древесины, и составляет порядка 3803 руб./м³.

Энергетические затраты СВЧ вакуумного способа сушки состоят только из затрат электроэнергии, необходимых для:

- нагрева высушиваемого пиломатериала посредством подачи электромагнитной энергии от СВЧ генератора к материалу на стадии «нагрева»;
- охлаждения пиломатериала посредством работы теплового и вакуумного насосов и конденсатора на стадии «вакуумирования»;
- подсушки древесных отходов в сушильном бункере посредством вентилятора для получения генераторного газа путем сжигания топливных гранул.

При этом работа электрогенератора осуществляется за счет

газификации топливных гранул и преобразования энергии сжигания генераторного газа в электроэнергию. Таким образом, работа СВЧ генератора, теплового и вакуумного насосов, конденсатора и вентилятора осуществляется в попеременном режиме от электрогенератора, работающего на альтернативном топливе. Отсюда, для вакуум-осциллирующей СВЧ-сушки сосновых пиломатериалов продолжительностью 25 часов, удельные энергозатраты составляют 2660 руб./м³.

Сравнительные технико-экономические показатели камер для сушки сосновых пиломатериалов усреднены и представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. – Сравнительные технико-экономические показатели сушильных камер

№ п/п	Показатель	Размерность	Конвективная камера	Вакуумная СВЧ камера
1	Объем загрузки камеры	м ³	15	15
2	Продолжительность сушки	ч	130	25
3	Число циклов сушки в год	шт	61	321
4	Годовая производительность по сухому материалу	м ³ /год	915	4815
5	Потребление древесных гранул за один цикл работы сушилки	кг	424,4	180,4
6	Потребление тепловой энергии за один цикл работы сушилки	кДж/кг	450	150
7	Стоимость топливных гранул для реализации процесса сушки	руб.	30583,14	13000
8	Затраты на тепловую энергию за один цикл работы сушилки	руб.	21990,70	-
9	Затраты на электроэнергию за один цикл работы сушилки	руб.	4472	26907,25
10	Общие энергозатраты за один цикл работы сушилки	руб.	57045,14	39907,25
11	Суммарные энергозатраты на сушку	руб./год	3479745	12810147
11	Удельные энергозатраты на сушку	руб./ м ³	3803,00	2660
12	Капитальные вложения	руб.	4000000	9000000
13	Годовая экономия энергозатрат	руб./год	-	5503545
14	Срок окупаемости капитальных вложений	лет	-	1,7

Как видно из представленных данных, по сравнению с 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.

Таким образом, проведенный анализ результатов расчета подтвердил эффективность предлагаемой вакуумной СВЧ установки для сушки пиломатериалов. Полученные результаты приняты к внедрению на предприятии ООО НПП «ТермоДревПром» (Приложение В).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в работе исследования направлены на решение задачи повышения качества и экономической привлекательности СВЧ-сушки пиломатериалов путем разработки технологических режимов, основанных на «импульсных» технологиях.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

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 позволяет определить корректное расположение и количество СВЧ магнетронов в сушильном аппарате, не ограничена конкретной породой древесины и может быть применена для пиломатериалов любых сортов. В ходе реализации разработанной математической модели была доказана удовлетворительная сходимость опытных и расчетных данных, что говорит об адекватности разработанной модели и возможности ее использования для выбора эффективных режимных параметров процесса сушки древесины.

2) Проведены эксперименты и математическое моделирование процесса вакуумной СВЧ сушки сортиментов в режиме осцилляции давления среды. В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что стадию «нагрева» пиломатериалов целесообразно проводить в двух режимах: а) с предварительным удалением воздуха из аппарата – при влагосодержании древесины выше 30 %; б) 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 начальном влагосодержании древесины выше предела насыщения клеточных стенок процесс начинается с удаления воздуха из аппарата включением вакуумного насоса и понижением давления от атмосферного до значения 2,5 кПа без подвода СВЧ энергии. Далее включением СВЧ генератора осуществляется стадия нагрева, завершающаяся при достижении температуры в центре пиломатериала 70 °С. При этом давление в камере растет за счет испаренной влаги. 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, согласно которому каждый последующий цикл начинается с 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 одновременное двухстороннее включение СВЧ магнетронов по разные стороны штабеля приводит к несимметричному распределению полей температуры и влагосодержания внутри пиломатериалов. 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. Для анализа энергоэффективности предложенной технологии было проведено сопоставление исследуемого способа сушки с наиболее распространенной конвективной технологией. Установлено, что при применении предложенной схемы с использованием альтернативного топлива СВЧ-технология сушки является экономически оправданной.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования. Полученные в диссертационной работе результаты математического моделирования и экспериментальных исследований, а также рекомендации по процессам вакуумной СВЧ-сушки пиломатериалов в режиме осцилляции давления среды в аппарате могут быть использованы при технологических расчетах предлагаемого способа сушки на деревообрабатывающих предприятиях. В результате проведенных исследований было установлено, что способ осциллирующей СВЧ-сушки пиломатериалов в вакуумной среде показал себя как эффективный метод обработки древесины, способствующий максимальной интенсификации удаления влаги без возникновения в сорimente критических напряжений и деформаций. Дальнейшие перспективы развития предложенного комбинированного способа СВЧ-сушки видятся в оптимизации работы генераторной установки и эффективном использовании альтернативного топлива, в том числе посредством внедрения автоматизированной системы управления комплексом при сушке разных сортиментов. Кроме того, перспективным направлением исследований является апробация разработанного комплекса применительно к процессу термомодифицирования древесины.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

T, t – температура, $^{\circ}\text{C}$;

P, p – полное и парциальное давление, Па;

m – масса, кг;

V – объем, м^3 ;

ρ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$;

U – влагосодержание материала, %;

μ – молярная масса, $\text{кг}/\text{кмоль}$;

c – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$;

λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Дж}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot ^{\circ}\text{C})$;

r – скрытая теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$;

ξ – критерий парообразования;

R – универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{кмоль} \cdot ^{\circ}\text{C})$;

A, B – коэффициенты в уравнении Антуана;

a_t – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

a_m – коэффициент массопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

δ – относительный термоградиентный коэффициент, $1/^{\circ}\text{C}$;

α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot ^{\circ}\text{C})$;

v – скорость потока воздуха, $\text{м}/\text{с}$;

β – коэффициент массоотдачи, $\text{м}/\text{с}$;

k_p – коэффициент фильтрационного массопереноса, с;

K – коэффициент теплопередачи, $\text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot ^{\circ}\text{C})$;

τ – текущее время, с;

F – площадь поверхности, м^2 ;

j – поток массы, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$;

$S_{\text{пил.}}$ – толщина образца, мм;

φ – относительная влажность среды;

P_0 – пористость древесины;

$V_{\text{св}}$ – объем аппарата незанятый материалом, м^3 ;

Q – объемная производительность, $\text{м}^3/\text{с}$;

$Q_{\text{сг.}}$ – низшая теплота сгорания топлива, $\text{кДж}/\text{м}^3$;

$F_{\text{кон}}$ – поверхность теплообмена конденсатора, м^2 ;

$\Delta t_{\text{кон.}}$ – средняя разность температур конденсатора, $^\circ\text{C}$;

ΔT – разность температур воздуха на входе и выходе из сушильного бункера, $^\circ\text{C}$;

$q_{\text{свч}}$ – мощность СВЧ излучения, $\text{Дж}/(\text{с}\cdot\text{м}^3)$;

ε – диэлектрическая проницаемость, $\Phi/\text{м}$;

$\text{tg}\sigma$ – тангенс угла диэлектрических потерь;

f – частота тока, Гц ;

E – напряженность электрического поля, $\text{В}/\text{м}$;

C_0 – емкость конденсатора, Φ ;

S – площадь обкладки конденсатора, м^2 ;

h – размер образца в направлении действия диэлектрического поля, м ;

σ_f – полная удельная активная проводимость на данной частоте, $\text{См}/\text{м}$;

ω – угловая частота, $\text{рад}/\text{с}$;

R – сопротивление, Ом ;

q_z – заряд, Кл ;

r – расстояние от заряда, создающего поле до точки в котором ищем поле;

U – напряжение, В ;

I – сила тока, А ;

$P_{\text{исп.вл.}}$ – расход испаряющейся из древесины влаги, $\text{кг}/\text{с}$;

$Q_{\text{тепл.}}$ – тепловой напор конденсатора, кВт ;

$\Pi_{\text{вен.}}$ – производительность вентилятора, $\text{Вт}/\text{с}$;

$R_{\text{кам.}}$ – сечение бункера, м^2 ;

$\xi_{\text{сып.мат.}}$ – местное сопротивление сыпучего материала;

η – КПД, %;

N – необходимая мощность, кВт;

СВЧ-ген. – сверхвысокочастотный генератор, кВт.

