

На правах рукописи



Гирфанов Артем Альбертович

**УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ ОБРАБОТКА В ПРОЦЕССАХ
МОДИФИКАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Казань – 2025

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;

Варанкина Галина Степановна, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова», профессор кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины.

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

Защита диссертации состоится «18» декабря 2025 года в 11 часов 45 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 Учёного совета А-330.

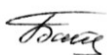
Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, кабинет А-330, Учёный совет.

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 учёных 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=557756>.

Автореферат разослан «__» октября 2025 года

Учёный секретарь
диссертационного совета



Екатерина Игоревна
Байгильдеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования. Эксплуатация деревянных конструкций в условиях повышенной влажности создаёт серьёзные трудности, требующие оперативных действий для сохранения их функциональности. На промышленных предприятиях, в том числе и на электростанциях, построенных в нашей стране в 1940 – 1970-х годах, подземные сооружения для кабельных трасс и технологических трубопроводов возводились с применением несъёмной опалубки, деревянных опор, несущих перекрытий и шпунтового бруса. Учитывая, что средний срок службы промышленных зданий и сооружений составляет около 80 лет, многие из этих деревянных элементов продолжают функционировать и в настоящее время, что обуславливает необходимость разработки новых технических решений для продления срока их службы.

В последнее время активно исследуются методы физико-химической модификации древесины с целью улучшения её эксплуатационных свойств. Одним из перспективных подходов является термическая модификация древесины (ТМД), которая представляет собой альтернативу традиционному химическому методу. ТМД основана на термическом воздействии при температуре от 180 °С до 240 °С, что приводит к глубоким структурным изменениям на клеточном и молекулярном уровнях. В процессе обработки древесины частично удаляются гемицеллюлозы, что снижает её гигроскопичность и повышает устойчивость к воспламенению и биоразрушению.

Технология термомодифицирования древесины хорошо изучена и применяется на многих производствах. Одним из перспективных направлений в этой области является использование в качестве агента обработки топочных газов, полученных в результате утилизации отходов деревообработки. В то же время на ТЭС для выработки пара используются котлоагрегаты, и в процессе сжигания топлива (газ), смешанного с подогретым воздухом, образуется большое количество «уходящих» газов (продуктов сгорания) с высокой температурой, выбрасываемых в атмосферу. Это является предпосылкой для разработки технологии термической модификации с использованием данных отходящих газов.

Однако даже термически модифицированная древесина требует соблюдения требований огнезащиты. Известно, что термомодифицирование снижает смачиваемость поверхности древесины, что затрудняет эффективную пропитку огнезащитными составами.

Анализ литературных данных показал, что фотоокислительная деструкция древесины, возникающая под действием ультрафиолетового воздействия, вызывает увеличение смачиваемости материала и повышает эффективность пропитки. Но, как метод модификации поверхности материала, фотоокисление древесины до сих пор практически не изучено. В связи с этим разработка и создание технологии, объединяющей предварительное термомодифицирование по всему сечению древесины «уходящими» газами ТЭС с последующей ультрафиолетовой обработкой древесных поверхностей перед процессом пропитки, является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Термическая модификация и фотоокислительная деструкция изделий из древесины рассматривались отечественными и зарубежными исследователями, среди которых необходимо отметить Сафина Р.Г., Сафина Р.Р., Ахметову Д.А., Хасаншина Р.Р., Разумова Е.Г., Владимирову Т.Е., Edit Barta, Georgy Papp, Bond B.H., Espinoza O.A. и др.

Цель исследования заключается в разработке и научном обосновании технологии модификации свойств древесины посредством термической и ультрафиолетовой обработки для повышения огнебиостойчивости деревянных конструкций на промышленных предприятиях.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

- 1) Разработка математической модели кинетики плотности древесины сосны в процессе термической модификации конвекцией уходящими газами ТЭС.
- 2) Установление влияния дозы ультрафиолетового облучения на краевой угол смачивания древесины в зависимости от степени её термической обработки.
- 3) Исследование эксплуатационных свойств древесины, прошедшей ультрафиолетовую обработку.
- 4) Разработка рекомендаций по совершенствованию технологий пропитки деревянных конструкций, в том числе, находящихся в эксплуатации, путём предварительной ультрафиолетовой обработки.

