

На правах рукописи



Саерова Ксения Вячеславовна

**ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ
ПЛАЗМЕННАЯ ОБРАБОТКА ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАННОГО
ДРЕВЕСНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2024

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Сафин Руслан Рушанович

Официальные оппоненты: **Шкуро Алексей Евгеньевич**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет», профессор кафедры технологии целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров;

Лукаш Александр Андреевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный инженерно-технологический университет», профессор кафедры лесного дела и технологии деревообработки.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Костромской государственный университет» (г. Кострома).

Защита диссертации состоится «18» декабря 2024 года в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.312.10, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330.

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

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=521935>.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Екатерина Игоревна
Байгильдеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На сегодняшний день строительная индустрия не обходится без такого материала, как древесина, которая используется в комнатной и уличной мебели, в строительстве домов, производстве твёрдых упаковок и т.д. Однако, в связи с уязвимостью древесины и материалов на ее основе к влаге, воздействию которой может вызвать гниение и корабление материала, деревообрабатывающая промышленность находится в постоянном поиске методов модификации древесных материалов с целью повышения их эксплуатационных характеристик, таких как влагостойкость, формостабильность, долговечность и биоустойчивость.

В связи с вышеизложенным, особый научно-практический интерес представляют разработки, позволяющие улучшить эксплуатационные характеристики материалов на основе древесины без снижения её экологичности.

Такой технологией является процесс термической модификации древесного материала, позволяющий достичь таких свойств, как снижение гигроскопичности и давления набухания в материале, тем самым предотвращая образование микротрещин и увеличивая эксплуатационные характеристики изделия. Однако данный способ модификации имеет и негативную сторону, т.к. снижает прочностные и адгезионные свойства древесного материала.

Анализ литературных данных показал, что на адгезионные характеристики древесного материала положительно влияют такие физические способы модификации, как плазменная, ультрафиолетовая и озоновая обработки. Основываясь на этих данных, можно ожидать повышения прочности композиционных материалов на основе древесного наполнителя при воздействии на них постоянного электрического поля.

В связи с этим исследования влияния высокочастотной низкотемпературной плазменной обработки на предварительно термомодифицированную древесину являются актуальными.

Работа выполнена в рамках договора № 12-22 (2-22) «Физико-химическая обработка древесного наполнителя в производстве композитных материалов» конкурса «ТехноСтарт», проводимого ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Степень разработанности темы. В процессе диссертационного исследования проанализированы работы, посвященные термической модификации и высокочастотной плазменной обработке древесины. Среди отечественных исследователей, которые внесли значительный вклад в развитие теории и практики процессов, протекающих при термической модификации, следует отметить Р.Р. Сафина, Р.Г. Сафина, Р.Р. Хасаншина, Е.Г. Разумова, Т.Е. Владимирову. Существенный вклад в развитие темы высокочастотной низкотемпературной плазменной обработки лигноцеллюлозных материалов внесли Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипников, Е.А. Шевнина, В.С. Желтухин, а также Jens Vanneste, Annick Vanhulsel и др.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка и научное обоснование технологии производства композиционных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками на основе древесины, прошедшей предварительную термическую модификацию и последующую высокочастотную низкотемпературную плазменную обработку.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1) установление влияния высокочастотной низкотемпературной плазмы воздуха на термически модифицированную древесину;

2) разработка математической модели обработки древесины высокочастотной низкотемпературной плазмой воздуха;

3) определение рациональных режимных параметров ведения процесса высокочастотной низкотемпературной плазменной обработки поверхности термомодифицированной древесины;

4) установление целесообразности использования объемного термомодифицирования и поверхностной высокочастотной низкотемпературной плазменной обработки древесины в производстве композиционных материалов;

5) определение сферы использования древесины, прошедшей термическую модификацию и последующую высокочастотную низкотемпературную плазменную обработку.

Научная новизна результатов работы. Работа содержит научно-обоснованные технологические решения (предварительная высокотемпературная обработка древесных материалов методом термического модифицирования с последующей высокочастотной плазменной обработкой), направленные на улучшение комплекса свойств древесины:

1. Впервые установлено, что обработка высокочастотной низкотемпературной плазмой воздуха термически модифицированной древесины снижает краевой угол смачивания поверхности на 46 %, увеличивает пропиточный коэффициент по поглощению на 128,3 % и коэффициент по глубине проникновения пропитывающей жидкости на 90,2 %.

2. Разработана математическая модель обработки древесины высокочастотной низкотемпературной плазмой воздуха, основанная на молекулярной динамике и результатах исследования ИК- и рентгеновской спектроскопии, которая отличается тем, что позволяет определить количество разрывающихся С-С связей, способствующих образованию новых функциональных групп в процессе обработки в зависимости от продолжительности воздействия, мощности разряда, плотности ионного тока, энергии разряда, энергии ионов и породы древесины.

3. Предложена двухстадийная обработка древесины, включающая предварительную объёмную термическую модификацию и последующую поверхностную обработку высокочастотной низкотемпературной плазмой воздуха. Определены рациональные режимные параметры ведения двухступенчатой модификации древесины: на первой стадии осуществляется термическая модификация конвективным методом продувания через слой при температуре 210 °С, на второй стадии – высокочастотная низкотемпературная плазменная обработка поверхности термомодифицированной древесины при удельной мощности разряда плазмы 2 кВт, плотности ионного тока 0,83 А/м² в течение 10 минут на 1 м² поверхности древесины.