ИНДЕКСЫ

0 – начальный;

атм – атмосферный;

б – базисная;

вен – вентилятор;

возд – воздух;

вн – вакуумный насос;

г – газ;

д.в. – древесное вещество;

з – заряд;

исп.вл – испаряющаяся влага;

к – компрессор;

кам – камера;

кон – конденсатор;

м – материал;

нас – насыщенный;

ост – остаточный;

п – пар;

пг – парогазовая среда;

пер. – перегрев;

пил – пиломатериал;

пов – поверхность;

равн – равновесное;

св – свободный;

с.г – система удаления газа;

см – смесь;

с.п – система удаления пара;

ср – средний;

суш.б – сушильный бункер;

тн – тепловой насос;

уд – удельный;

ц – центр;

э/г – электрогенератор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, М.В. Оценка энергетической эффективности конвективной и кондуктивной технологий сушки древесины // М.В. Алексеев, А.Н. Казарин, Г.В. Кузнецов / Промышленная энергетика. – 2012. – №7. – 32-34 с.
2. Бердинских, И.П. О диэлектрической проницаемости древесины // И.П. Бердинских, Ю.А. Сикорский, А.Г. Кобликова / Деревообрабатывающая промышленность. – 1955. – №9. – 16-17 с.
3. Бирюков, В.А. Зависимость диэлектрических свойств древесины от ее плотности и частоты переменного тока электрического поля // В.А. Бирюков / Деревообрабатывающая промышленность. – 1964. – №11. – 13-15 с.
4. Брагина, Л.В. Теплофизические свойства древесины // Л.В. Брагина, И.Г. Романенко, В.М. Ройтман / М.: Новое исследование в области изготовления деревянных конструкций. – 1988. – 28-34 с.
5. Богданов, Е.С. Справочник по сушке древесины // Е. С. Богданов, В. А. Козлов, В. Б. Кунтыш, В. И. Мелехов / М.: Лесная промышленность. – 1990. – 304 с.
6. Богданов, Е.С. Расчет, проектирование и реконструкция лесосушильных камер // Е.С. Богданов, В.И. Мелехов, В.Б. Кунтыш, В.В. Новиков, Е.А. Пировских, А.И. Расев / М.: Экология. – 1993. – 352 с.
7. Богданов, Е.С. Расчет, проектирование и реконструкция лесосушильных камер // Е.С. Богданов, В.И. Мелехов, В.Б. Кунтыш, В.В. Новиков, Е.А. Пировских, А.И. Расев / М.: Экология. – 1993. – 352 с.
8. Виноградский, В.Ф. Скоростная вакуумная сушка древесины в поле ТВЧ // В.Ф. Виноградский / Деревообрабатывающая промышленность. – 1960. – №7. – 7-8 с.
9. Воробьев, Е.А. Конструирование и технология производств устройств СВЧ: учебное пособие // Е.А. Воробьев / Л.: Ленинградский институт авиационного приборостроения. – 1983. – 95с.

10. Воронежцев, Ю.И. Электрические и магнитные поля в технологии полимерных композитов // Ю.И. Воронежцев, В.А. Гольдаде, Л.С. Пинчук / Минск: Наука и техника. – 1990. – 263 с.
11. Галкин, В.П. Особенности высокочастотной сушки пиломатериалов // В.П. Галкин, А.А. Горяев, Н.Б. Баланцева, О.А. Калиничева, А.А. Калинина / М.: Лесной вестник. Forestry bulletin. – 2017. – Т.21. – №4. – 73-77 с.
12. Галкин, В.П. Основные физические закономерности процессов распространения электромагнитных волн в древесине // В.П. Галкин / М.: Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2010. – №2. – 212-214 с.
13. Галкин, В.П. Использование микроволновой энергии промышленных частот для сушки пиломатериалов // В.П. Галкин / Вестник МГУЛ. – 2010. – №3. – 234-237 с.
14. Галкин, В.П. Качество пиломатериалов и продолжительность процесса сушки при использовании микроволновой энергии // В.П. Галкин / Сборник трудов 4-го Международного симпозиума «Строение, свойства и качество древесины – 2004». – 2004. – Т.2. – 478-480 с.
15. Галкин, В.П. Особенности комбинированной сушки штабеля пиломатериалов при использовании энергии СВЧ промышленного диапазона // В.П. Галкин / Сборник трудов 3-й Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)». Москва-Тамбов. – 2008. – Т.2. – 171-176 с.
16. Галкин, В.П. Древесиноведческие аспекты технологических режимов и оборудование для микроволновой сушки пиломатериалов: дисс. докт. техн. наук // В.П. Галкин / Мытищи: Изд-во МГУЛ. – 2009. – 316 с.
17. Гареев, Ф.Х. Нетрадиционная сушка древесины: вакуумная и СВЧ. // Ф.Х. Гареев / Лесная промышленность. – 2004. – №5. – 63 с.
18. Гареев Ф.Х. Сушка древесины электромагнитными волнами // Ф.Х. Гареев / М.: Изд-во Лесная промышленность. – 2004. – №9. – 74 с.
19. Глуханов, Н.П. Физические основы высокочастотного нагрева //

Н.П. Глуханов/ М: Изд-во «Машиностроение». – 1965. – 80 с.

20. Горяев, А.А. Вакуумно-диэлектрическая сушка заготовок древесины для мебели // А.А. Горяев, А.В. Новиков, В.Б. Преловский, А.Т. Самородов / Л.: Научно-технический и производственный сборник «Технология судостроения». – 1982. – № 4. – 54-56 с.

21. Горяев, А.А. Электротехнические материалы: учебное пособие // А.А. Горяев, С.В. Петухов, И.А. Патракова / Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет. – 2010. – 87 с.

22. Демитрова, И.П. Физика древесины: учебное пособие // И.П. Демитрова, А.Н. Чемоданов / Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет. – 2016. – 160 с.

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

24. Кантер, К.Р. О тепловых свойствах древесины // К.Р. Кантер / Деревообрабатывающая промышленность. – 1957. – №7. – 17-18с.

25. Качанов, А.Н. Контроль влажности капиллярно-пористых строительных материалов при вакуумной обработке // А.Н. Качанов, Д.А. Коренков / Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – №3. – 154-160 с.

26. Качанов, А.Н. Описание электромагнитного поля в плоском конденсаторе при высокочастотном нагреве длинномерных диэлектриков // А.Н. Качанов, Д.А. Коренков / Красноярск: Вестник КрасГАУ. – 2016. – №10 (121). – 137-143 с.

27. Качанов, А.Н. Выбор способа сушки древесины по критерию себестоимости // А.Н. Качанов, Д.А. Коренков / Сборник трудов 11-ой Международной научно-практической интернет-конференции «Энерго- и ресурсосбережение - XXI век». Орел. – 2013. – 211-213 с.

28. Качанов, А.Н. Моделирование процессов высокочастотной сушки деревянных опор в вакуумной камере // А.Н. Качанов, Д.А. Коренков, А.А. Ревков, В.В. Максимов, О.В. Воркунов / Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т.22. – №6. – 130-142с.

29. Киреев, В.А. Курс физической химии // В.А. Киреев / М.: Химия. – 1975. – 776 с.

30. Кирилов, Н.М. Расчет процесса тепловой обработки древесины при интенсивном теплообмене // Н.М. Кирилов / М.: Гослесбумиздат. – 1959. – 87 с.

31. Коновалов, В.И. Сушка с тепловыми насосами в химической промышленности: возможности и экспериментальная техника // В.И. Коновалов, Е.В. Романова, Н.Ц. Гатапова / Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т.17. – №1. – 153-178 с.

32. Курышов, Г.Н. Импульсная сушка пиломатериалов из древесины клена толщиной 50 мм в конвективных сушильных камерах // Г.Н. Курышов, А.А. Косарин / М.: Лесной вестник. – 2020. – Т.24. – №1. – 69-73 с.

33. Лашинский, А.А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры // А.А. Лашинский, А.Р. Толчинский / Л.: Машиностроение. – 1970. – 752 с.