Научная новизна результатов работы. Работа содержит научно-обоснованные технологические решения по совершенствованию физико-химических характеристик древесины посредством термического модифицирования в сочетании с УФ-излучением, что позволяет снизить гигроскопичность и повысить биостойкость древесных поверхностей при сохранении адгезионных свойств:

1. Впервые предложено использование ультрафиолетового облучения в качестве предварительной обработки поверхности древесины перед процессами пропитки с целью повышения впитывающей способности огнебиозащитного состава поверхностью материала.

2. Впервые проведены исследования процесса термического модифицирования древесного материала с использованием в качестве агента обработки среды «уходящих» газов энергетического котла-утилизатора в диапазоне температур от 180 °С до 240 °С в составе парогазовой установки на ТЭС.

3. Разработана математическая модель кинетики плотности древесины сосны в процессе термической обработки конвекцией «уходящими» газами котлоагрегатов ТЭС, полученная с использованием планов второго порядка, и отличающаяся возможностью оперативного определения степени термической обработки древесины сосны в зависимости от продолжительности воздействия и температуры «уходящих» газов котлов и толщины пиломатериала.

4. Получено математическое описание изменения краевого угла смачивания древесины в зависимости от степени термической обработки в среде «уходящих» газов котлоагрегатов ТЭС и полученной дозы ультрафиолетового облучения.

5. Опытным путём установлено, что необходимая доза УФ облучения натуральной древесины составляет 7,4 кДж/м², что позволяет снизить краевой угол смачивания до 81 %.

6. Установлено, что для термомодифицированной сосны необходимая доза ультрафиолетового облучения по сравнению с натуральной древесиной возрастает пропорционально степени модифицирования.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость представленной работы заключается в определении влияния степени термической обработки древесины на устойчивость к ультрафиолетовому воздействию. Разработанное математическое описание позволяет определить

необходимую дозу ультрафиолетового облучения термодревеси сосны для повышения её смачиваемости.

Практическая значимость заключается в разработке ресурсосберегающей технологии повышения влагостойкости древесины строительных конструкций промышленных предприятий, эксплуатируемых во влажных условиях, посредством термической обработки в среде «уходящих» газов энергетических котлоагрегатов. Продемонстрированы ресурсосбережение и эффективность использования данного метода в производственных процессах, направленных на повышение эксплуатационных характеристик материалов в кабельных каналах промышленных предприятий. Разработан способ предварительной подготовки поверхности деревянных строительных конструкций, работающих в условно-сухих условиях, посредством ультрафиолетового облучения перед обработкой огнебиозащитными составами. Предложенная технология пропитки деревянных конструкций, позволяющая повысить качество их огнебиозащитной обработки вследствие увеличения глубины пропитки и введённого объёма пропитывающих составов путём повышения смачиваемости поверхности древесины, внедрена на ООО «Инженерно-техническая фирма «АММ» (г. Казань).

Методы и методология исследования. Фундаментальной основой исследований послужили теоретические разработки и математические модели процессов термической обработки древесины, созданные отечественными и зарубежными учёными, в частности, работы, описывающие механизмы трансформации физико-химических характеристик древесной матрицы под воздействием термического и ультрафиолетового излучений различной интенсивности и длительности.

Для проведения расчётов и построения таблиц применялся Microsoft Excel. Сложные задачи моделирования нелинейных зависимостей решались посредством специализированных программных пакетов TableCurve2D и TableCurve3D, обеспечивающих построение двух- и трёхмерных моделей, соответственно.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель кинетики плотности древесины сосны в процессе термической обработки в среде «уходящих» газов, позволяющая определить текущее значение плотности материала в зависимости от толщины образца, температуры термического модифицирования и продолжительности обработки.

2. Результаты исследования воздействия ультрафиолетового излучения на смачиваемость поверхности древесины в зависимости от степени её термической обработки.

3. Результаты исследований основных свойств древесины, подвергнутой термическому модифицированию и ультрафиолетовому облучению.

4. Технология предварительной ультрафиолетовой обработки поверхности деревянных конструкций, позволяющая увеличить эффективность пропитки огнебиозащитными составами.