4. Установлена целесообразность использования предложенной двухступенчатой модификации древесины в производстве композиционных материалов по сравнению с необработанной древесиной: в производстве древесно-полимерных композитов плазменная обработка позволяет улучшить прочность при растяжении на 83,6 % и ударную вязкость на 123,8 %; в производстве клееных изделий, в частности, фанеры и клееного бруса, влияет на снижение краевого угла смачивания, повышая, тем самым, прочность при сдвиге по клеевому соединению на 22,7 %, а также прочность на изгиб клееного бруса на 66,6 %.

5. Установлена возможность повышения акустической константы древесины в 1,38 раза путём термической модификации при 210 °С.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость

представленной работы заключается в разработке математического описания процесса обработки древесного наполнителя высокочастотной низкотемпературной плазмой, основанного на молекулярно-динамической модели молекулярной динамики, которое позволило определить изменения в структуре химических связей в молекуле целлюлозы вследствие воздействия низкоэнергетических ионов кислорода. Результаты численных расчетов молекулярно-динамической модели показали, что при ионной бомбардировке целлюлозы ионом кислорода происходит разрыв связей С–С и С–О в главной цепи полимера, а также разрыв связей С–Н и О–Н. Распыленные частицы представляют собой одиночные атомы С, О и Н, что было подтверждено рентгеновской спектроскопией, показавшей, что наибольшее количество разрывов произошло по С–С связям. Полученное в результате исследований математическое описание позволяет определить количество разорвавшихся связей С–С в зависимости от породы древесины и технологических параметров высокочастотной плазменной обработки.

Практическая значимость работы заключается в разработке технологии использования термической модификации и высокочастотной плазмы в технологических процессах производства музыкальных инструментов и клееных большепролетных конструкций с улучшенными физико-механическими характеристиками. Применение термомодифицированной древесины, подвергнутой высокочастотной плазменной обработке в производстве музыкальных инструментов, в частности, позволяет существенно повысить акустическую константу за счет улучшения внутренних структурных характеристик деревянных деталей. Использование высокочастотной плазмы воздуха при склеивании термомодифицированных ламелей в процессе изготовления большепролетных конструкций позволяет расширить сферу их применения, в частности, для использования в помещениях с высокой влажностью. Предложенная технология производства большепролетных клееных конструкций внедрена в ООО «НПП «ТермоДревПром» (г. Казань).

Методологическая, теоретическая и эмпирическая базы исследования. Теоретической базой исследований являлись работы ученых по изменению физико-механических свойств древесных материалов за счет их модификации термическим и высокочастотным плазменным методом, работы по исследованию изменения водо- и влагостойкости древесных материалов в результате их модифицирования. Эмпирическую основу исследования составляли физико-механические свойства объекта, такие как предел прочности при растяжении и изгибе, водо- и влагопоглощение, смачиваемость поверхности древесных образцов. Статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась в средах Microsoft Excel и программном пакете для молекулярно-динамических расчетов LAMMPS.

Предмет и объект исследования. Предметом исследования является технология повышения прочности древесных композиционных материалов за счет предварительной термической модификации и последующей высокочастотной низкотемпературной плазменной обработки. Объектом исследования является древесина, прошедшая предварительную термическую модификацию и последующую высокочастотную плазменную обработку и композиционные материалы на её основе (клееных брус, фанера, древесно-полимерный композит).

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследований адгезионных и адсорбционных свойств древесины, подвергнутой объемному термическому модифицированию и последующей поверхностной обработке высокочастотной плазмой воздуха пониженного давления.

2. Математическая модель процесса высокочастотной низкотемпературной плазменной обработки, позволяющая прогнозировать необходимую продолжительность обработки поверхности древесины бомбардируемыми ионами высокочастотной плазмы в зависимости от технологических параметров и породы древесины.

3. Режимные параметры двухступенчатой обработки древесины путем ее термической модификации и последующей обработки высокочастотной плазмой воздуха пониженного давления.

4. Технология получения клееного бруса, фанеры и древесно-полимерного композита с повышенными эксплуатационными свойствами.

5. Результаты исследований в виде зависимостей изменения коэффициентов пропитки по поглощению и глубине проникновения, а также модуля упругости при изгибе, позволяющие влиять на основные эксплуатационные показатели клееных большепролетных конструкций. Результаты исследований в виде зависимостей изменения акустической константы и плотности древесины, позволяющие влиять на проводимость звука в музыкальных инструментах.

Личное участие автора заключается в выборе темы, в сборе и анализе литературных источников, в постановке задач и их решении, в проведении экспериментальных исследований, обсуждении результатов, в формулировании выводов по проделанной работе.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Основные результаты диссертационной работы соответствуют п.3 «Теория и методы воздействия техники и технологий на лесную среду в процессе лесовыращивания, заготовки и переработки древесного сырья» и п. 4 «Технология и продукция в производстве: лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном, деревообрабатывающем, целлюлозно-бумажном, лесохимическом и сопутствующих им производствах» из паспорта специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины.