34. Лыков, А.В. Теория сушки // А.В. Лыков / М.: Энергия. – 1968. – 472 с.

35. Лыков, А.В. Тепломассообмен: справочник // А.В. Лыков / 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергия. – 1978. – 480 с.

36. Мелехов, В.И. Резонансные явления в процессе СВЧ-сушки древесины // В.И. Мелехов, В.А. Шульгин / ИВУЗ. Лесной журнал. – 2015. – №5. – 135-145 с.

37. Мелехов, В.И. Математическая модель системы контроля процесса сушки древесины в поле СВЧ // В.И. Мелехов, В.П. Галкин, В.Г. Санаев, В.А. Шульгин / Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2015. – №1. – 59-65 с.

38. Мингазов, М.Г. Осциллирующие режимы сушки пиломатериалов // М.Г. Мингазов, Н.В. Качалин / М.: Лесной вестник. – 1976. – 49 с.
39. Молчанов, Ю.М. Структурные изменения полимерных материалов в магнитном поле// Ю.М. Молчанов, Э.Р. Кисис, Ю.П. Родин / Механика полимеров. – 1973. – №4. – 737-738 с.
40. Мухаметзянов, Ш.Р. Вакуумно-осциллирующая сушка с использованием теплового насоса // Ш.Р. Мухаметзянов, Р.Р. Сафин / Деревообрабатывающая промышленность. – 2013. – №1. – 26-29 с.
41. Мухаметзянов, Ш.Р. Исследование режимов сушки в вакуум-осциллирующей установке / Ш.Р. Мухаметзянов, Р.Р. Хасаншин / Казань: Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – №6. – 207-210 с.
42. Мухаметзянов, Ш.Р. Выявление закономерностей термодинамики древесины // Ш.Р. Мухаметзянов, П.А. Кайнов, П.М. Мазуркин / Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т.16. – №62. – 61-62 с.
43. Недорезова, Е.В. Совершенствование технологии и оборудования для сушки древесины электромагнитной энергией сверхвысокой частоты дисс. канд. техн. наук // Е.В. Недорезова / Воронеж: Изд-во ВГЛА. – 2002. – 153 с.
44. Нетушил, А.В. Высокочастотный нагрев диэлектриков и полупроводников / А.В. Нетушил, Б.Я. Жуховицкий, В.Н. Кудин, Е.Н. Парини // М.: Гоэнергоиздат. – 1958. – 481 с.
45. Орловский М.А. Оборудование сушильных производств // М.А. Орловский, Т.Н. Кукушкина / М.: Пищевая промышленность. – 1973. – 240 с.
46. Пат. 10153944 Федеративная Республика Германия. IPC H 05 B 6/76, ICS F 27 D 1/18. Микроволновая печь / Linn Horst, Suhm Jurgen; заявитель и патентообладатель Linn High Therm GmbH – 10153944.4-34, заявл. 06.11.2001; опубл. 02.01.2003.

47. Пат. 2189549 Российская Федерация, МПК F26B3/347. Установка для сушки древесины / А.М. Бомбин, Н.В. Скуратович, Е.В. Недорезова; опубл. 20.09.2002.

48. Пат. 2250428 Российская Федерация, МПК F26B3/347. Способ сушки СВЧ-энергией круглых лесоматериалов / Ф.Х. Гареев; заявитель и патентообладатель Гареев Фаузат Хамитович – 2003114951/06, заявл. 21.05.2003; опубл. 20.04.2005. – 11 с.

49. Пат. 2530983 Российская Федерация, МПК F26B3/347, H05B6/78. Способ сушки древесины в СВЧ лесосушильной камере резонансным методом / В.И. Мелехов, В.П. Галкин, В.А. Шульгин; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» – 2013130564/06, заявл. 02.07.2013; опубл. 20.10.2014. – 9 с.

50. Пат. 2522732 Российская Федерация, МПК F26B5/04. Способ сушки пиломатериалов при пониженном давлении среды /А.Н. Чернышев, Р.Р. Сафин, О.Р. Дорняк, Т.В. Ефимова, П.А. Кайнов, А.В. Балахнов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Воронежская государственная лесотехническая академия – 2013110969/06, заявл. 12.03.2013; опубл. 20.07.2014.

51. Пат. 2437043 Российская Федерация, МПК F26B3/04, F26B9/06. Способ и устройство сушки и термической обработки древесины / Е.Ю. Разумов, Р.Г. Сафин, Р.Р. Сафин [и др.]; патентообладатель «НПП «ТермоДревПром» – 2010113181/06; заявл. 05.04.2010; опубл. 20.12.2011. – 7 с.

52. Пат. 2353873 Российская Федерация, МПК F26B9/06, F26B5/04. Установка для сушки древесины / Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, Н.Р. Галяветдинов, Р.Р. Хасаншин, З.Р. Мустафин [и др.]; патентообладатель ООО «НТИЦ РПО» – 2007111612/06; заявл. 10.10.2008; опубл. 27.04.2009 – 6 с.

53. Пат. 2732325 Российская Федерация, МПК F26B9/06, F26B21/04. Конденсационная сушилка / Р.Р. Сафин, Ш.Р. Мухаметзянов, А.Р. Мухтарова,

И.Ф. Хакимзянов, П.А. Кайнов, А.И. Шагеева [и др.]; патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» – 2019135787; заявл. 06.11.2019; опубл. 15.09.2020. – 9 с.

54. Разумов, Е.Ю. Осциллирующая сушка-пропитка крупномерной древесины в жидкостях: монография // Е.Ю. Разумов, Н.Р. Галяветдинов, Р.Р. Сафин / Казань: Изд-во КНИТУ. – 2011. – 92 с.

55. Расев, А.И. Особенности развития техники и технологии сушки пиломатериалов на современном этапе // А.И. Расев / М.: Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 1998. – №4. – 28-34 с.

56. Расев, А.И. Сушка древесины: учебное пособие для вузов // А.И. Расев / М.: МГУЛ. – 2000. – 228 с.

57. Рудобашта, С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой // С.П. Рудобашта / М.: Химия. – 1980. – 248 с.

58. Сафина, А.В. Анализ потенциалов снижения затрат деревообрабатывающих предприятий // А.В. Сафина / Деревообрабатывающая промышленность. – 2013. – №4. – 40-43 с.

59. Сафин, Р.Р. Исследование процессов вакуумной сушки пиломатериалов при конвективных методах подвода тепла // Р.Р. Сафин, Ш.Р. Мухаметзянов / Деревообрабатывающая промышленность. – 2012. – №4. – 20-25 с.

60. Сафин, Р.Р. Вакуумно-кондуктивная сушка капиллярнопористых коллоидных материалов с периодическим подводом тепловой энергии // Р.Р. Сафин, Р.Г. Сафин, Л.Р. Юнусов, Д.А. Ахметова / Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2007. – Т. 50. – Вып.11. – 88-89 с.

61. Сафин, Р.Р. Математическое моделирование конвективной сушки пиломатериалов при давлении ниже атмосферного // Р.Р. Сафин, Р.Р. Хасаншин, Р.Г. Сафин / Сборник трудов 18-й Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». Казань. – 2005. – 188-189 с.

62. Сафин, Р.Р. Вакуумная сушка капиллярнопористых коллоидных

материалов при конвективных способах подвода тепловой энергии: дисс. докт. техн. наук // Р.Р. Сафин / Казань: Изд-во КГТУ. – 2007. – 409 с.

63. Сафин, Р.Р. Методика расчета установки вакуумно-кондуктивной сушки пиломатериалов с использованием теплового насоса // Р.Р. Сафин, Ш.Р. Мухаметзянов, П.А. Кайнов, А.Х. Шаяхметова / Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2015. – Т.19. – №2. – 96-102 с.

64. Саерова, К.В. Исследование процессов сушки древесины в вакуумной СВЧ камере // К.В. Саерова, А.И. Шагеева, Р.Р. Сафин, Ш.Р. Мухаметзянов / Сборник трудов 10-ой Российской студенческой научно-технической конференция «Вакуумная техника и технология». Казань. – 2021. – 135-136 с.

65. Саерова, К.В. СВЧ-вакуумная сушка льняного волокна // К.В. Саерова, А.Р. Мухтарова, Г.Ф. Илалова, А.И. Шамсутдинова, Н.Р. Галяветдинов / Сборник трудов 7-ой Международной научно-практической конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития». Курск. – 2018. – 246-249 с.

