

На правах рукописи



Черемных Владимир Алексеевич

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ ИЗДЕЛИЯ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ
ХВОЙНЫХ ПОРОД, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМОЙ**

2.1.5 – Строительные материалы и изделия

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет» (ФГБОУ ВО ТГАСУ)

Научный руководитель: **ВОЛОКИТИН Геннадий Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Официальные оппоненты: **САФИН Руслан Рушанович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

СТОРОДУБЦЕВА Тамара Никаноровна, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

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

Защита состоится «15» декабря 2025 г. В 15-00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.414.01 в Томском государственном архитектурно-строительном университете по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, корпус 2, зал заседаний ученого совета (ауд. 303/2); тел.: 8-(3822) 659952.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского государственного архитектурно-строительного университета по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, и на сайте <https://tsuab.ru/departments/council/2025Cheremnih/Диссертация%20Черемных%20В.А1..pdf>

Автореферат разослан «__» _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Копаница Н.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Ежегодный рост темпов гражданского и промышленного строительства отражается в виде наращивания объемов производства строительных изделий и в возрастании спроса на них. Одним из материалов для производства строительных изделий с повышенным спросом является древесина. Повышение стойкости древесины к неблагоприятным внешним факторам с целью увеличения долговечности строительных изделий при одновременном сохранении экологичности древесины является в настоящее время актуальной задачей.

Одним из методов повышения долговечности древесины с сохранением экологичности является ее термомодификация. С учетом недостатков термомодификации древесины в виде значительных временных и финансовых затрат исследования по определению новых способов термической обработки древесины с целью повышения ее стойкости к неблагоприятным внешним факторам являются актуальными. Одним из перспективных способов обработки древесины является обработка потоком низкотемпературной плазмы. Исследования по определению эффективности модификации древесины путем обработки потоком низкотемпературной плазмы с целью повышения долговечности изделий из древесины являются актуальными.

Диссертационная работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект FEMN-2023-0003.

Степень разработанности темы исследования. Исследованию влияния различных способов модификации на свойства древесины посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых, в том числе: М.В. Гринберга, А.М. Айзенштадта, А.В. Пономарева, Р.Г. Сафина, В.Ю. Чернова, Е.Н. Покровской, В.А. Шамаева, С.И. Рощиной, С. Hill, D. Sandberg, G. Mantanis, A. Becker, R. Rowell, P. Esteves и др. Несмотря на то, что было выполнено множество исследований на эту тему, до сих пор остается ряд нерешенных вопросов, требующих дальнейшего изучения. Одним из таких вопросов является разработка метода модификации, сохраняющего экологичность древесины и не ограничивающего области ее применения.

Решением обозначенного вопроса может стать модификация древесины потоком низкотемпературной плазмы. Значительный вклад в исследования, направленные на использование низкотемпературной плазмы для обработки различных материалов, внесли Н.Г. Корсак, А.С. Быков, В.С. Резник, Ю.А. Титов, Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, Т.Ф. Романюк, В.А. Власов, В.К. Козлова, Г.А. Куликова, В.В. Лопатин, G. Avramidis, P.P. Хасаншин, S. Gerullis, В.И. Онегин, P.P. Сафин, В.С. Бессмертный и др. Проведенные исследования показывают высокую

эффективность применения потока низкотемпературной плазмы для обработки различных материалов. Однако работы, направленные на исследование влияния потока низкотемпературной плазмы на структуру и свойства древесины, в большинстве своем затрагивают высокочастотную низкотемпературную плазму. Такая обработка позволяет увеличить адгезию и смачиваемость древесины, что положительно отражается на склеивании древесных материалов при изготовлении различных плит. Исследования обработки древесины низкотемпературной плазмой с целью повышения ее стойкости к неблагоприятным внешним факторам в литературе практически не встречаются.

Объект исследования – строительные изделия из древесины хвойных пород.

Предмет исследования – структура и свойства изделий из древесины хвойных пород после обработки низкотемпературной плазмой.

Цель работы: разработка научно обоснованных технологических решений модификации строительных изделий из древесины хвойных пород низкотемпературной плазмой.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Исследование физико-химических процессов, протекающих в приповерхностном слое древесины при воздействии потоком низкотемпературной плазмы.
2. Численный расчет распределения температурных полей в древесине при воздействии потоком низкотемпературной плазмы и валидация полученных данных с экспериментальными результатами.
3. Разработка экспериментального стенда для обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы.
4. Исследование свойств древесины после обработки низкотемпературной плазмой; влияния плазменной обработки на свойства поверхности древесины.
5. Разработка технологии обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы и установление критериев качества получаемого на древесине покрытия.
6. Техничко-экономическое обоснование эффективности обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы.

Научная новизна:

- 1) Установлено, что при воздействии на древесину хвойных пород потоком низкотемпературной плазмы с количеством теплоты $\sim 10 - \sim 30$ кДж в приповерхностной зоне происходит формирование модифицированного защитного слоя толщиной 0,2–2,0 мм.
- 2) Установлен механизм модификации поверхности древесины хвойных пород низкотемпературной плазмой, заключающийся в

термодеструкции гемицеллюлоз и лигнина с одновременной миграцией природных смол на поверхность и формированием нового композиционного слоя. Параметрами, обеспечивающими протекание данного процесса, являются удельный тепловой поток $1,0\text{--}3,0 \cdot 10^6$ Вт/м² и скорость обработки $0,03\text{--}0,12$ м/с.

3) Установлен комплексный характер модификации приповерхностного слоя древесины, проявляющийся в синергетическом улучшении ключевых эксплуатационных свойств: гидрофобности (в 1,5–1,8 раза), био-стойкости (в 1,5–2 раза), износостойкости (в 1,5–2 раза), стойкости к воспламенению (в 2–3 раза), а также к снижению водопроницаемости в 2–4 раза, при этом паропроницаемость и объёмные механические характеристики материала сохраняются на исходном уровне.

Теоретическая значимость работы:

Получены новые данные о формировании приповерхностного слоя древесины хвойных пород при воздействии потоком низкотемпературной плазмы и влиянии параметров плазменного воздействия на структуру и свойства этого слоя.

Дополнены научные представления о возможностях направленного изменения физико-химических свойств строительных изделий из древесины с целью повышения их биостойкости и долговечности при эксплуатации в условиях воздействия окружающей среды.

Практическая значимость работы:

Разработаны технологические решения и технологический регламент на производство работ по обработке древесины хвойных пород потоком низкотемпературной плазмы.