Достоверность результатов исследований подтверждается их сопоставимостью с современными аналитическими методами испытаний и анализа; стандартными и специальными методиками оценки свойств древесных материалов; согласованностью научных результатов с известными теоретическими и экспериментальными результатами исследований.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались:

– на международных конференциях: «Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса» (Кострома, 2021); «Актуальные вопросы современной науки: теория, технология, методология и практика» (Уфа, 2022); International Scientific Siberian Transport Forum (2023); «Инноватика в современном мире: опыт, проблемы и перспективы развития» (Уфа, 2023); «Взаимодействие ионов с поверхностью «ВИП-2023» (Москва, 2023);

– на всероссийских конференциях: «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки» (Казань, 2023); «Лесозаготовка и комплексное использование древесины» (Красноярск, 2023); «Наука и общество в современном мире» (Москва, 2023);

– на научных сессиях по технологическим процессам ФГБОУ ВО «КНИТУ» (Казань, 2021-2024 гг.).

Результаты исследований отмечены: стипендией Правительства Российской Федерации по приоритетным направлениям подготовки (2022 г.), дипломом победителя

конкурса научно-исследовательских проектов аспирантов «ТехноСтарт» (2022 г.), дипломом победителя конкурса «50 лучших инновационных идей для РТ» (2023 г.).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, включенных в Перечень ВАК, 1 статья в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных Scopus, 8 трудов в прочих изданиях.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Научная работа содержит 143 страницы основного машинописного текста, в том числе 7 таблиц, 69 рисунков. Библиографический список включает 128 наименований цитируемых работ, в том числе 21 на иностранном языке.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе приведен анализ современного состояния вопроса применения древесины в композиционных материалах. На основе аналитического обзора зарубежной и отечественной литературы была разработана классификация методов обработки древесины. Изучено и проанализировано влияние термической модификации и высокочастотной низкотемпературной плазменной обработки на свойства древесины.

Вторая глава посвящена разработке математической модели высокочастотной низкотемпературной плазменной обработки древесины. Основной задачей математического описания данного процесса является определение необходимого времени воздействия ионов плазмы на материал с целью требуемого изменения свойств его поверхности. Для этого было исследовано воздействие ионов плазмы древесины, прошедшей предварительную термическую модификацию и последующую высокочастотную плазменную обработку. На рисунке 1 представлены соответствующие XPS спектры, откуда видно, что соотношение O/C, а также пики C–O, O–C–O, C=O, O=C–O в древесине после плазменной обработки значительно увеличиваются, поскольку на поверхности древесины образуются группы, богатые кислородом. В частности, после плазменной обработки в образцах уменьшились пики C–C и C–H (табл. 1).

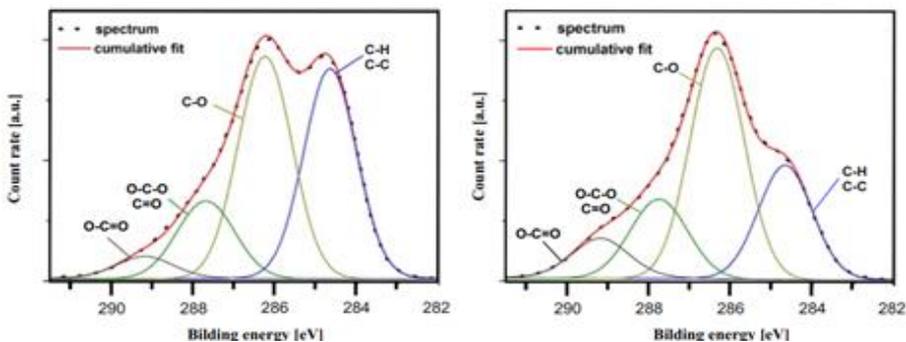


Рис. 1. Спектр XPS-Cl: а – термодревесина березы, б – термодревесина березы после ВЧ-плазменной обработки

Таблица 1 – Процентное содержание функциональных групп на поверхности древесины до и после плазменной обработки

	X _i /C _{итог}				
	O/C	C-C C-H	C-O	O-C-O C=O	O=C-O
ТМ 210	0,40	43 (3,8)	39 (1,5)	13 (2,0)	4,3 (0,7)
ВЧ + ТМ 210	0,73	24,7 (2,9)	47 (3,1)	18,5 (3,3)	9,8 (1,2)
Разница, %	82,5	-42,8	20,5	42,3	127,9

Таким образом, из результатов рентгеновской спектроскопии выявлено, что значительное уменьшение энергии связи наблюдается у C-C связей. Поэтому общее количество разорвавшихся связей рассчитывалось именно для C-C групп.

Бомбардировка поверхности ионами плазмы происходит в нанослое, поэтому дальнейшие расчёты были приняты для глубины обработки в 1 нм. Тогда количество молекул целлюлозы в поверхностном нанослое древесины вычисляется по уравнению:

$$v = 10^{-9} \cdot S_{\text{мат}} \cdot \frac{\rho_{\text{мат}} \cdot \epsilon \cdot \omega}{M_{\text{рцел}} \cdot N_A}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{мат}}$ – плотность материала, кг/м³; $M_{\text{рцел}}$ – молекулярная масса целлюлозы, г/моль; ϵ – порозность поверхности; ω – содержание целлюлозы в материале; N_A – число Авогадро.

Общее количество C-C связей в объеме площадью поверхности $S_{\text{мат}}$ и толщиной 1 нм вычисляется по формуле:

$$y = 4n \cdot v, \quad (2)$$

где 4 – количество C-C связей в одном звене молекулы целлюлозы; n – число звеньев в молекуле целлюлозы.