Достоверность результатов исследования обеспечивается воспроизводимостью экспериментов; использованием аттестованных методик и поверенного измерительного оборудования; сопоставимостью и согласованностью результатов с известными аналитическими и экспериментальными данными, стандартами и литературными источниками; удовлетворительной сходимостью результатов статистической обработки данных.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в выборе темы и формулировке основных положений диссертации; в решении теоретических, экспериментальных и практических задач повышения огнебиозащитных свойств деревянных конструкций при эксплуатации промышленных зданий и сооружений; создании методики и проведении исследований по термомодифицированию древесины в «уходящих» газах котла-утилизатора ТЭС, а также создании установки для испытаний и проведения экспериментальных исследований по фотоокислению образцов древесины, её огнестойкости и гигроскопичности; в разработке математического описания процессов термомодифицирования и фотодеградациии образцов древесины; подготовке публикаций по выполненной работе. Автору принадлежат основные идеи работ, опубликованных в соавторстве.

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» (пункты 1, 3, 4 научной новизны) и п. 4 «Технология и продукция в производстве: лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном, деревообрабатывающем, целлюлозно-бумажном, лесохимическом и сопутствующих им производствах» (пункты 2, 5, 6 научной новизны) паспорта специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались: на научных сессиях по технологическим процессам ФГБОУ ВО «КНИТУ» (г. Казань, 2022-2025 гг.), на всероссийских конференциях «Актуальные проблемы лесного комплекса (г. Брянск, 2022 г., 2024 г.), в материалах XI-й Международной научно-практической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2022 г. » (г. Казань), на V-й Всероссийской научно-практической конференции «Лесозаготовка и комплексное использование древесины» (г. Москва, 24 марта 2023 г.), на III International Scientific Practical Conference “Technologies Material Science and Engineering” (ЕЕА-III-2024) (г. Душанбе).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в Перечень ВАК, 1 статья в издании, включённом в международную реферативную базу данных Scopus, 6 трудов в прочих изданиях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста, включает 17 таблиц, 45 рисунков, список литературы содержит 137 наименований цитируемых работ, в том числе 61 наименование на иностранных языках.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении аргументирована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы, положения выносимые на защиту.

В первой главе приведён анализ технологий в области модификации древесного материала. На основе обзора зарубежной и отечественной литературы

проанализировано влияние высоких температур и ультрафиолетового излучения на свойства древесины, представлены исследования пожарной безопасности деревянных строительных конструкций.

Вторая глава посвящена разработке математической модели процесса термомодификации массивной древесины в среде «уходящих» газов котлоутилизаторов тепловых электрических станций методом планирования эксперимента.

Для проведения полного факторного эксперимента был изготовлен контейнер с размерами 350х250 мм из перфорированного листа металла 12Х18Н10Т для погружения образцов древесины в конвективную часть энергетического котла с температурой «уходящих» газов 200, 220, 240 °С (рис.1). Изменение температуры «уходящих» газов в котле-утилизаторе производилось регулированием задания установленной мощности и нагрузки парогазовой установки от 110 до 80 МВт методом перераспределения тепла с паровой турбины. Модификация образцов при данных температурах осуществлялась в течение 2, 3 и 4 часов. Далее контейнер с образцами выгружался из котла и производился режим естественного отпуска образцов.

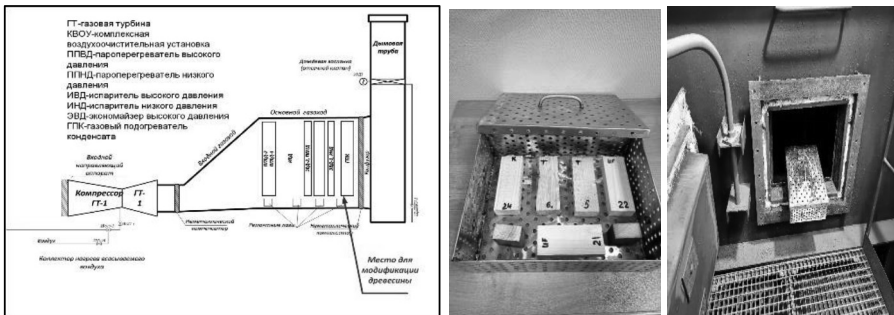


Рисунок 1 – Экспериментальные исследования термомодифицирования древесины

Для проведения исследований были использованы образцы толщиной 30, 40 и 50 мм из древесины сосны (табл.1). Порода древесины была выбрана как наиболее востребованная в строительной и промышленной сферах.