Разработана математическая модель взаимодействия потока низкотемпературной плазмы с поверхностью древесины, позволяющая варьировать параметры обработки и определять влияние этих параметров на характеристики обработанного слоя древесины.

Разработано оборудование для обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы.

Новизна предложенных технических решений защищена патентами РФ № 212821, № 2822045 и № 226213.

Изготовлена опытная партия древесины, модифицированной посредством обработки потоком низкотемпературной плазмы, при величине удельного теплового потока $1,8 \cdot 10^6$ Вт/м² и скорости обработки $0,06$ м/с, с золотисто-коричневым цветом поверхности, величиной покрытия $1,0$ мм, водопроницаемостью ниже в 3,5 раза, биостойкостью выше в 1,7 раза и износостойкостью выше в 2 раза, по сравнению с исходной древесиной.

Результаты экспериментальных исследований и теоретические положения, полученные при выполнении научно-квалификационной работы, применяются в учебном процессе кафедрой Прикладной механики и материаловедения Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Методология диссертационного исследования основана на рабочей гипотезе, заключающейся в том, что при воздействии потоком низкотемпературной плазмы в приповерхностном слое происходит изменение структуры, связанное с термодеструкцией древесины, в результате чего повышается био- и огнестойкость древесины, а также снижаются ее смачиваемость и водопроницаемость. При этом за счет короткого времени воздействия и малого процентного соотношения древесины с измененной структурой к исходной механические характеристики такой древесины не снижаются.

Работа включает в себя этапы установления процессов, протекающих при термическом воздействии на древесину, теоретического определения параметров плазменной обработки древесины, разработки лабораторного стенда для плазменной обработки древесины, подготовки и обработки образцов древесины хвойных пород, комплексных исследований структуры и свойств обработанной древесины, разработки оборудования и технологической схемы обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы.

Методы исследования. Для исследования свойств древесных материалов, а также процессов, протекающих при обработке древесины потоком низкотемпературной плазмы, использовались следующие методы анализа с применением аппаратуры: рентгенофазовый (Shimadzu XRD 6000 в $\text{CuK } \alpha$ -излучении), дифференциально-термический (DERIVATOGRAPH Q-1500 D), сканирующая электронная микроскопия (система с электронным и фокусированным ионным пучками Quanta 200 3D). Физико-механические свойства древесины определялись согласно требованиям нормативных документов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Положение о граничных значениях подводимой к древесине теплоты, способствующей формированию модифицированного слоя, а именно количество подведенной теплоты ~ 10 – $\sim 30 \cdot 10^3$ Дж, определяющееся величиной удельного теплового потока $1,0$ – $3,2 \cdot 10^6$ Вт/м² и скоростью обработки $0,03$ – $0,12$ м/с, способствует формированию в приповерхностной зоне древесины модифицированного слоя толщиной $0,2$ – $2,0$ мм.

2. Положение о зависимости свойств обработанных изделий из древесины от количества теплоты, подведенной к древесине в процессе

обработки, а именно свойства материалов из древесины зависят от толщины обработанного слоя и степени термодеструкции древесины. Слой толщиной 0,2–2,0 мм снижает водопроницаемость поверхности древесины в 2–4 раза, повышает гидрофобность в 1,5–1,8 раза, биостойкость – в 1,5–2 раза и износостойкость поверхности – в 2 раза, при этом паропроницаемость и механические характеристики древесины не меняются.

Достоверность результатов исследования основывается на многочисленных экспериментальных данных с применением современных методов исследования, использованием нормативных документов, сертифицированного и поверенного научно-исследовательского оборудования РФА (Shimadzu XRD 6000), ДТА (DERIVATOGRAPH Q-1500 D), СЭМ (Quanta 200 3D) и др.

Внедрение результатов исследования. Результаты научных исследований внедрены при изготовлении изделий из древесины, модифицированной низкотемпературной плазмой на технологической линии ООО «Тарная база».

Разработан технологический регламент на производство работ по обработке древесины хвойных пород потоком низкотемпературной плазмы.

Полученные при выполнении научно-квалификационной работы данные используются кафедрой Прикладной механики и материаловедения Томского государственного архитектурно-строительного университета при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство», профиль «Материалы для строительства и эксплуатации объектов нефтегазовой отрасли».

Личный вклад автора заключается в непосредственном участии в постановке цели и задач научного исследования, разработке оборудования по плазменной обработке, проведении расчетных и экспериментальных исследований по определению характеристик древесины, обработке результатов исследований, разработке технологических основ обработки изделий из древесины потоком низкотемпературной плазмы, анализе, интерпретации и подготовке полученных результатов к публикации. Анализ, интерпретация полученных результатов и формулирование выводов проводилось совместно с научным руководителем.

Апробация работы. Результаты настоящей диссертационной работы обсуждались на Российско-Казахстанской молодежной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии» (г. Барнаул, 2021, 2022, 2024); 11-м Международном онлайн-симпозиуме «Материалы во внешних полях» (г. Новокузнецк, 2022); Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых (г. Томск, 2022, 2023, 2024); Всероссийской научно-практической конференции,

посвященной 40-летию создания Инженерно-строительного института (г. Красноярск, 2022); Международной конференции «Газоразрядная плазма и синтез наноструктур» (г. Казань, 2022, 2023, 2024); XIII Международной научно-практической конференции «Инвестиции, градостроительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения» (г. Томск, 2023); Всероссийской научной конференции с международным участием «Енисейская теплофизика» (г. Красноярск, 2023, 2025); XII Всероссийской научной конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», посвященной 55-летию НИИ ПММ ТГУ и 145-летию Томского государственного университета (ФППСМ-XII) (г. Томск, 2023); Международной конференции «Физическая Мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии» (г. Томск, 2024); XXII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2025).

Публикации. По материалам выполненных исследований опубликовано 26 научных работ, в том числе 4 статьи, рекомендованных ВАК. Техническая новизна защищена 3 патентами РФ № 212821, № 2822045 и № 226213.

Объем диссертационного исследования. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 178 наименований и 5 приложений. Работа изложена на 186 страницах текста, содержит 54 рисунка и 57 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследований, определены объект и предмет исследования, цели и задачи работы. Описана практическая ценность полученных результатов. Представлена научная новизна и сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Строительные изделия и конструкции из древесины. Особенности древесины хвойных пород. Существующие методы защиты и модификации свойств древесины» описаны основные виды строительных изделий и конструкций из древесины. Рассмотрены ключевые особенности строения и свойств древесины наиболее часто применяющихся в строительстве хвойных пород – сосны, лиственницы, ели. Выделены факторы, влияющие на свойства древесины.