Для расчета количества разорвавшихся при плазменной обработке C-C связей необходимо рассчитать количество частиц (H), которые бомбардируют поверхность древесины:

$$H = J_i \cdot 6,24 \cdot 10^{18} \cdot S_{\text{мат}}, \quad (3)$$

где $S_{\text{мат}}$ – площадь бомбардируемой поверхности материала, м²; J_i – плотность ионного тока, определяемая по уравнению:

$$J_i = 0,0521 W_p^6 - 0,247 W_p^5 + 0,0781 W_p^4 + 1,4948 W_p^3 - 3,41 W_p^2 + 2,9759 W_p - 0,1211. \quad (4)$$

При этом мощность разряда (W_p) – это функция от потребляемой мощности, представленной в виде полиномиального уравнения третьей степени:

$$W_p = -0,0006 W_{\text{потр}}^3 + 0,016 W_{\text{потр}}^2 + 0,0356 W_{\text{потр}} + 0,1489. \quad (5)$$

Отсюда дифференциальное уравнение изменения количества C-C связей в материале определяем по формуле:

$$\frac{dy}{d\tau} = - \frac{W_i \cdot H}{W_{\text{св}}} \cdot \nu, \quad (6)$$

где $W_{\text{св}}$ – энергия связей C-C, эВ; W_i – энергия ионов, эВ; ν – вероятность попадания ионов в C-C связь молекулы целлюлозы, которая определяется выражением:

$$\nu = \frac{\gamma}{H} \cdot \eta \cdot \eta, \quad (7)$$

где η – эмпирический коэффициент, учитывающий возможное поверхностное загрязнение, пусковой момент, время релаксации и т.д.; η – текущее долевое содержание C-C связей в

материале в процессе высокочастотной низкотемпературной плазменной обработки, определяемое по рисунку 2.

Начальным условием для решения дифференциального уравнения (7) является количество С-С связей в материале:

$$\gamma(\tau=0) = \gamma_{\text{нач.}}$$

Таким образом, в результате расчёта математической модели было определено количество разорвавшихся С-С связей молекул целлюлозы, расположенных в поверхностном нанослое материала.

В третьей главе обоснован выбор и приведено описание объектов исследования. Описано оборудование для термической модификации и высокочастотной плазменной обработки целлюлозных материалов.

Для качественного исследования древесного наполнителя была разработана экспериментальная установка по термомодификации методом конвективного продувания через слой, схема и внешний вид которой представлены на рисунке 3.

Для плазменной модификации древесных образцов использовалась опытно-промышленная высокочастотная плазменная установка емкостного разряда, схема и внешний вид которой представлен на рисунке 4.

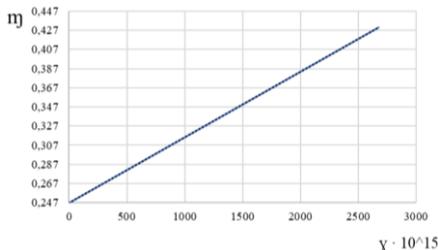
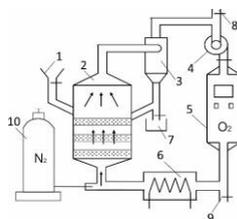


Рис. 2. Доля С-С связей в зависимости от общего количества С-С связей на площади поверхности $S_{\text{пл}}$



а)

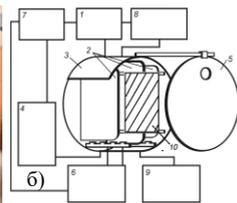


б)

Рис. 3. Экспериментальная установка термического модифицирования методом конвективного продувания через слой: а) внешний вид; б) схема, где 1 – горловина; 2 – бункер; 3 – циклон; 4 – вентилятор; 5 – анализатор содержания кислорода; 6 – нагревательный узел; 7 – накопитель; 8, 9 – заслонка; 10 – газовый баллон (азот)



а)



б)

Рис. 4. Опытно-промышленная ВЧ-плазменная установка: а) внешний вид установки; б) схема установки: 1 – ВЧ-генератор; 2 – электроды (ВЧ-электрод – 1 шт.; заземленный электрод – 2 шт.); 3 – вакуумная камера; 4 – система откачки воздуха с вакуумными насосами, арматурой для создания и поддержания рабочего давления в вакуумной камере; 5 – крышка вакуумной камеры; 6 – система подачи рабочих газов; 7 – система управления, обеспечивающая работу установки в автоматическом и ручном режимах; 8 – система охлаждения, включающая станцию охлаждения с драйкулером; 9 – диагностический комплекс; 10 – обрабатываемый материал

Режим плазменной обработки регулировался изменением параметров в следующих пределах: расход газа (G) 10 – 50 г/с; мощность разряда (W_p) 2 кВт;

давление в рабочей камере (P) 19,3 – 20,1 Па; время обработки до 20 мин при температуре процесса 25-32 °С. В качестве плазмообразующего газа использовался воздух.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены графические зависимости краевого угла смачивания от времени высокочастотной низкотемпературной плазменной обработки древесных образцов.