66. Саяхов, Ф.Л. Влияние высокочастотного электромагнитного поля на перекрестные эффекты переноса многокомпонентных систем // Ф.Л. Саяхов, Л.А. Ковалева, Н.М. Насыров, А.Д. Галимбеков // Рига: Магнитная гидродинамика. – 1998. – №2. – 148-157 с.

67. Селюгин, Н.С. Сушка древесины // Н.С. Селюгин / М.: Гослесбумиздат. – 1949. – 536 с.

68. Скуратов, В.Н. Метод определения поверхностной влажности древесины // В.Н. Скуратов, И.В. Сапожников, Д.А. Самойленко, И.И. Алексеева / М.: Вестник МГУЛ – Лесной Вестник. – 2016. – Т.20. – №3. – 66-71 с.

69. Торговников, Г.И. Диэлектрические свойства древесины // Г.И. Торговников / М.: Изд-во Лесная промышленность. – 1986. – 128 с.

70. Торговников, Г.И. Диэлектрические свойства древесины основных пород в диапазоне сверхвысоких частот // Г.И. Торговников/ Деревообрабатывающая промышленность. – 1982. – № 5.– 4-6 с.

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

72. Шагеева, А.И. Исследование энергоэффективности установки для сушки и термовлажностной обработки измельченной древесины // А.И. Шагеева, Р.Р. Хасаншин / «Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России». Йошкар-Ола. – 2018. – № 2. – 159-161 с.

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

74. Шагеева, А.И. Разработка экспериментальной установки сушки и термической обработки древесных материалов в вакуумной СВЧ среде // А.И. Шагеева, Ш.Р. Мухаметзянов, П.А. Кайнов / Сборник трудов 9-ой Международной молодежной научной конференции «Будущее науки – 2021». Курск. – 2021. – 331-334 с.

75. Шамсутдинова, А.И. Моделирование процессов сушки пиломатериала в вакуумной СВЧ установке // А.И. Шамсутдинова, П.А. Кайнов / Сборник трудов 6-ой Международной молодежной научная конференции «Будущее науки – 2018». Курск. – 2018. – Т.4. – 313-316 с.

76. Шамсутдинова, А.И. Вакуумная СВЧ сушка древесины: математическая модель переноса влаги // А.И. Шамсутдинова, Г.Ф. Илалова / «Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России». Йошкар-Ола. – 2017. – № 2. – 160-164 с.

77. Шамсутдинова, А.И. Вакуумная СВЧ сушка древесины: формулирование математической модели // А.И. Шамсутдинова, Р.Р. Сафин,

Г.Ф. Илалова, А.Р. Мухтарова /Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2017. – № 50. – 53-56 с.

78. Шеппель, Г.А. О коэффициенте температуропроводности древесины // Г.А. Шеппель, В.Ф. Надеин, Н.Б. Баланцева / ИВУЗ. Лесной журнал. – 2007. – №2. – 133-135 с.

79. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины // Г.С. Шубин / М.: Изд-во Лесная промышленность. – 1990. – 335 с.

80. Шубин Г.С. Обобщенная система уравнений тепломассопереноса для переменных условий среды и ее реализация для древесины на ЭВМ // Г.С. Шубин / М.: Лесной журнал. – 1988. – №3. – 15-21.

81. Шульгин, В.А. Совершенствование конструкции СВЧ-лесосушильной камеры // В.А. Шульгин / Сборник научных статей Международной конференции «Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования». Барнаул. – 2017. – 30-32 с.

82. Шульгин, В.А. Повышение энергетической эффективности процесса сушки древесины в поле СВЧ // В.А. Шульгин / Материалы научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова «Развитие Северо-Арктического региона: проблемы и решения». Архангельск. – 2016. – 268-272 с.

83. Шумский, К.П. Вакуумные аппараты и приборы химического машиностроения // К.П. Шумский / М.: Машиностроение. – 1974. – 576 с.

84. Antti, A.L. Microwave drying of hardwood: Simultaneous measurements of pressure, temperature, and weight reduction // A.L. Antti /Forest Products Journal. – 1992. – Vol.42 (6). – P.49-54.

85. Antti, A.L., Zhao H., Turner I. An investigation of the heating of wood in an industrial microwave applicator : theory and practice // A.L. Antti, H. Zhao, I. Turner /Drying Technology. – 2000. – Vol.18 (8). – P.1665-1676.

86. Ashis, K. Mandal, Ranjan Sen. An overview on microwave processing of material: A special emphasis on glass melting// K. Mandal. Ashis, Sen. Ranjan/

Materials and Manufacturing Processes. – 2017. – Vol. 32. – No. 1. – P.1-20.

87. Bandici, L. The use of microwave field energy in the drying process of wooden sticks// L.Bandici, T. Leuca, S. Coman / 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems IEEE. – 2017. – P. 95-98.

88. Donghua, Jia. Modeling the heat and mass transfer in microwave drying of white oak // Donghua Jia, Muhammad T. Afzal/ Drying thechnology. – 2008. – Vol.26 (9). – P. 1-9.

89. Guanben, D. Microwave drying of wood strands // D. Guanben, W. Siqun, C. Zhiyong/ Drying Technology. – 2005. – Vol.23 (12). – P.2421-2436.

90. Imenokhoyev I., Windsheimer H., Waitz R., Kintsel N., Linn H. Microwave Heating Technology - Potentials and Limits// I. Imenokhoyev, H. Windsheimer, R. Waitz, N. Kintsel, H. Linn / Cfi Ceramic forum international. – 2013. – Vol. 90. – No. 4. – P.41-49.

91. Jianxiong, Zhang. Theoretical investigation of temperature distribution uniformity in wood during microwave drying in three-port feeding circular resonant cavity // Jianxiong Zhang, Yongfend Luo, Chunrong Liao, Feng Xiong, Xi Li, Lili Sun, Xianjun Li / Drying technology. – 2017. – Vol. 35(4). – P. 409-416.

92. Kent, S. Microwave heating of dielectric lossy objects // S. Kent, E.F. Kent / Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. – 2002. – Vol. 37. – No. 2. – P. 63-71.

93. Leiker, M. Accelerated drying of single hardwood boards by combined vacuum-microwave application// M. Leiker, K. Aurich, M. Adamska / 9th International IUFRO Wood Drying Conference. – 2015. – Vol. 8. – P. 185-190.

94. Mukhametzyanov, S.R. Alternative energy in vegetable and crushed wood raw materials drying processes // S.R. Mukhametzyanov, R.R. Safin, G.F. Ilalova, A.R. Mukhtarova, A.I. Shageeva / IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol.507. – P.1-4.

95. Raaholt, B. W. Continuous tubular microwave heating of particulate foods at high temperatures// B. W. Raaholt, L. Hamberg, S. Isaksson / Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. – 2017. – Vol. 51. – No. 4. – P. 259-285.

96. Ramdane Younsi. Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer during high-temperature thermal treatment of wood // Ramdane Younsi, Sandor Poncsak, Duygu Kocaefe / *Drying thechnology*. – 2010. – Vol.28 (10). – P. 1-9.

97. Safiullina, A. Kh. Self-contained energy-saving plant for drying vegetable raw materials // A.Kh. Safiullina, P.A. Kainov, R.R. Safin, Sh.R. Mukhametzhanov, A.I. Shageeva / 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. – 2020. – P.253-260.

98. Sahbi Ouertani. Modeling of combined microwave and convective drying of wood: prediction of mechanical behavior via internal gas pressure // Sahbi Ouertani, Lamine Hassini, Soufien Azzouz, Sadoth Sandoval Torres, Ali Belghith, Ahmed Koubaa / *Drying technology*. – 2015. – Vol.33(10). – P.1234-1242.

99. Seyfarth, R. Continuous drying of lumber in a microwave vacuum kiln // R. Seyfarth, M. Leiker, N. Mollekopf / In 8th International IUFRO Wood Drying Conference. – 2003. – Vol. 8. – P.159-163.

100. Sungsoontorn, S. One-dimensional model of heat and mass transports and pressure built up in unsaturated porous materials subjected to microwave energy // S. Sungsoontorn, P. Rattanadecho, W. Pakdee // *Drying Technology*. – 2011. – Vol. 29(2). – P. 189-204.