Проведен анализ наиболее часто использующихся методов защиты древесины от воздействия неблагоприятных факторов. Выполнен литературный обзор работ, описывающих применение обработки потоком низкотемпературной плазмы строительных материалов и сделан вывод о

возможности применения данного метода для обработки строительных изделий из древесины.

Во второй главе «Характеристики исходных материалов. Методы исследования и методология работы» представлено описание характеристик исходных материалов, методов исследования и методологии работы.

Исследуемая древесина хвойных пород, наиболее часто применяющихся в строительстве: сосна, ель и лиственница – отобрана согласно нормативным документам из зрелых деревьев Томской области и охарактеризована по физико-механическим, биологическим и огнестойким свойствам. Лиственница выделяется высокой прочностью и влагостойкостью, ель – наибольшей гигроскопичностью, сосна – высоким содержанием смолы.

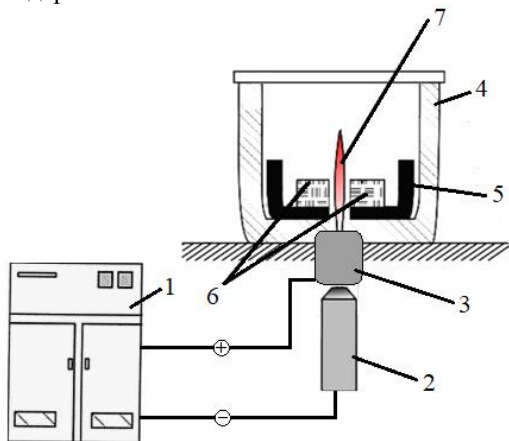


Рисунок 1 – Схема стенда для обработки поверхности изделий из древесины потоком низкотемпературной плазмы: 1 – источник питания; 2 – плазмотрон; 3 – анодный узел; 4 – камера концентрации тепловых потоков; 5 – направляющие для подачи обрабатываемых изделий; 6 – обрабатываемые изделия; 7 – плазменный поток

Для обработки образцов разработан лабораторный стенд (рисунок 1) с использованием плазменного генератора ВПР-410, обеспечивающего стабильность и управляемость процесса. Описаны методы проведения исследований и методология работы. Для анализа влияния плазменной обработки применены комплексные методы: оптическая и сканирующая электронная микроскопия (Quanta 200 3D) для изучения микроструктуры и морфологии поверхности; колориметрия (RAL ColorReader) для оценки цвета; механические испытания: сжатие (ГОСТ 16483.10–73), изгиб

(ГОСТ 16483.3–84), прочность клеевых соединений (ГОСТ 33120–2014); определение износостойкости (CSEM TRIBOMETR), водо- и паропроницаемости (ГОСТ Р 70748–2023, ГОСТ 25898–2020); биологическая стойкость (ГОСТ 9.050–2021); огнезащитная эффективность (ГОСТ Р 53292–2009); комплексный термический анализ (DERIVATOGRAPH Q-1500 D).

В третьей главе «Математическое моделирование процесса воздействия потока низкотемпературной плазмы на поверхность древесины» представлены результаты численного расчета процесса взаимодействия потока низкотемпературной плазмы с поверхностью древесины. Для определения режимов плазменной обработки древесины предложена комплексная математическая модель, описывающая термическое разложение древесины под воздействием потока низкотемпературной плазмы. Модель учитывает анизотропность древесины, многостадийность пиролиза и динамику теплопереноса в условиях интенсивного нагрева. Основой для разработки модели послужили экспериментальные данные термогравиметрического анализа образцов сосны (рисунок 2), позволившие выделить четыре ключевые стадии процесса: испарение легколетучих компонентов

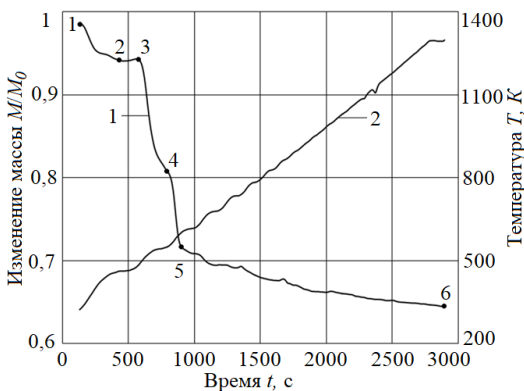


Рисунок 2 – Термогравиметрические кривые относительного изменения массы образца сосны (1) и изменения температуры (2) в среде аргона

(участок 1–2) при температурах ниже 430 К, две последовательные стадии пиролиза с образованием промежуточных продуктов (участок 3–4) и коксика (участок 4–5) в диапазоне 430–850 К, а также медленное разложение коксика (участок 5–6) при более высоких температурах. Кинетика каждой стадии описывается законом Аррениуса с параметрами, определенными путем сопоставления расчетных и экспериментальных кривых потери массы.

Особое внимание уделено высокой скорости нагрева (до 10^6 Вт/м²), характерной для плазменной обработки, что отличает данное исследование от работ, посвященных медленному пиролизу в лесохимии или пожарной безопасности.

Для описания теплового режима древесины при плазменной обработке разработана система уравнений, включающая уравнение энергии с эффективным коэффициентом теплопроводности, уравнения баланса массы для шести компонентов (легколетучие вещества, твердый каркас, промежуточные продукты пиролиза, коксик, зола и газообразные продукты) и граничные условия, учитывающие конвективный теплообмен с плазменной струей, излучение поверхности и горение выделяющихся

газов. Численное решение системы выполнено методом конечных объемов с использованием неявной схемы, обеспечивающей устойчивость расчетов при больших градиентах температуры.

Результаты расчетов демонстрируют четкую зависимость глубины термического воздействия от количества подведенной к древесине теплоты, которая зависит от параметров обработки. Так, увеличение мощности плазмотрона с 15,6 до 58,8 кВт при скорости перемещения струи 3–12 см/с при-

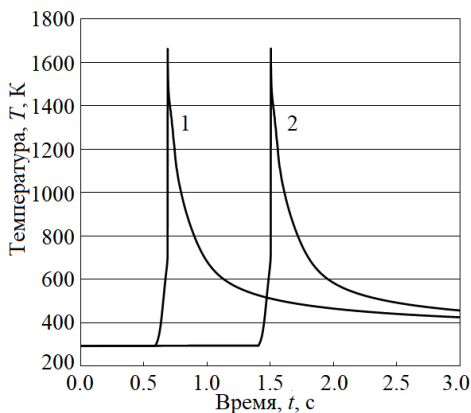


Рисунок 3 – Расчетная температура поверхности материала в зависимости от времени:

1 – в точке $x = 0,05$ м;

2 – в точке $x = 0,1$ м

водит к росту глубины деструкции с 0,02 до 1,23 мм, а степень разложения твердого каркаса возрастает с 0 % до 2,65 %. Анализ температурных полей показал, что максимальный прогрев поверхности локализован в зоне контакта с потоком плазмы, однако за счет теплопроводности и догорания продуктов пиролиза после прохождения струи происходит не резкое, а плавное снижение температуры (рисунок 3).