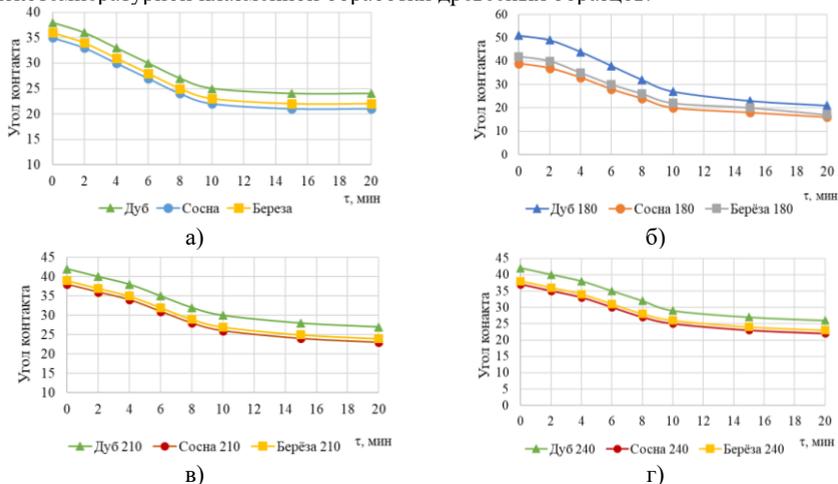


Рис. 5. Влияние времени плазменной обработки на угол контакта поверхности древесины: а – контрольная; б – предварительная термическая модификация при 180 °С; в – предварительная термическая модификация при 210 °С; г – предварительная термическая модификация при 240 °С

Для проверки разработанной математической модели на адекватность были проведены расчеты по определению текущего количества С-С связей в поверхностном нанослое древесины в процессе воздействия на материал высокочастотной низкотемпературной плазмы (рис. 6).

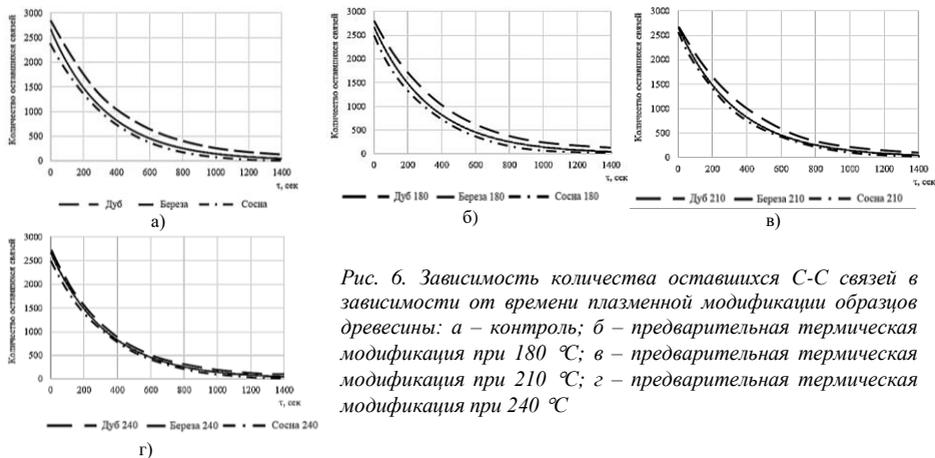


Рис. 6. Зависимость количества оставшихся С-С связей в зависимости от времени плазменной модификации образцов древесины: а – контроль; б – предварительная термическая модификация при 180 °С; в – предварительная термическая модификация при 210 °С; г – предварительная термическая модификация при 240 °С

Из графиков, представленных на рисунке 6 видно, что количество оставшихся С-С связей стремительно падает первые 10 мин для всех образцов, затем падение незначительное. Это говорит о том, что время высокочастотной плазменной обработки в течение 10 мин достаточно для модификации поверхности и образования функциональных групп, что подтверждается экспериментальными данными изменения краевого угла смачивания, представленными на рисунке 5, из которых видно существенное падение угла контакта в первые 10 мин обработки. Последующее воздействие на материал высокочастотной низкотемпературной плазмы вызывает не столь значительные изменения смачиваемости. Таким образом, можно говорить об адекватности предложенной математической модели и возможности её использования для предварительных расчётов исследуемого процесса.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований свойств композиционных материалов, созданных на основе древесного наполнителя, прошедшего двухстадийную модификацию. В качестве композиционного материала были выбраны клееная фанера (рис. 7а) и древесно-полимерный композит (ДПК) (рис. 7б), а в качестве связующего, соответственно, использованы КМФ смола и полиэтилен.



а) б)
Рис. 7. Исследуемые образцы:
а – образцы клееной фанеры;
б – образцы ДПК

На рисунке 8 представлены результаты исследования влияния температуры термической модификации и времени плазменной обработки древесного шпона на предел прочности при сдвиге по клеевому соединению (а) и на предел прочности при изгибе (б). Установлено, что плазменная обработка привела к увеличению прочности склеивания всех образцов фанеры.

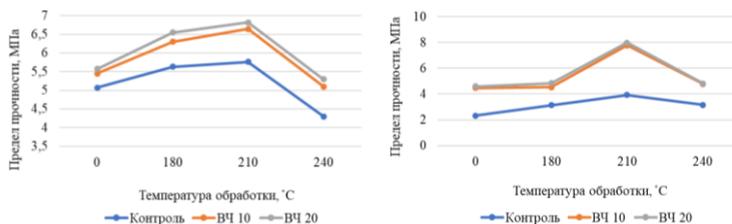


Рис. 8. Влияние температуры термической модификации и времени плазменной обработки древесного шпона на: а – предел прочности при сдвиге по клеевому соединению; б – предел прочности при изгибе

Для проведения исследований по определению свойств древесно-полимерных композитов (ДПК) использовались древесные опилки. Термическая обработка опилок осуществлялась при 180, 210 и 240 °C; последующая ВЧ плазменная обработка по указанным выше режимам в течение 10 мин. После обработки опилки доизмельчались на роторно-ситовом дисмембраторе до состояния древесной муки. Связующим веществом при изготовлении ДПК был выбран полиэтилен высокого давления (ПВД). Для исследования свойств ДПК были получены древесно-наполненные образцы с 30, 40, 50, 60, 70 %-ной концентрацией наполнителя.