101. Teleken, Jhony T. Mechanistic understanding of microwave drying of non-deformable porous media // Jhony T. Teleken, Marinho B. Quadri, Antonio P.N. Oliveira, Joao.B. Laurindo, Ashim K. Datta, Bruno A.M. Carciofi / *Drying Technology*. – 2021. – Vol. 39(7). – P. 850-867.

102. Xian-Jun Li. Microwave-vacuum drying of vood: model formulation and verification // Li Xian-Jun, Zhang Bi-Guang, Li Wen-Jun / *Drying Technology*. – 2008. – Vol. 26. – P. 1382-1387.

103. Yoshikawa, N. Fundamentals and applications of microwave heating of metals // N. Yoshikawa / *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. – 2010. – Vol. 44. – No.1. – P. 4-13.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Статистическая обработка результатов исследований

1. Количественная оценка расхождения между расчетными и экспериментальными данными.

Для количественной оценки расхождений между расчетными и экспериментальными значениями по известным методикам [50, 63] рассчитаны (формулы приведены на примере температуры):

- среднее арифметическое отклонение:

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n |T_i - T_{эi}|}{n}; \quad (1)$$

- среднее арифметическое относительное отклонение:

$$\delta_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{T_i - T_{эi}}{T_H - T_K} \right|; \quad (2)$$

- среднее квадратичное отклонение:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T_{эi})^2}{n - 1}}; \quad (3)$$

- среднее квадратичное отклонение среднего арифметического:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T_{эi})^2}{n(n - 1)}}. \quad (4)$$

Результаты расчетов сведены в таблицах 1-10.

Таблица 1 – Результаты статической обработки температурной кривой $T_{\text{пов.}}$ сушки образцов сосны (см.рис. 3.13 а)

№ п/п	τ , мин	$T_{\text{э}}$, °C	$T_{\text{р}}$, °C	$ T_{\text{э}} - T_{\text{р}} $	δ	$\left \frac{T_{\text{э}} - T_{\text{р}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} \right $	δ_0	$(T_{\text{э}} - T_{\text{р}})^2$	σ	σ_0
1.	0	20	20	0,00	2,875	0,00	0,04	0,00	3,524	1,246
2.	2	35	30	5,00		0,09		25,00		
3.	4	72	70	2,00		0,03		4,00		
4.	6	40	38	2,00		0,03		4,00		
5.	8	35	30	5,00		0,09		24,00		
6.	10	23	27	4,00		0,07		16,00		
7.	12	22	25	3,00		0,05		9,00		
8.	15	18	20	2,00		0,03		4,00		
Σ				23		0,39		87		

Таблица 2 – Результаты статической обработки температурной кривой $T_{\text{ц.}}$ сушки образцов сосны (см.рис. 3.13 а)

№ п/п	τ , мин	$T_{\text{э}}$, °C	$T_{\text{р}}$, °C	$ T_{\text{э}} - T_{\text{р}} $	δ	$\left \frac{T_{\text{э}} - T_{\text{р}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} \right $	δ_0	$(T_{\text{э}} - T_{\text{р}})^2$	σ	σ_0
1.	0	20	20	0,00	2,375	0,00	0,03	0,00	3,229	1,141
2.	2	60	58	2,00		0,03		4,00		
3.	4	72	70	2,00		0,03		4,00		
4.	6	69	67	2,00		0,03		4,00		
5.	8	61	63	2,00		0,03		4,00		
6.	10	58	60	2,00		0,03		4,00		
7.	12	51	58	7,00		0,17		49,00		
8.	15	48	50	2,00		0,03		4,00		
Σ				19		0,31		73		

Таблица 3 – Результаты статической обработки кривой влагосодержания $U_{\text{ср.}}$ сушки образцов сосны (см.рис. 3.13 а)

№ п/п	τ , мин	$U_{\text{э}},$ %	$U_{\text{р}},$ %	$ U_{\text{э}} - U_{\text{р}} $	δ	$\left \frac{U_{\text{э}} - U_{\text{р}}}{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}} \right $	δ_0	$(U_{\text{э}} - U_{\text{р}})^2$	σ	σ_0
1.	0	80	80	0,00	0,912	0,00	0,110	0,00	1,389	0,491
2.	2	79	78	1,00		0,12		1,00		
3.	4	77,5	77,8	0,30		0,03		0,09		
4.	6	76,4	76,9	0,50		0,06		0,25		
5.	8	75,7	76	0,30		0,03		0,09		
6.	10	75,4	75,9	0,50		0,06		1,25		
7.	12	74	75,7	1,70		0,21		2,89		
8.	15	72	75	3,00		0,37		9,00		
Σ				7,3		0,885		13,57		

Таблица 4 – Результаты статической обработки температурной кривой $T_{\text{пов.}}$ сушки образцов сосны (см.рис. 3.13 б)

№ п/п	τ , мин	$T_{\text{э}},$ °C	$T_{\text{р}},$ °C	$ T_{\text{э}} - T_{\text{р}} $	δ	$\left \frac{T_{\text{э}} - T_{\text{р}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} \right $	δ_0	$(T_{\text{э}} - T_{\text{р}})^2$	σ	σ_0
1.	0	20	20	0,00	2,75	0,00	0,06	0,00	4,24	1,5
2.	5	40	38	2,00		0,04		4,00		
3.	10	50	60	10,00		0,23		100,00		
4.	15	40	37	3,00		0,07		9,00		
5.	20	28	30	2,00		0,04		4,00		
6.	25	24	26	2,00		0,04		4,00		
7.	30	22	23	1,00		0,02		1,00		
8.	36,5	18	20	2,00		0,04		4,00		
Σ				22		0,48		126		

Таблица 5 – Результаты статической обработки температурной кривой $T_{ц.}$ сушки образцов сосны (см.рис. 3.13 б)

№ п/п	τ , мин	$T_{э}$, °C	T_p , °C	$ T_{э} - T_p $	δ	$\left \frac{T_{э} - T_p}{T_{\max} - T_{\min}} \right $	δ_0	$(T_{э} - T_p)^2$	σ	σ_0
1.	0	20	20	0,00	2,62	0,00	0,05	0,00	2,93	1,10
2.	5	50	45	5,00		0,10		25,00		
3.	10	47	70	3,00		0,06		9,00		
4.	15	60	62	2,00		0,04		4,00		
5.	20	57	60	3,00		0,06		9,00		
6.	25	55	58	3,00		0,06		9,00		
7.	30	53	55	3,00		0,06		9,00		
8.	36,5	48	50	2,00		0,04		4,00		
Σ				21		0,42		69		

Таблица 6 – Результаты статической обработки кривой влагосодержания $U_{ср.}$ сушки образцов сосны (см.рис.3.13 б)

№ п/п	τ , мин	$U_{э}$, %	U_p , %	$ U_{э} - U_p $	δ	$\left \frac{U_{э} - U_p}{U_{\max} - U_{\min}} \right $	δ_0	$(U_{э} - U_p)^2$	σ	σ_0
1.	0	30	30	0,00	0,325	0,00	0,06	0,00	0,388	0,134
2.	5	28,4	28,9	0,50		0,11		0,25		
3.	10	28	28,3	0,30		0,06		0,09		
4.	15	27,7	28	0,30		0,06		0,09		
5.	20	27,5	27,8	0,30		0,06		0,09		
6.	25	27	27,5	0,50		0,11		0,25		
7.	30	26,8	27	0,20		0,04		0,04		
8.	36,5	25,5	26	0,50		0,11		0,25		
Σ				2,6		0,553		1,06		

Таблица 7 – Результаты статической обработки кривой влагосодержания U сушки образцов сосны (см.рис.3.20)

№ п/п	τ , часы	U_3 , %	U_p , %	$ U_3 - U_p $	δ	$\left \frac{U_3 - U_p}{U_{\max} - U_{\min}} \right $	δ_0	$(U_3 - U_p)^2$	σ	σ_0
1.	0	60	60	0,00	2,38	0,00	0,02	0,00	2,379	1,187
2.	10	28	26	2,00		0,03		4,00		
3.	20	15	12	2,00		0,05		4,00		
4.	30	5	3	2,00		0,03		4,00		
Σ				6,00		0,11		12,00		

Таблица 8 – Результаты статической обработки кривой влагосодержания U сушки образцов березы (см.рис.3.20)