Полученные результаты имеют практическую значимость для оптимизации режимов плазменной обработки древесины, позволяя

прогнозировать глубину модификации поверхности при заданных параметрах струи.

В четвертой главе «Исследование влияния обработки потоком низкотемпературной плазмы на свойства древесины» представлены результаты комплексного исследования влияния режимов обработки потоком низкотемпературной плазмы на структуру и основные свойства древесины хвойных пород – сосны, лиственницы, ели. Оптическая и сканирующая электронная микроскопия показала, что плазменная обработка устраняет ворсистость поверхности древесины, образуя гладкий рельеф (рисунки 4, 5) с волнообразной структурой, обусловленной неоднородным термическим разложением ранней и поздней древесины (рисунок 6). На поверхности образуется углеродистый (обугленный) слой толщиной около 0,2 мм, который повышает износостойкость ~ в 2 раза. Цветовой градиент от чёрного к светло-жёлтому отражает стадии пиролиза древесины и глубину термического воздействия.

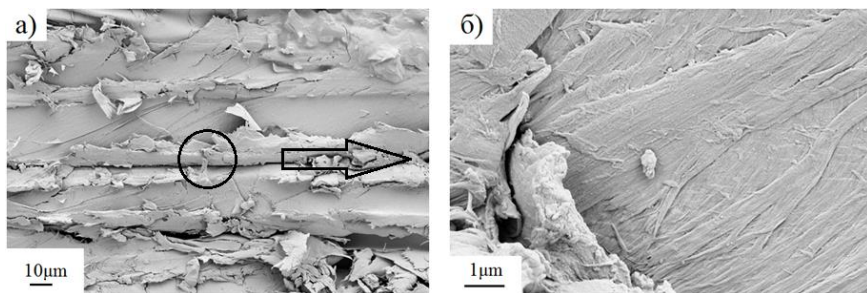


Рисунок 4 – Микрофотографии сканирующей электронной микроскопии поверхности древесины до обработки потоком низкотемпературной плазмы: *а* – снимок в масштабе 10 мкм; *б* – снимок в масштабе 1 мкм

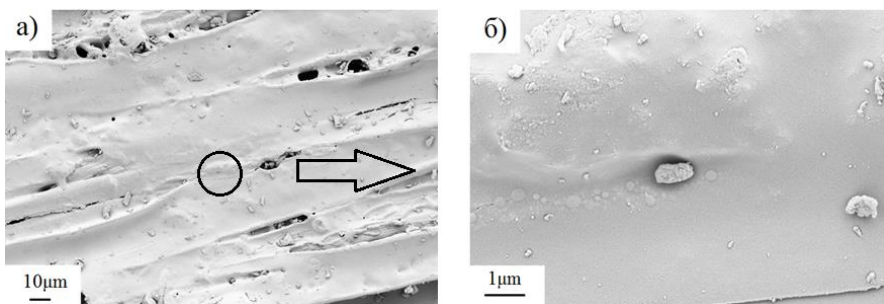


Рисунок 5 – Микрофотографии сканирующей электронной микроскопии поверхности древесины после обработки потоком низкотемпературной плазмы: *а* – снимок в масштабе 10 мкм; *б* – снимок в масштабе 1 мкм

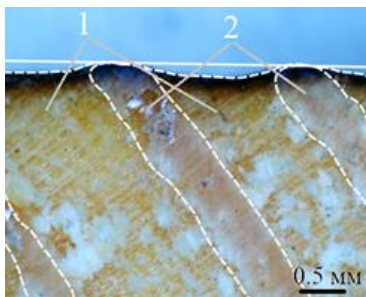


Рисунок 6 – Микрофотография среза образца из сосны после плазменной обработки: 1 – зона ранней древесины; 2 – зона поздней древесины;

Из-за возможного снижения механических характеристик, вследствие термического воздействия на древесину, проведены исследования влияния обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы на прочность при сжатии, изгибе и скалывании (прочность клеевого соединения) с целью установления возможности применения такой древесины в качестве конструктивных элементов. Определено, что плазменная обработка при исследованных режимах не снижает твердость древесины, а также ее

прочность при сжатии и скалывании (таблицы 1, 2). Обработка оказывает влияние на предел прочности при изгибе (таблица 3) образцов, изготовленных по размерам, указанным в стандарте на проведение испытания, однако при увеличении сечения и/или длины обрабатываемого изделия влияние на прочность отсутствует.

Таблица 1 – Механические характеристики образцов из сосны в зависимости от режима обработки

№	Удельный тепловой поток $q_{\max}$, Вт/м ²	Скорость обработки V , см/с	Количество теплоты Q , Дж	Деформация разрушения $\varepsilon_{\text{сж}}$, мм/мм	Предел прочности $\sigma_{\text{сж}}$, МПа
1	$1,1 \cdot 10^6$	9	6111	$0,017 \pm 0,003$	59 ± 3
2	$1,1 \cdot 10^6$	6	9166	$0,017 \pm 0,003$	60 ± 3
3	$1,5 \cdot 10^6$	6	12500	$0,017 \pm 0,003$	59 ± 3
4	$1,5 \cdot 10^6$	3	25000	$0,017 \pm 0,003$	60 ± 3
5	$1,8 \cdot 10^6$	6	15000	$0,017 \pm 0,003$	61 ± 3
6	$1,8 \cdot 10^6$	3	30000	$0,016 \pm 0,003$	60 ± 3
7	$2,8 \cdot 10^6$	6	23334	$0,017 \pm 0,003$	60 ± 3
8	$2,8 \cdot 10^6$	3	46666	$0,016 \pm 0,003$	59 ± 3
9	$3,2 \cdot 10^6$	6	26667	$0,017 \pm 0,003$	60 ± 3
10	$3,2 \cdot 10^6$	3	53334	$0,016 \pm 0,003$	59 ± 3

Таблица 2 – Механические характеристики образцов из сосны в зависимости от режима обработки при испытании прочности клеевого соединения