Для определения твёрдости полученных образцов применяли методику

определения твердости по Шору D согласно ГОСТ 24621-2015. Было выявлено, что ВЧ плазменная обработка оказывает незначительное влияние на увеличение твердости древесно-полимерных композитов.

Для определения прочностных характеристик полученного композита использовалась разрывная машина. Испытания производились согласно ГОСТ 25.601-80. Влияние концентрации и параметров обработки представлены на рисунке 9. Из графика видно, что наибольшей прочностью обладают образцы, прошедшие термическую модификацию при 180 и 210 °C и последующую ВЧ плазменную обработку.

При определении показателя текучести расплава было выявлено, что высокочастотная плазменная обработка не оказывает значительного влияния на величину ПТР.

Ударная вязкость древесно-полимерных композитов определялась на маятниковом копре согласно ГОСТ 19109-2017 по Изоду (рис. 10) и Шарпи без надреза. Из рисунка 10 видно, что образцы, прошедшие двухступенчатую обработку, имеют наивысшую ударную вязкость по Изоду. Исследования ударной вязкости по Шарпи показали аналогичные результаты.

Исходя из экспериментальных данных определения физико-механических свойств ДПК можно сделать вывод, что высокочастотная плазменная обработка позволяет значительно увеличить предел прочности при растяжении и ударную вязкость, что объясняется повышением адгезии между матрицей и наполнителем.

В пятой главе представлены рекомендации по применению предложенной технологии, её экономическое обоснование, а также потенциал ее дальнейшего развития.

В результате проведенных экспериментальных исследований было выявлено, что двухступенчатый способ обработки является целесообразным, в связи с чем следующей задачей было определение рациональных сфер использования разработанной технологии модификации древесины. При этом анализ показал, что вследствие достаточно высоких энергозатрат на процесс ВЧ плазменной обработки, ее использование может быть рациональным только в производстве изделий из древесины с высокой добавленной стоимостью. Такими изделиями, в частности, могут быть музыкальные инструменты, а также большепролетные конструкции. В этой связи была поставлена задача рассмотреть влияние ТМ и ВЧ на акустические свойства древесины как сырья для музыкальных инструментов, а также исследовать несущую способность клееных большепролетных конструкций, созданных по разработанной технологии модификации.

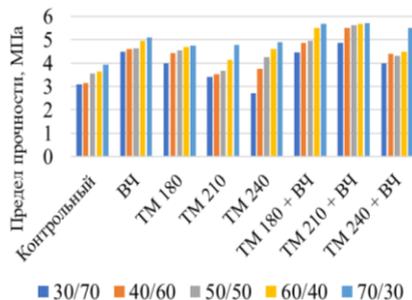


Рис. 9. Влияние концентрации и параметров обработки на прочность при растяжении полученных композитов

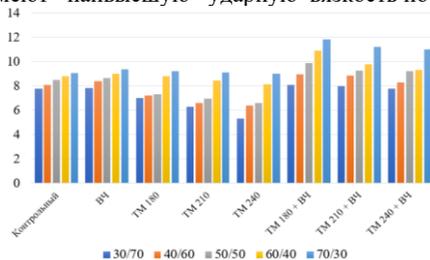


Рис. 10. Влияние концентрации наполнителей и параметров обработки древесины на ударную вязкость композита по Изоду

Для исследования воздействия предварительной термической модификации и последующей плазменной обработки на акустические свойства древесины были изготовлены образцы из сосны $12,5 \times 25 \times 350$ мм. Для расчета акустической константы был выбран метод вибраций, с целью реализации которого была разработана экспериментальная установка (рис. 11).

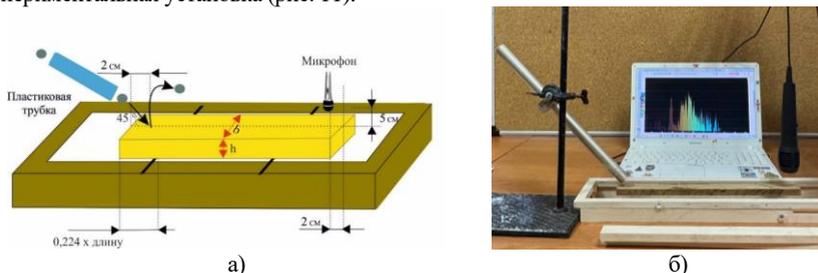


Рис. 11. Схема проведения испытания на определение акустических свойств обработанной древесины (а); внешний вид установки для проведения испытания на определение акустических свойств обработанной древесины (б)

Результаты эксперимента приведены на рисунке 12. Из графика видно, что акустическая константа возрастает. Это объясняется снижением плотности ТМ древесины, увеличением скорости звука внутри материала, удельного акустического импеданса, коэффициента звукового излучения и эффективности преобразования звука, что в совокупности приводит к повышению константы.