№ п/п	τ , часы	U_3 , %	U_p , %	$ U_3 - U_p $	δ	$\left \frac{U_3 - U_p}{U_{\max} - U_{\min}} \right $	δ_0	$(U_3 - U_p)^2$	σ	σ_0
1.	0	60	60	0,00	1,8	0,00	0,07	0,00	2,291	1,024
2.	10	35	32	3,00		0,15		9,00		
3.	20	20	18	2,00		0,07		4,00		
4.	30	12	10	2,00		0,07		4,00		
5.	40	5	3	2,00		0,07		4,00		
Σ				9,00		0,36		21,00		

Таблица 9 – Результаты статической обработки кривой влагосодержания U сушки образцов дуба (см.рис.3.20)

№ п/п	τ , часы	U_3 , %	U_p , %	$ U_3 - U_p $	δ	$\left \frac{U_3 - U_p}{U_{\max} - U_{\min}} \right $	δ_0	$(U_3 - U_p)^2$	σ	σ_0
1.	0	60	60	0,00	1,57	0,00	0,02	0,00	1,87	0,707
2.	10	43	41	2,00		0,03		4,00		
3.	20	30	28	2,00		0,03		4,00		
4.	30	23	21	2,00		0,03		4,00		
5.	40	15	13	2,00		0,03		4,00		
6.	50	10	8	2,00		0,03		4,00		
7.	60	5	4	1,00		0,01		1,00		
Σ				11,00		0,19		21,00		

2. Проверка адекватности математической модели процесса вакуумной СВЧ сушки пиломатериалов.

Для проверки однородности нескольких дисперсий при равных объемах всех рассматриваемых выборок может быть использован G-критерий Кохрена.

Для решения этой задачи применяются результаты статической обработки кривых изменения влагосодержания образцов сосны при вакуумной СВЧ сушке (рис.3.13).

Таблица 10 – Исходные данные к расчету адекватности математической модели

№ п/п	τ, мин	U _{1э} , %	U _{2э} , %	U _{3э} , %	U _{э(ср.)} , %	U _р , %	$(U_{э(ср.)} - U_p)^2$	$\sigma^2 \cdot 10$
1.	2	79,9	79	76	78,3	80	2,89	14,45
2.	4	79,7	77,5	73	76,7	79,9	10,24	22,62
3.	6	79,6	76,4	68	74,6	79,7	26,01	36,06
4.	8	79,3	75,7	67	74	79,5	30,25	38,89
5.	10	78,9	75,4	66	73,4	79	31,36	39,59
6.	12	78,6	74	65	72,5	78,5	36	42,40
7.	15	78,2	72	62	71,4	78	43,56	46,60
Σ							180,31	200,8

Для определения величины дисперсии вычислим расчетное значение G-отношение по формуле:

$$G_{\text{расч}} = \frac{\sigma_{\text{max}}^2}{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2} = \frac{46,6}{200,8} = 0,23. \quad (5)$$

В числителе данной формулы используется наибольшая из рассматриваемых дисперсий, а в знаменателе – сумма всех дисперсий.

Далее по таблицам распределения Кохрена по выбранному уровню значимости q, числу степеней свободы каждой выборки $f=n-1$ и количеству выборок k находим величину $G_{\text{табл}}$.

Для уровня значимости $q=0,05$:

$$G_{\text{табл}} = (n-1; k) = G_{\text{табл}}(2; 7) = 0,57. \quad (6)$$

Так как $G_{\text{расч}} < G_{\text{табл}}$, то гипотезу об однородности дисперсии воспроизводимости следует принять с уровнем значимости 0,05.

В этом случае рассчитывается дисперсия воспроизводимости по формуле:

$$\sigma^2(1)_{\text{воспр}} = \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2}{k} = \frac{200,8}{7} = 28,58. \quad (7)$$

Число степеней свободы этой дисперсии равно:

$$f(1)=k(n-1)=7 \cdot 2 = 14. \quad (8)$$

Оценка адекватности результатов расчетов экспериментальным данным.

Рассчитаем дисперсию адекватности:

$$\sigma^2(2)_{\text{ад}} = \frac{n}{k-2} \sum_{i=1}^k (U_{\text{э(ср.)}} - U_p)^2 = \frac{3}{5} \cdot 180,31 = 108,186, \quad (9)$$

число степеней свободы этой дисперсии:

$$f(2)=k-2=7-2=5. \quad (10)$$

Для проверки статистической гипотезы об однородности двух дисперсий используем F-критерий Фишера:

$$F_{\text{расч}} = \frac{\sigma^2(2)_{\text{ад}}}{\sigma^2(1)_{\text{воспр}}} = \frac{108,186}{28,58} = 3,81. \quad (11)$$

Далее задаем уровень значимости q и числа степени свободы дисперсий числителя и знаменателя, $f(1)$ и $f(2)$. По трем величинам q , $f(1)$ и $f(2)$ из таблиц распределения Фишера находим величину $F_{\text{табл}}$.

Для уровня значимости $q=0,05$ табличное значение критерия Фишера:

$$F_{\text{табл}} = (f(2); f(1)) = F_{\text{табл}(0,95)}(5; 14) = 4,64. \quad (12)$$

Так как $F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$, то можно сделать вывод об адекватности результатов расчетов к экспериментальным данным.

3. Расчет доверительного интервала.

Величина среднеарифметического отклонения, найденная по выборке, представляет ценность, поскольку по ней можно судить об истинном среднем, т.е. математическом ожидании. Представляет интерес отыскание

величины максимальной ошибки β^* , которую мы допускаем, предполагая, что математическое ожидание равно δ .

Величина β^* определяется по формуле:

$$\beta^* = \frac{t(p_0; n) \cdot \sigma}{\sqrt{n}}. \quad (13)$$

Величина t называется табличным значением t -критерия Стьюдента и находится по таблице:

$$t_{\text{табл}} = (p_0; n - 1) = F_{\text{табл}(0,95)}(0,95; 2) = 4,3; \quad (14)$$

$$\beta^* = \frac{4,3 \cdot 0,0286}{1,73} = 0,0710. \quad (15)$$

Максимальная ошибка расчетов для влагосодержания в данном случае составляет $\pm 7,1\%$.

Максимальная ошибка расчетов в целом по проведенным исследованиям составляет $\pm 17\%$.

**Результаты численных исследований изменения температуры и
влажностендержания древесины при двухстороннем воздействии СВЧ
энергии**