№	Удельный тепловой поток $q_{\max}$, Вт/м ²	Скорость обработки V , см/с	Количество теплоты Q , Дж	Деформация разрушения $\varepsilon_{\text{ск}}$, мм/мм	Предел прочности $\sigma_{\text{ск}}$, МПа
1	$1,1 \cdot 10^6$	9	6111	$0,11 \pm 0,03$	$1,9 \pm 0,3$
2	$1,1 \cdot 10^6$	6	9166	$0,11 \pm 0,03$	$1,9 \pm 0,3$
3	$1,5 \cdot 10^6$	6	12500	$0,12 \pm 0,03$	$1,9 \pm 0,3$
4	$1,5 \cdot 10^6$	3	25000	$0,14 \pm 0,03$	$1,9 \pm 0,3$
5	$1,8 \cdot 10^6$	6	15000	$0,13 \pm 0,03$	$1,9 \pm 0,3$
6	$1,8 \cdot 10^6$	3	30000	$0,14 \pm 0,03$	$1,8 \pm 0,3$
7	$2,8 \cdot 10^6$	6	23334	$0,14 \pm 0,03$	$1,9 \pm 0,3$

Продолжение таблицы 2

№	Удельный тепловой поток $q_{\max}$, Вт/м ²	Скорость обработки V , см/с	Количество теплоты Q , Дж	Деформация разрушения $\varepsilon_{\text{ск}}$, мм/мм	Предел прочности $\sigma_{\text{ск}}$, МПа
8	$2,8 \cdot 10^6$	3	46666	$0,15 \pm 0,03$	$1,8 \pm 0,3$
9	$3,2 \cdot 10^6$	6	26667	$0,14 \pm 0,03$	$1,9 \pm 0,3$
10	$3,2 \cdot 10^6$	3	53334	$0,15 \pm 0,03$	$1,8 \pm 0,3$

Таблица 3. Зависимость предела прочности при изгибе от параметров
плазменной обработки образцов из сосны

№	Удельный тепловой поток $q_{\max}$, Вт/м ²	Скорость обработки V , см/с	Количество теплоты Q , Дж	Предел прочности $\sigma_{\text{изг}}$, МПа
1	$1,1 \cdot 10^6$	9	6111	53 ± 5
2	$1,1 \cdot 10^6$	6	9166	53 ± 5
3	$1,5 \cdot 10^6$	6	12500	53 ± 5
4	$1,5 \cdot 10^6$	3	25000	52 ± 5
5	$1,8 \cdot 10^6$	6	15000	53 ± 5
6	$1,8 \cdot 10^6$	3	30000	51 ± 5
7	$2,8 \cdot 10^6$	6	23334	52 ± 5
8	$2,8 \cdot 10^6$	3	46666	50 ± 5
9	$3,2 \cdot 10^6$	6	26667	52 ± 5
10	$3,2 \cdot 10^6$	3	53334	50 ± 5

Полученные результаты связаны с малым количественным соотношением древесины с измененной, в результате обработки, структурой к исходной древесине. Такой эффект повторяется на всех рассмотренных породах древесины.

Далее оценивалось влияние плазменной обработки на свойства древесины, определяющие стойкость к неблагоприятным внешним факторам. Плазменная обработка способствует увеличению краевого угла смачивания до 86° для сосны (рисунок 6) и снижению водопроницаемости в 5 раз при $q = 3,2 \cdot 10^6$ Вт/м² (рисунок 7). Это обусловлено выходом смол и образованием углеродистого слоя. Паропроницаемость древесины после

обработки потоком низкотемпературной плазмы остаётся неизменной, что важно для «дыхания» материала.

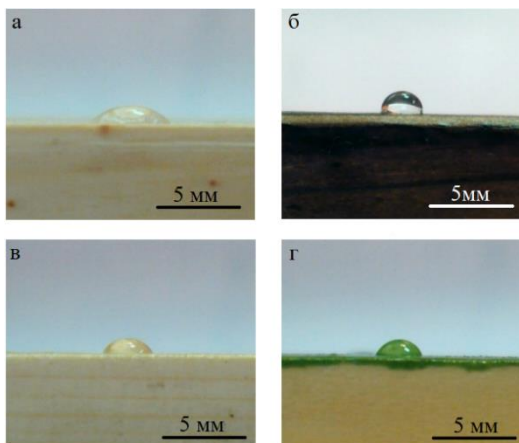


Рисунок 6 – Микрофотографии капли, лежащей на поверхности древесины сосны: *а* – исходной (без обработки); *б* – после плазменной обработки; *в* – покрытой лаком; *г* – окрашенной краской

Результаты испытаний по определению интенсивности развития грибкового поражения показали увеличение биостойкости с 5 баллов (высокая интенсивность развития) у исходной древесины до 1 балла (низкая интенсивность развития) у обработанной древесины. Низкая интенсивность развития грибов на поверхности образцов, обработанных потоком низкотемпературной плазмы (рисунок 8, *г*), объясняется термодеструкцией питательной среды для грибов.

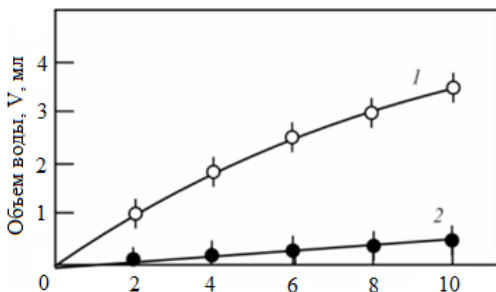


Рисунок 7 – Водопроницаемость образцов сосны в зависимости времени выдерживания: *1* – до обработки; *2* – после плазменной обработки

пропиток. После обработки потоком низкотемпературной плазмы увеличивается время воспламенения в 3–4 раза (с 11 до 38 с для сосны), а при $q \geq 2,8 \cdot 10^6$ Вт/м² наблюдается самозатухание. Это связано с

Испытания по определению интенсивности развития грибкового поражения показали увеличение биостойкости с 5 баллов (высокая интенсивность развития) у исходной древесины до 1 балла (низкая интенсивность развития) у обработанной древесины. Низкая интенсивность развития грибов на поверхности образцов, обработанных потоком низкотемпературной плазмы (рисунок 8, *г*), объясняется термодеструкцией питательной среды для грибов. При повышении температуры происходит разложение гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина в тонком верхнем слое древесины, что нарушает условия для роста грибов. Кроме того, на глубине до 5 мм в древесине происходит уничтожение микроорганизмов благодаря распределению температурных полей. Обработка также приводит к закупориванию пор на поверхности смолами, что препятствует проникновению спор грибов вглубь древесины, еще больше снижая риск грибкового поражения. Результат отмечается на всех рассмотренных сортах древесины. Результаты превосходят эффективность специализированных антисептирующих

образованием термостойкого углеродистого слоя и снижением содержания летучих горючих веществ.