Исходя из представленного графика (рис. 12) можно сделать вывод, что инструменты, производимые из данного материала, будут обладать лучшими свойствами, нежели из обычной древесины.

Для исследования влияния предварительной термической модификации и последующей высокочастотной плазменной обработки на эксплуатационные свойства древесной клеёной конструкции, а именно деревянной клееной фермы, определялись прочностью на поперечный изгиб и относительная проникающая способность к огнестойким составам.

Для определения прочности при поперечном изгибе было подготовлено 18 образцов размером $150 \times 30 \times 10$ мм. Образцы разделялись на три группы: 1) контрольная (6 шт.); 2) термически обработанная при 210°C (6 шт.); 3) термически обработанная при 210°C и обработанная плазмой в течение 10 мин (6 шт.). Из них изготавливались трёхслойные клеёные конструкции на основе карбамидоформальдегидного клея, которые впоследствии разделялись на сухие (24 часа сушки в сушильном шкафу) и увлажнённые (72 часа в эксикаторе). Испытания на изгиб проводились на испытательной машине с опорами.

Влияние параметров обработки на прочностные свойства клеёной деревянной конструкции представлено на рисунке 13. Видно, что образцы, подвергшиеся только

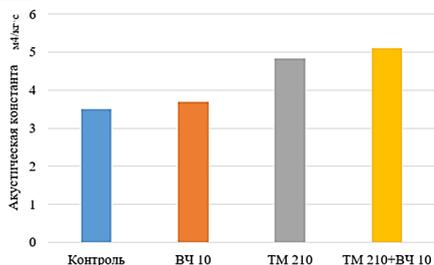


Рис. 12. Влияние способа обработки на акустическую константу древесины

термической модификации, обладают наименьшей прочностью. Высокочастотная плазменная обработка улучшает прочностные характеристики благодаря сшиванию полимерных цепей и заполнению микротрещин.

Наибольшую прочность среди увлажненных образцов имеют те, что прошли термическую модификацию и последующую ВЧ плазменную обработку.

Исходя из результатов, представленных на рисунке 13 установили, что клееная конструкция из необработанной древесины при использовании в сухих условиях имеет наивысшие характеристики, однако увлажнение значительно снижает несущую способность конструкций, и она становится сопоставимой с пределом прочности конструкции из клееных ТМ образцов. В то же время двухступенчатая обработка позволяет повысить предел прочности на изгиб даже увлажненной конструкции.

Для оценки эффективности пропитки древесины огнезащитным составом использовались бруски берёзы размером 30х70х20 мм.

Итоговые результаты проведённых исследований в виде оценки относительной проникающей способности защитного средства представлены в таблице 2. Из нее видно, что контрольный образец имеет самую низкую впитывающую способность. Образцы ТМ показывают средние значения пропиточных коэффициентов ввиду повышения пористости. Наилучшую проникающую способность демонстрируют образцы с комбинированной обработкой (ТМ+ВЧ), так как двухступенчатая обработка увеличивает пористость и улучшает смачиваемость древесины.

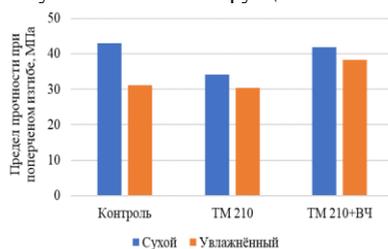


Рис. 13. Влияние параметров обработки на прочность при поперечном изгибе деревянной клеёной конструкции

Таблица 2 – Оценка относительной проникающей способности защитного средства для различных методов предварительной обработки древесины

№ группы	1	2	3	4
Метод обработки образцов	Контрольный	ТМ	ВЧ	ТМ+ВЧ
Пропиточный коэффициент по поглощению	0,41	0,57	0,81	0,93
Пропиточный коэффициент по глубине проникновения	0,51	0,64	0,94	0,97

Проведенный технико-экономический анализ подтвердил эффективность внедрения для производства клееного бруса ВЧ плазменной обработки термически модифицированной древесины, благодаря которой улучшаются технические характеристики, такие как влагостойкость, огнестойкость и максимальная нагрузка. Увеличение срока службы бруса сокращает эксплуатационные издержки, делая методы обработки экономически выгодными. Несмотря на более высокую начальную цену, экономия на обслуживании за 40 лет достигает более 189 000 рублей на 1 м³ бруса. Чистая экономия за весь срок службы составляет более 170 000 руб/м³, что подтверждает экономическую эффективность предлагаемого метода.

В приложении представлены расчёты математической модели процесса обработки древесины высокочастотной плазмой воздуха, акт внедрения, дипломы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Доказано, что высокочастотная низкотемпературная плазменная обработка термически модифицированной древесины снижает краевой угол смачивания на 46 %, увеличивает коэффициент поглощения на 128,3 % и глубину проникновения жидкости на 90,20 %.

2. Разработана математическая модель воздушно-плазменной обработки древесины, основанная на молекулярной динамике и данных ИК и рентгеновской спектроскопии, определяющая количество разрушаемых С-С связей, образующих новые функциональные группы в зависимости от продолжительности воздействия, мощности разряда, плотности ионного тока, энергии разряда, энергии ионов и породы древесины.

3. Предложена двухстадийная обработка древесины с предварительной термической модификацией и последующей поверхностной плазменной обработкой. Определены оптимальные режимы двухступенчатой модификации древесины: на первой стадии термическая модификация конвективным методом при 210 °С, на второй – плазменная обработка при мощности 2 кВт, плотности ионного тока 0,83 А/м² в течение 10 мин, что снижает краевой угол смачивания в 1,85 раза.