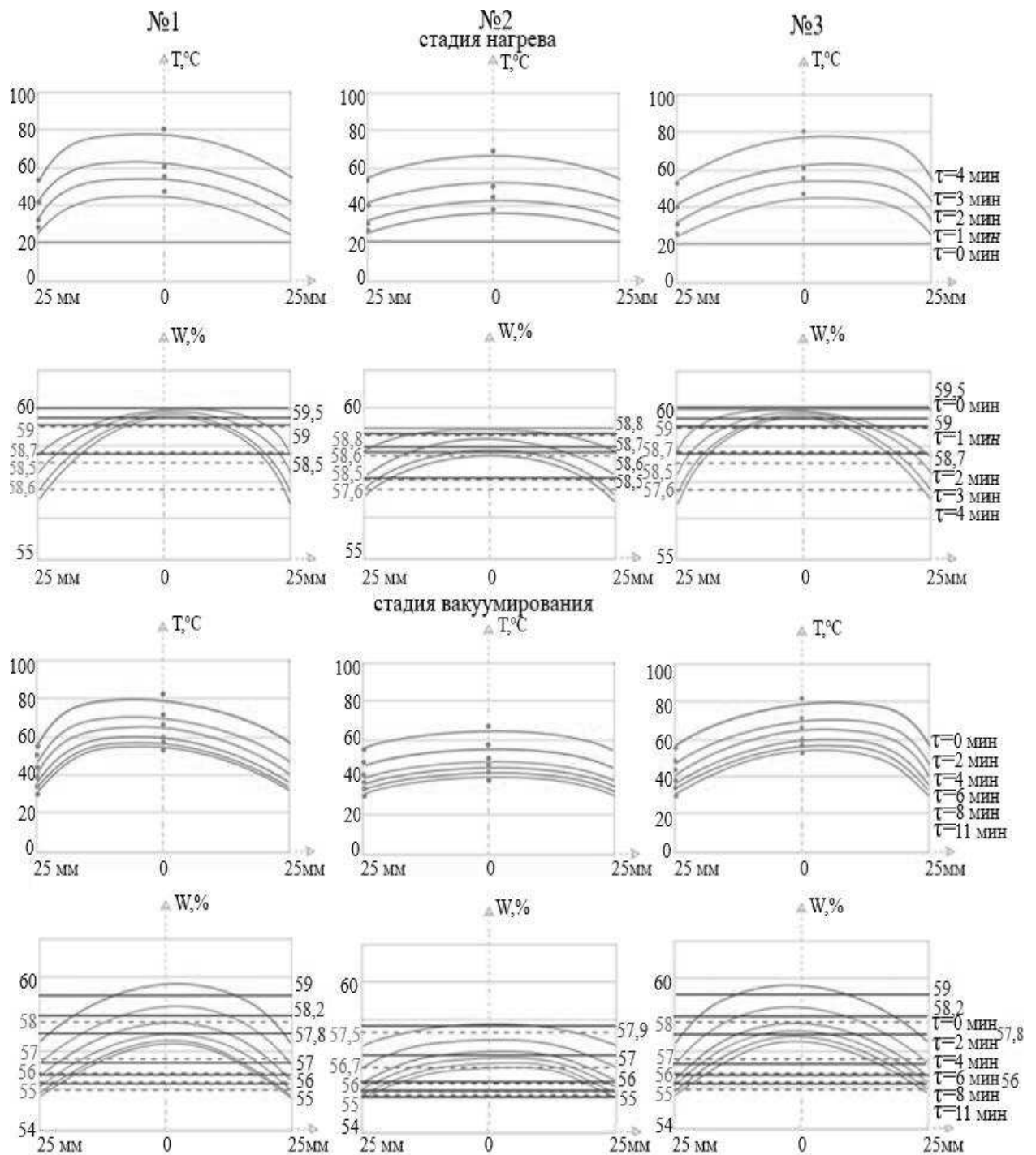


Рис.Б1.1 – Распределение температуры и влажностендержания по сечению сосновых сортиментов с начальным влажностендержанием 60 %, расположенных в различных по высоте штабеля зонах при одновременном двухстороннем облучении штабеля древесины (по рис.3.9)

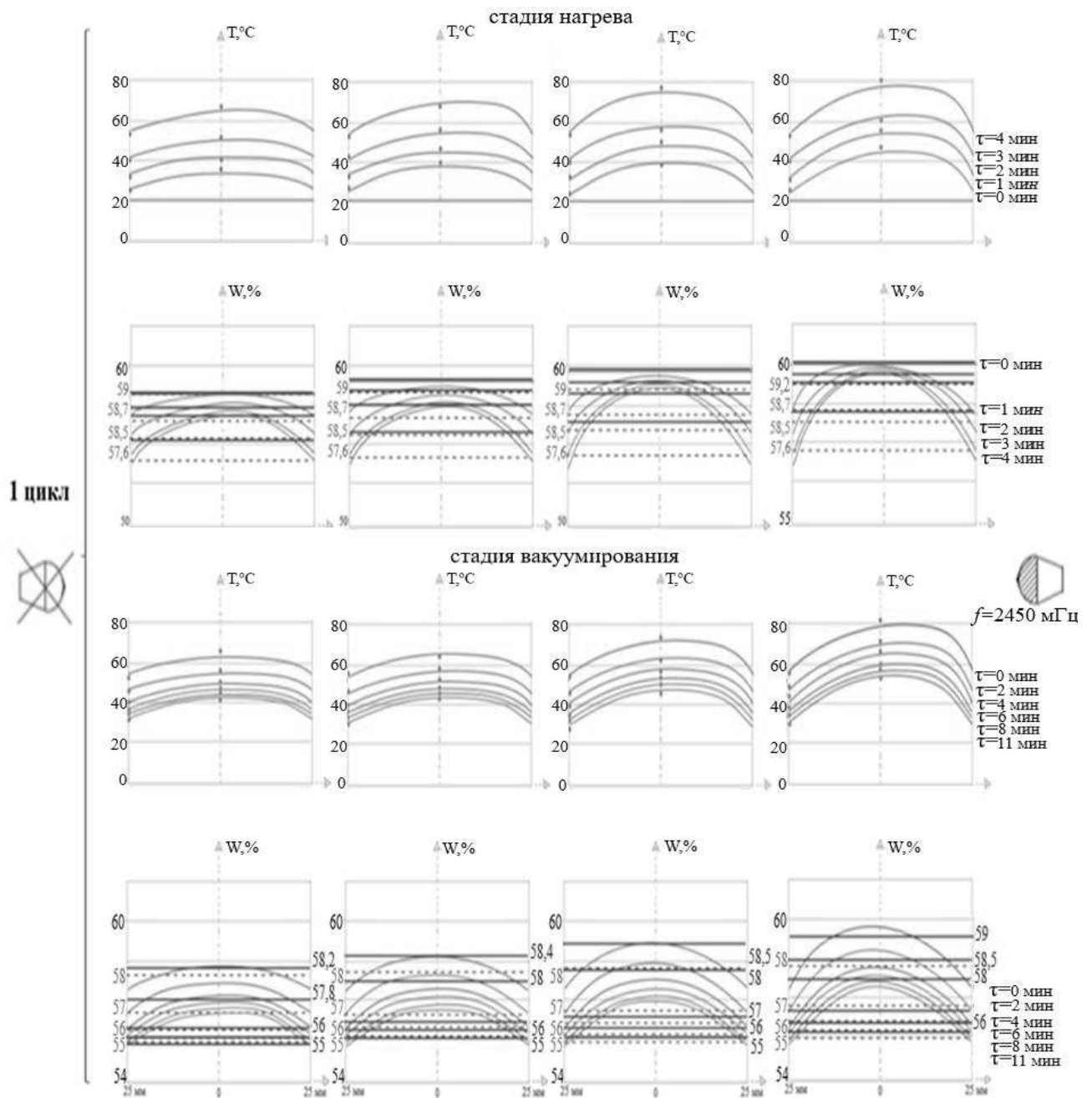


Рис.Б1.2 – Распределение температуры и влагосодержания по сечению сортиментов сосны с начальным влагосодержанием 60 %, расположенных в четырех разных точках штабеля (рис.3.11) при облучении перпендикулярно сверху пласти