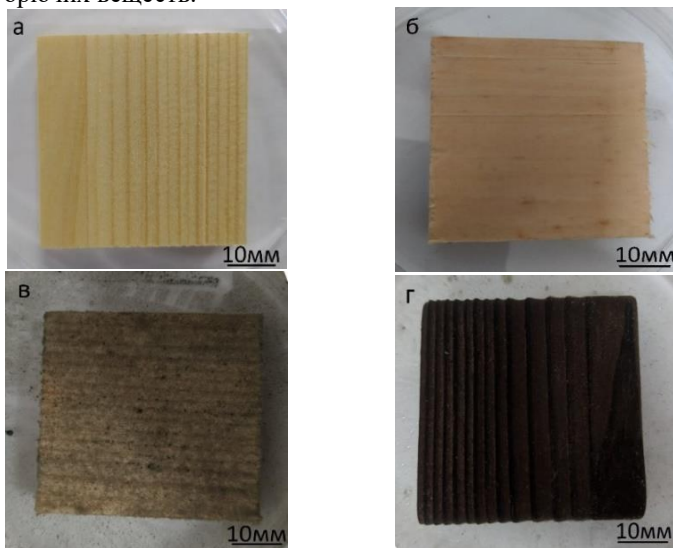


Рисунок 8 – Фотографии типичных образцов из сосны после испытания:
а – контрольный образец – исходная (необработанная) древесина без покрытий; *б* – образец исходной древесины, обработанный водой; *в* – образец исходной древесины с нанесенной суспензией; *г* – обработанный потоком низкотемпературной плазмы с нанесенной суспензией

По результатам комплексного исследования установлено, что изменение структуры и свойств приповерхностного слоя древесины непосредственно зависит от количества теплоты, подведенного к ней в результате плазменной обработки, которая определяется величиной удельного теплового потока и скоростью обработки.

В пятой главе «Апробация и перспективы использования результатов работы» представлены результаты технико-экономического обоснования, практической апробации и перспективы использования результатов работы по обработке древесины хвойных пород потоком низкотемпературной плазмы.

На основе полученных результатов созданы и запатентованы установки для промышленной обработки древесины низкотемпературной плазмой (рисунок 9), отвечающие требованиям доступности, безопасности,

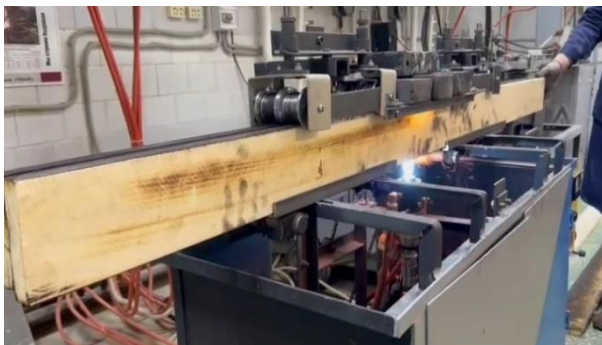


Рисунок 9 – Фотография линии обработки изделий из древесины (досок) потоком низкотемпературной плазмы

производительности и простоты обслуживания, предложены режимы обработки изделий из древесины (таблица 4), а также разработаны технологическая схема и технологический регламент по проведению работ на данных установках. Производственные испытания строительных изделий проводились совместно с ООО «Тарная база», г. Томск. Отмечено значительное повышение стойкости древесины к грибку и плесени. Предприятию удалось снизить отбраковку изделий из древесины с 30 % до 3–5 %.

По результатам сравнительного анализа себестоимости плазменной обработки и обжига газоздушными горелками установлено, что, несмотря на более высокую стоимость оборудования, себестоимость обработки плазмой оказалась примерно в два раза ниже за счёт большей производительности и меньших затрат на аренду, электроэнергию и зарплату.

Таблица 4 – Характеристика режимов обработки древесины

Удельный тепловой поток $q_{\max}$, Вт/м ²	Скорость обработки V , см/с	Характеристика поверхности	Цвет поверхности (RAL)	Область применения*
$1,1 \cdot 10^6$	9	Неравномерная обработка	Светло-коричневый (2001)	Интерьерные панели, мебельные фасады
$1,1 \cdot 10^6$	6	Равномерная обработка, глубина ~0,5 мм	Светло-коричневый (2001)	Интерьерные панели, мебельные фасады, двери, оконные рамы

Продолжение таблицы 4

Удельный тепловой поток q_{max} , Вт/м ²	Скорость обработки V , см/с	Характеристика поверхности	Цвет поверхности (RAL)	Область применения*
$1,5 \cdot 10^6$	6	Равномерная обработка, глубина ~0,7 мм	Светло-коричневый (2013)	Интерьерные панели, мебельные фасады
$1,5 \cdot 10^6$	3	Равномерная обработка, глубина ~1 мм	Светло-коричневый (2013)	Интерьерные панели, мебельные фасады, двери, оконные рамы, террасные доски, перила
$1,8 \cdot 10^6$	6	Равномерная обработка, глубина ~0,7 мм	Светло-коричневый (2013)	Террасные доски, перила, заборы, фасадные панели
$1,8 \cdot 10^6$	3	Равномерная обработка, глубина ~1,5 мм	Золотисто-коричневый (8011)	Террасные доски, перила, заборы, фасадные панели, несущие элементы: балки, стойки и т. п.
$2,8 \cdot 10^6$	6	Равномерная обработка, глубина ~1,3 мм	Золотисто-коричневый (8011)	Террасные доски, перила, заборы, фасадные панели, несущие элементы: балки, стойки и т. п.
$2,8 \cdot 10^6$	3	Равномерная обработка, глубина ~1,7 мм, сажа на поверхности	Темно-коричневый (8016)	Интерьерные панели, фасадные панели, полы в общественных зданиях, ступени лестниц
$3,2 \cdot 10^6$	6	Равномерная обработка, глубина ~1,5 мм, сажа на поверхности	Темно-коричневый (8017)	Интерьерные панели, фасадные панели, кровельные элементы, наружные лестницы