4. Подтверждена эффективность плазменной обработки в производстве композитов: в древесно-полимерных композитах она повышает прочность при растяжении на 83,6 % и ударную вязкость на 123,8 %; в клееных изделиях улучшает прочность при сдвиге по клеявым соединениям на 22,7 % и прочность на изгиб клееного бруса на 66,6 % по сравнению с контрольными образцами.

5. Установлено, что термическая модификация при 210 °С и плазменная обработка в течение 10 мин увеличивают акустическую константу древесины в 1,38 раза.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования. Дальнейшие перспективы развития предложенной технологии предварительной термической модификации и последующей высокочастотной низкотемпературной плазменной обработки растительного сырья видятся в разработке математической модели расчёта времени плазменной обработки не только целлюлозы, но и других составляющих древесины, таких как лигнин, гемицеллюлоза, а также внедрение данной технологии в производство и усовершенствование других целлюлозосодержащих материалов.

Основные обозначения: КДМ – композиционный древесный материал; НТП – низкотемпературная плазма; УФ – ультрафиолетовый; КФС – карбамидоформальдегидная смола; ФФС – фенолоформальдегидная смола; ФРФ – фенолорезорцино-формальдегидный; ТМД – термомодифицированные древесные материалы; m – масса, кг; ρ – плотность, кг/м³; V – объем, м³; W – рабочая влажность, кг/кг.

Индексы: ср – среда; воз – воздух; цел – целлюлоза; мат – материал; дин – динамичный; г – газ; пов – поверхность; max – максимальный; min – минимальный.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. Хасаншин Р.Р. Применение низкотемпературной плазменной обработки для повышения механических показателей клееных конструкций / Р.Р. Хасаншин, К.В. Саерова, Н.Р. Галяветдинов, Р.В. Салимгареева, Ш.Р. Мухаметзянов, Р.Р. Сафин // *Деревообрабатывающая промышленность.* – 2021. – №4. – С. 67-74.

2. Саерова К.В. Исследование механических свойств полимерного композита, полученного двухступенчатой обработкой древесного наполнителя / К.В. Саерова, Ш.Р. Мухаметзянов, Р.Р. Хасаншин // *Деревообрабатывающая промышленность.* – 2022. – № 3. – С. 51-57.

3. Гирфанов А.А. Влияние методов предварительной обработки поверхности древесины на проникающую способность огнезащитного средства / А.А. Гирфанов, Р.Р. Сафин, К.В. Саерова, А.В. Сафина // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2023. – № 4. – С. 11-19.

Статья в научном издании, сборнике научных трудов и материалов конференций, индексируемом базой данных Scopus:

4. Galyavetdinov N. Influence of the matrix type on the physical and mechanical parameters of the WPC // N. Galyavetdinov, R. Safin, K. Saerova / *E3S Web of Conferences*. – 2023. – P. 09003.

Труды в прочих изданиях:

5. Ефремов Д.Г. Способы улучшения древесины методами модификации / Д.Г. Ефремов, К.В. Саерова // *Сборник научных статей по материалам V Международной научно-практической конференции*. – Уфа. – 2021. – С. 13-15.

6. Прокопьев А.А. Древесина как наполнитель для композиционных материалов, способы ее предварительной обработки, / А.А. Прокопьев, К.В. Саерова, Р.Р. Сафин // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. – 2022. – № 62. – С. 321-324.

7. Саерова К.В. Изменение краевого угла смачивания древесины бука в зависимости от времени и способа обработки / К.В. Саерова, Г.Н. Мухаметзянова, А.А. Прокопьев // *Актуальные проблемы лесного комплекса*. – 2022. – № 62. – С. 328-331.

8. Саерова К.В. Смачивание модифицированной древесины с целью определения гидрофобности и гидрофильности древесных ламелей / К.В. Саерова, Д.Г. Ефремов, Я.Д. Погодина, Г.Н. Мухаметзянова // *Сборник научных статей по материалам X Международной научно-практической конференции*. – Уфа. – 2023. – С. 36-39.

9. Саерова К.В. Изменение прочностных характеристик древесных образцов, прошедших термическую и плазменную обработку, к клеевому соединению / К.В. Саерова, Ш.Р. Мухаметзянов, Д.Г. Ефремов // *Труды XXVI Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» («ВИП-2023»)*. – Москва – 2023. – С. 199-202.

10. Саерова К.В. Определение предела прочности на растяжение древесных образцов, прошедших двухступенчатую обработку / К.В. Саерова Ш.Р. Мухаметзянов // *Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки* – Казань. – 2023. – С. 364-368.

11. Гирфанов А.А. Комплексный подход к формированию огнезащитных покрытий для деревянных строительных конструкций / А.А. Гирфанов, Р.Р. Сафин, К.В. Саерова, А.В. Сафина // *Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции*. – Красноярск. – 2023. – С. 3-7.

12. Валеева А.Р. Исследование реологических свойств композита на основе полиэтилена высокого давления и древесной муки / А.Р. Валеева, А.Д. Алексеева, К.В. Саерова // *Материалы VII Всероссийской студенческой научно-практической конференции «Интенсификация тепломассообменных процессов, промышленная безопасность и экология»* – Казань. – 2024. – С. 241-242.