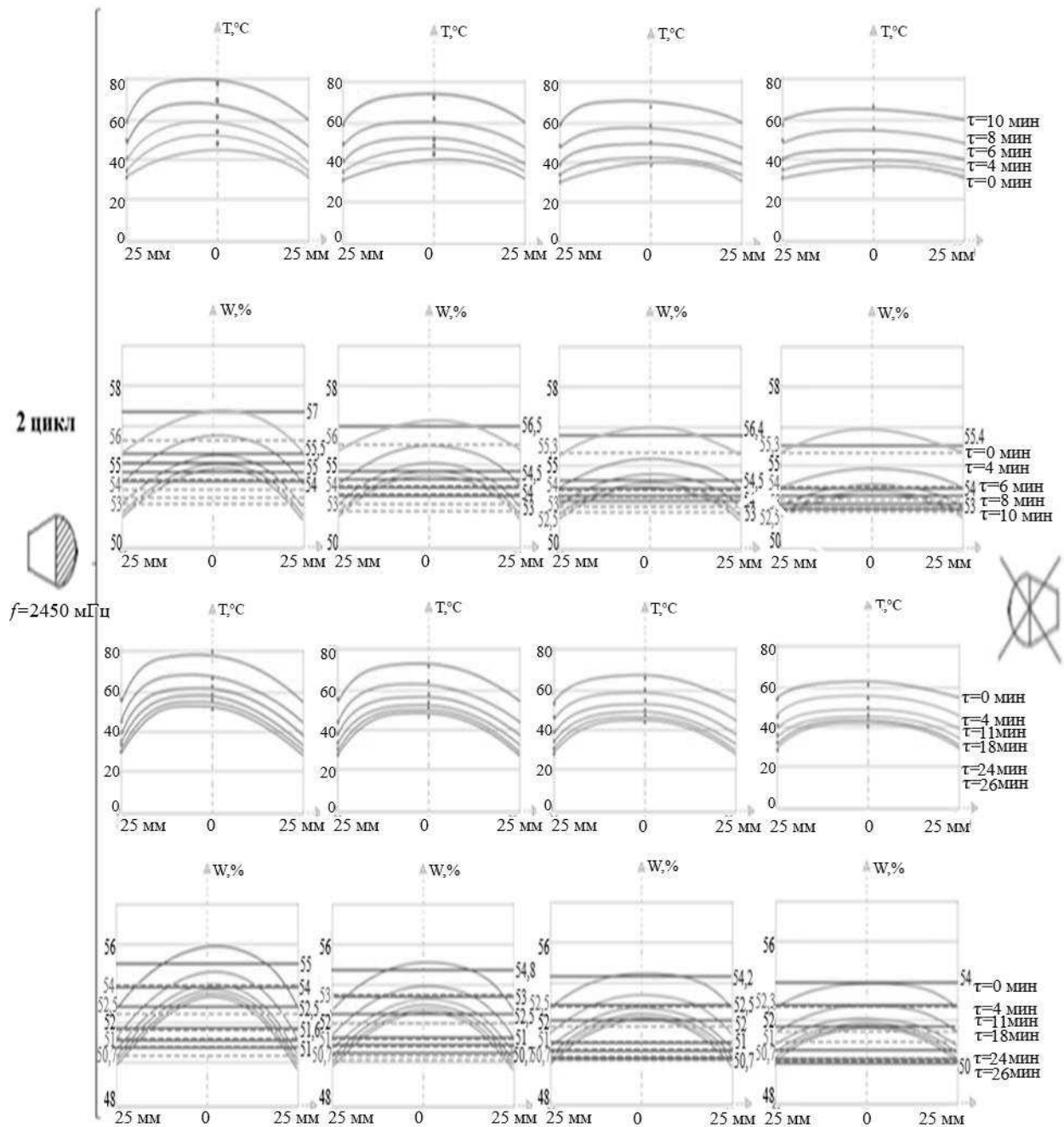


Рис.Б1.3 – Распределение температуры и влагосодержания по сечению сортиментов сосны с начальным влагосодержанием 60 %, расположенных в четырех разных точках штабеля (рис.3.11) при облучении перпендикулярно снизу пласти

Параметры инженерного расчета сушильного комплекса

8	f, МГц	г, м	Руд	q, кВт/кг	рб, кг/м³	W нач, %	W кон, %	Руд*	с, кДж/кг*°C	тв, кг	η, %	Рног	δ', %	Рпр	ε, Ф/м	l, см	tgσ	а	λ0, см	π	
9	13,56	0,5	81,2	0,71	400	60	10	261,2	2,3	200	8,533654	83,2	19,31158595			4,07	100	6,5	0,018625	2210,8	3,14
10	2450	0,5	180	0,71	400	60	10		2,3	200						1,047		0,004	0,001053	12,2	
11	13,56	0,9	7												178						
12	2450	0,9	171																		
13	13,56 снизу	0,525	66,8	0,71	400	60	10	88,2	2,3	200	9,568733	74,2	20,49476945	14		4,07	100	6,5	0,018625	2210,8	3,14
14	13,56 слева	0,5	81,2																		
15	13,56 снизу	2	31,6																		
16	13,56 слева	0,9	7																		
17	13,56 снизу	0,85	9,73																		
18	13,56 слева	1,41	5,13																		
19	13,56 снизу	0,9	7																		

1	s', мм	K	b, м	l, м	P, МН/м²	σид, МН/м²	Wp, м³	B2	s'p, мм	s'', мм	K0	D, м
2	4,75	0,4	4,45	-	0,1	140	-	-	-	-	-	-
3	-	12	-	6,2	0,1	140	16,07 *10^-7	0,6	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	16,07 *10^-7	-	15,64	-	-	-
5	-	0,6	-	-	0,1	140	-	-	-	7,11	1	4,45
6												

▲	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Vзгр., м³	Vдр., м³	Vсв., м³	Спил., м	јпов. мат., кг/(м²·с)	Fпов. мат., м²	Рисп. вл., кг/с	Qтепл., кВт	Nтн., кВт	Nвн., кВт	Nвен., кВт	ΣN, кВт	Qдр. отх., кг	Vгаза, м³
2	10	5,88	4,12	0,03	0,00005	392	0,0196	45,08	9,01	10,08	3	22,01	10,31	20,37
3	15	8,82	6,18	0,03	0,00005	548	0,0277	63,02	12,6	15,12	3	30,72	14,43	28,44
4	20	11,76	8,24	0,03	0,00005	784	0,0392	90,16	18,03	20,16	3	41,19	19,36	38,14
5	10	5,88	4,12	0,04	0,00004	294	0,0117	27,04	5,4	10,08	3	18,48	8,68	17,11
6	15	8,82	6,18	0,04	0,00004	441	0,0176	40,57	8,11	15,12	3	26,25	12,32	21,28
7	20	11,76	8,24	0,04	0,00004	588	0,0235	54,09	10,81	20,16	3	33,97	15,96	31,45
8	10	5,88	4,12	0,05	0,00003	235,2	0,00705	16,22	3,24	10,08	3	16,36	7,68	15,14
9	15	8,82	6,18	0,05	0,00003	352,8	0,01058	24,34	4,86	15,12	3	22,98	10,8	21,27
10	20	11,76	8,24	0,05	0,00003	470,4	0,0141	32,45	6,49	20,16	3	29,65	13,93	27,45
11	10	5,88	4,12	0,06	0,00002	196	0,00392	9,016	1,8	10,08	3	14,88	7	13,77
12	15	8,82	6,18	0,06	0,00002	294	0,00588	13,52	2,7	15,12	3	20,82	9,78	19,27
13	20	11,76	8,24	0,06	0,00002	470,4	0,0094	21,63	4,32	20,16	3	27,48	12,91	27,48
14	10	5,88	4,12	0,07	0,00002	168	0,00336	7,72	1,54	10,08	3	14,62	6,87	13,53
15	15	8,82	6,18	0,07	0,00002	252	0,00504	11,59	2,3	15,12	3	20,42	9,59	18,9
16	20	11,76	8,24	0,07	0,00002	336	0,00672	15,45	3,09	20,16	3	26,25	12,33	24,3

Акт внедрения

«УТВЕРЖДАЮ»
 Директор
 ООО «НПП «ТермоДревПром»»
 /П.А. Кайнов/
 « 8 » июня 2023 г.

АКТ ПРИНЯТИЯ К ВНЕДРЕНИЮ

вакуумной СВЧ установки для сушки пиломатериалов

«8» июня 2023 г. комиссия в составе представителей ООО «НПП «ТермоДревПром»» директора Кайнова П.А. и главного инженера Сычева А.А. составила настоящий акт о том, что на ООО «НПП «ТермоДревПром»» принята к внедрению вакуумная СВЧ установка для сушки пиломатериалов, разработанная научной группой в составе представителей ФГБОУ ВО «КНИТУ» д.т.н., профессора Сафина Р.Р., к.т.н., доцента Мухаметзянова Ш.Р. и старшего преподавателя Шагеевой А.И.

Разработанная представителями ФГБОУ ВО «КНИТУ» вакуумная СВЧ установка для сушки пиломатериалов реализует метод осциллирующей сушки, который складывается из последовательно чередующихся стадий «нагрев» при включенном СВЧ генераторе и «вакуумирование» при включенном вакуумном и/или тепловом насосе. Установка для сушки пиломатериалов представляет собой изолированную сушильную камеру, содержащую модуль СВЧ нагрева, систему вакуумирования и конденсации пара, установленные снаружи сушильной камеры. Для подвода тепловой энергии к материалу используются СВЧ магнетроны, помещенные в экранирующий излучение кожух, передающие в камеру сушки электромагнитное излучение через СВЧ излучающий рупор, подсоединенный к латунным СВЧ волноводам. Система конденсации и вакуумирования состоит из компрессора теплового насоса, конденсатора с конденсатосборником и вакуумного насоса.

Экономическая эффективность внедрения вакуумной СВЧ установки обусловлена повышением производительности процесса сушки древесины, путем сокращения продолжительности процесса без ущерба качественным показателям материала.

Представители
 ООО «НПП «ТермоДревПром»»

П.А. Кайнов
 А.А. Сычев

Представители
 ФГБОУ ВО «КНИТУ»

Р.Р. Сафин
 Ш.Р. Мухаметзянов
 А.И. Шагеева

Патент

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2732325

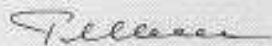
Конденсационная сушилка

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Казанский национальный исследовательский технологический университет" (ФГБОУ ВО "КНИТУ") (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2019135787
Приоритет изобретения 06 ноября 2019 г.
Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 15 сентября 2020 г.
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 06 ноября 2039 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Измаилов