Удельный тепловой поток $q_{\max}$, Вт/м ²	Скорость обработки V , см/с	Характеристика поверхности	Цвет поверхности (RAL)	Область применения*
$3,2 \cdot 10^6$	3	Равномерная обработка, глубина ~2,0 мм, сажа на поверхности	Черный (9011)	Интерьерные панели, фасадные панели, шпалы, элементы контакта с грунтом
* Указана предположительная область применения				

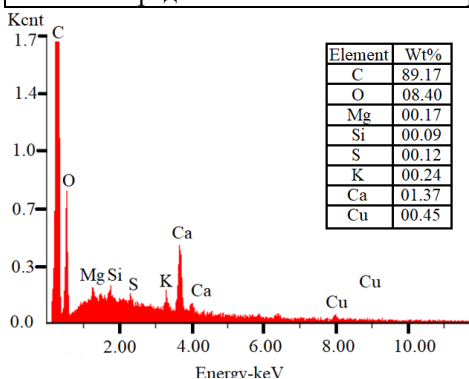


Рисунок 10 – Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия сажи с поверхности древесины после плазменной обработки

В процессе обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы на поверхности изделий образуется сажа, которая по результатам исследований представляет собой рентгеноаморфный углеродный порошок с минимальным содержанием примесей (рисунок 10). Проведены трибологические испытания и установлена эффективность применения данного порошка в качестве добавки-модификатора в смазочные материалы И-20а и

ТАД-17. Введение углеродного порошка в масло повышает износостойкость в 3,5–26 раз в зависимости от концентрации и условий испытаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные итоги диссертационной работы приведены в форме выводов:

1. Воздействие плазменного потока на древесину хвойных пород с количеством теплоты ~10000–30000 Дж приводит к формированию на поверхности древесины слоя толщиной 0,2–2,0 мм, обладающего комплексом модифицированных свойств. Такие изменения обеспечиваются за счет термодеструкции основных компонентов древесины и выделения смол на поверхности.

2. Изменение свойств приповерхностного слоя, связанные со степенью деструкции древесины и количеством выделенной смолы,

зависит от количества подведенной к древесине теплоты, определяющейся величиной удельного теплового потока и скоростью обработки. Так, при обработке удельным тепловым потоком $1,0\text{--}3,2 \cdot 10^6$ Вт/м² при скорости обработки 3–6 см/с происходит: повышение износостойкости поверхности в 2–4 раза; увеличение времени воспламенения в 2–3 раза; снижение водопроницаемости в 2–3 раза; уменьшение интенсивности развития микроорганизмов до 1 балла (по ГОСТ 9.048); увеличение краевого угла смачивания до 85–90°. При этом твердость и прочность изделий при сжатии, изгибе и скалывании не меняется, поскольку объем древесины с измененной структурой по отношению к исходной древесине в изделии мал.

3. Математическая модель взаимодействия потока низкотемпературной плазмы отражает зависимость изменения глубины и плотности сформированного на поверхности древесины слоя от количества подведенной теплоты, которое определяется удельным тепловым потоком и скоростью обработки. Расчетные данные позволяют прогнозировать свойства обработанных изделий, а также оптимизировать технологические параметры.

4. Разработанные устройства, технологическая схема и технологический регламент обеспечивают эффективную плазменную обработку изделий с различной формой и размером сечения в промышленных масштабах.

5. Изготовленная совместно с ООО «Тарная база», г. Томск, опытная партия древесины, обработанная потоком низкотемпературной плазмы при величине удельного теплового потока $1,8 \cdot 10^6$ Вт/м² и скорости обработки 0,06 м/с, подтверждает повышение стойкости древесины к неблагоприятным условиям благодаря увеличению биостойкости в 1,7 раза, износостойкости в 2 раза и снижению водопроницаемости в 3,5 раза, по сравнению с исходной древесиной.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для внедрения в производство строительных изделий из древесины хвойных пород.

Данный метод обработки древесины имеет перспективы дальнейшего развития с целью его применения для изделий из лиственных пород древесины, а также для изделий сложной формы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Перспективы использования плазменных технологий в области создания и обработки строительных материалов / **В.А. Черемных**, Г.Г. Волокитин, А.А. Клопотов, Н.К. Скрипникова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2022. – № 8 (764). – С. 65–72. – DOI: 10.32683/0536-1052-2022-764-8-65-72

2. Влияние обработки потоком низкотемпературной плазмы на водопроницаемость и паропроницаемость древесины сосны / Г.Г. Волокитин, **В.А. Черемных**, А.А. Клопотов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2024. – № 5 (785). – С. 49–56. – DOI: 10.32683/0536-1052-2024-785-5-49-56

3. Волокитин, Г.Г. Определение влияния различных видов термической обработки на механические свойства древесины сосны с учетом их себестоимости / Г.Г. Волокитин, М.В. Устинова, **В.А. Черемных** // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 210–218. – DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-3-210-218

4. Волокитин, Г. Г. Повышение биостойкости строительных изделий из древесины сосны путем обработки потоком низкотемпературной плазмы / Г. Г. Волокитин, **В. А. Черемных**, А. М. Адам, Ю. С. Саркисов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2025. – Т. 27. № 1. – С. 172–179. – DOI 10.31675/1607-1859-2025-27-1-172-179.

Патенты:

5. Патент № 212821 U1 Российская Федерация, МПК В27К 5/00. Устройство для обработки поверхности изделий из древесины низкотемпературными потоками плазмы : № 2021139632 : заявл. 29.12.2021 : опубл. 10.08.2022 / Волокитин Г.Г., Шеховцов В.В., Безухов К.А., **Черемных В.А.** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет».

6. Патент № 2822045 C1 Российская Федерация, МПК В27К 5/00. Установка для обработки поверхности изделий из древесины низкотемпературными потоками плазмы : № 2023127759 : заявл. 27.10.2023 : опубл. 28.06.2024 / Волокитин Г.Г., **Черемных В.А.**, Сизов Н.В. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет».

7. Патент № 226213 U1 Российская Федерация, МПК В27К 5/00. Устройство для обработки поверхности изделий круглого сечения из древесины низкотемпературными потоками плазмы : № 2024106386 : заявл. 12.03.2024 : опубл. 28.05.2024 / Волокитин Г.Г.; **Черемных В.А.** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет».

Публикации в других источниках:

8. Влияние термической обработки на механические свойства разных сортов древесины / **В.А. Черемных**, Г.Г. Волокитин, А.А. Клопотов [и др.] // Новые материалы и технологии : сборник научных статей IX Российско-Казахстанской молодежной научно-технической конференции. – Барнаул : Изд-во Алт. гос. ун-та, 2021. – С. 110.

9. High-energy impact of plasma energy on the mechanical properties of spruce and pine wood samples / **V.A. Cheremnykh**, G.G. Volokitin, A.A. Klopotov [et al.] // Materials in external fields : proceedings of the 11th International online symposium, Novokuznetsk, 15–16 февраля 2022 г. – Novokuznetsk : Сибирский государственный индустриальный университет, 2022. – Р. 42–44.

10. Особенности воздействия низкотемпературной плазмы на поверхность древесины породы сосна / **В.А. Черемных**, Г.Г. Волокитин, А.А. Клопотов, А.А. Алексеев // Инвестиции, градостроительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения : материалы XII Международной научно-практической конференции, Томск, 1–4 марта 2022 г. – Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. – С. 659–664.

11. **Черемных, В.А.** Исследование особенности механических свойств древесины с модифицированной поверхностью при помощи энергии плазмы / В.А. Черемных, Г.Г. Волокитин // Избранные доклады 68-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 19–23 апреля 2022 г. – Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. – С. 268–271.

12. Реализация инновационных плазменных технологий в области строительных материалов / **В.А. Черемных**, Г.Г. Волокитин, А.А. Клопотов, Н.К. Скрипникова // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее : сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 40-летию создания Инженерно-строительного института, Красноярск, 19–21 октября 2022 г. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2022. – С. 360–364.

13. Перспективы использования древесины, обработанной низкотемпературной плазмой в машиностроении / **В.А. Черемных**, И.Г. Волокитин, Ю.А. Власов, А.А. Клопотов // Современные проблемы машиностроения : сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, Томск, 22–25 ноября 2022 г. – Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – С. 162–163.

14. Исследование воздействия энергии низкотемпературной плазмы на физико-механические свойства поверхности изделий из сосны / Г.Г. Волокитин, А.А. Клопотов, О.Г. Волокитин, **В.А. Черемных** // Газоразрядная плазма и синтез наноструктур: сборник трудов III Международной конференции, Казань, 1–4 декабря 2022 г. – Казань : Бук, 2022. – С. 307–310.

15. **Черемных, В.А.** Перспективы создания защитно-декоративного слоя на поверхности клееных изделий из древесины с помощью энергии низкотемпературной плазмы / В.А. Черемных, Г.Г. Волокитин, А.А. Клопотов // Новые материалы и технологии : сборник научных статей X Российско-Казахстанской молодежной научно-технической конференции. – Барнаул : Изд-во Алт. гос. ун-та, 2022. – 219 с.

16. Теплофизические процессы при эксплуатации и в технологии производства энергоэффективного деревянного бруса с поперечными коннекторами / Г.Г. Волокитин, А.А. Клопотов, Н.А. Цветков, А.В. Толстых, В.А. Черемных // Енисейская теплофизика : тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием, Красноярск, 28–31 марта 2023 г. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2023. – С. 96–98.

17. Щербаков, Ф. С. Создание установки по плазменной обработке древесных изделий круглого сечения / Ф. С. Щербаков, Н. В. Сизов, **В. А. Черемных** // Избранные доклады 69-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 20 апреля 2023 года. – Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – С. 337–339.

18. Иноятов, Х. А. Влияние термического воздействия на приповерхностный слой хвойных пород древесины / Х. А. Иноятов, **В. А. Черемных**, А. А. Клопотов // Избранные доклады 69-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 20 апреля 2023 года. – Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2023. – С. 307–310.

19. Модификация поверхности образцов из кедра при плазменной обработке / **В.А. Черемных**, Г.Г. Волокитин, А.А. Клопотов, Д.А. Иванова // Взаимо-действие излучений с твердым телом : материалы 15-й Международной конференции, Минск, 26–29 сентября 2023 г. – Минск : Белорусский государственный университет, 2023. – С. 317–319.

20. Структурные исследования продуктов пиролиза при взаимодействии высокоэнтальпийной плазмы с древесиной / **В.А. Черемных**, Д.В. Корженко, А.А. Клопотов [и др.] // Газоразрядная плазма и синтез наноструктур: сборник трудов IV Международной конференции, Казань, 2023 г. – Казань : Бук, 2024. – С. 340–344.

21. Volokitin, G. Modification of surface of wood products by low-temperature plasma flows / G. Volokitin, A. Klopotov, **V. Cheremnykh** // Perspective plasma technologies : abstract book of XIVth China-Russia-Belarus symposium, Tomsk, 11–14 ноября 2023 г. – Tomsk : National Research Tomsk Poly-technic University, 2023. – P. 33–34.

22. **Черемных, В.А.** Влияние обработки поверхности древесины потоком низкотемпературной плазмы на краевой угол смачивания / В.А. Черемных, Г.Г. Волокитин // Качество. Технологии. Инновации : материалы VII Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 13–15 февраля 2024 года. – Новосибирск : Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 2024. – С. 54–59.

23. **Черемных, В.А.** Влияние обработки поверхности древесины кедра потоком низкотемпературной плазмы на краевой угол смачивания / В.А. Черемных, Г.Г. Волокитин, Т.Г. Чешуина // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт : сборник трудов X Международной научно-практической конференции, посвященной 45-летию Института архитектуры, строительства и транспорта ФГБОУ ВО ТГТУ. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, 2024. – С. 317–321.

24 Разработка оборудования для плазменной обработки изделий из древесины / Г.Г. Волокитин, **В.А. Черемных**, А.А. Клопотов [и др.] // Бюллетень научных сообщений. – 2024. – № 29. – С. 74–78.

25. Структурные исследования сажи, полученной в плазмохимическом реакторе при конверсии метана и при взаимодействии высокоэнтальпийной плазмы с древесиной / В.А. Черемных, Д.В. Корженко, А.А. Клопотов [и др.] // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии: тезисы докладов Международной конференции, Томск, 9–12 сентября 2024 г. – Томск, 2024. – С. 603–604.

26. Влияние воздействия высокоэнтальпийным плазменным пучком на поверхность древесины / Г.Г. Волокитин, А.А. Клопотов, **В.А. Чермных** [и др.] // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование : материалы XXII Всероссийской научной конференции, Хабаровск, 30 сентября – 4 октября 2024 г. – Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2024. – С. 141–145.

Подписано в печать Формат 60×84/16.
Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Уч. изд. л. 1,26.
Тираж экз. Заказ №

Изд-во ТГАСУ, 634063, г. Томск, пл. Соляная, 2
Отпечатано с оригинал-макета автора в ООП ТГАСУ.
634063, г. Томск, ул. Партизанская, 15.