Таблица 1 – Переменные факторы и уровни их варьирования

Наименование фактора	Обозначение факторов			Интервал варьирования	Уровень варьирования фактора		
	Натуральное	Нормализованное	Связь нормализованных и натуральных значений		Нижний (-1)	Основной (0)	Верхний (+1)
Толщина образца, мм	s	x ₁	(s-40)/10	10	30	40	50
Температура «уходящих» газов, °С	t	x ₂	(t-220)/20	20	200	220	240
Время сушки, час	τ	x ₃	(τ-3)/1	1	2	3	4

В результате проведённых исследований получены диаграммы плотности древесины сосны в зависимости от режимов обработки (рис.2).

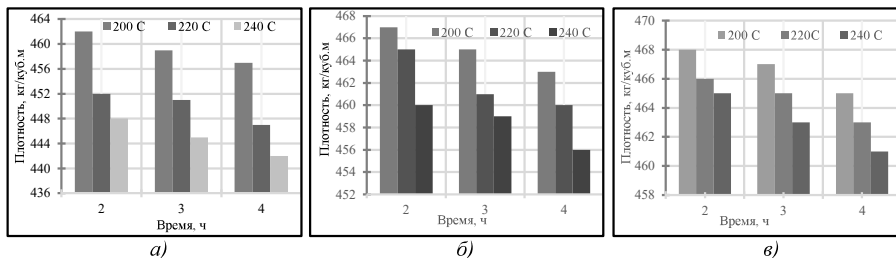


Рисунок 2 – Плотность образцов сосны после высокотемпературной обработки при толщине образцов: а) 30 мм; б) 40 мм; в) 50 мм

В результате обработки экспериментальных данных получены значения коэффициентов регрессии с последующим получением формулы (1) в натуральных величинах.

$$\rho = 654,497 + 0,425s - 1,729t + 10,408\tau + 0,011st - 0,0665t\tau + 0,11st - 0,0083s^2 + 0,0042t^2 + 0,665\tau^2. \quad (1)$$

Для нахождения степени термомодифицирования древесного материала используем формулу 2:

$$Q'_{\text{TM}} = \frac{\rho_n - \rho_i}{\rho_n - \rho_k}, \quad (2)$$

где ρ_n – начальная плотность древесины, кг/м³; ρ_i – текущая плотность древесины в процессе термической обработки, кг/м³; ρ_k – плотность термодревесины, прошедшей термическую обработку до постоянной массы при температуре 260 °С, кг/м³.

Представленное выражение позволяет рассчитать степень термомодифицирования материала по изменению его текущей средней плотности в процессе высокотемпературной обработки.

На рисунке 3 представлены графики зависимости степени термомодифицирования Q'_{TM} от продолжительности τ (ч) и температуры t (°С) «уходящих» газов котла-утилизатора, полученные в результате моделирования.

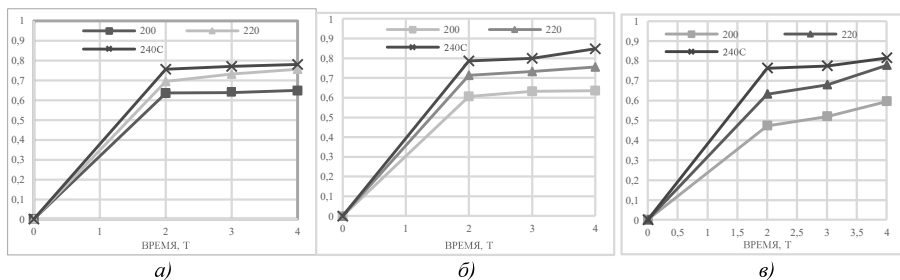


Рисунок 3 – График зависимости степени термомодифицирования Q'_{TM} от времени τ , ч и температуры «уходящих» газов, °С: а) при $S=30$ мм; б) при $S=40$ мм; в) при $S=50$ мм

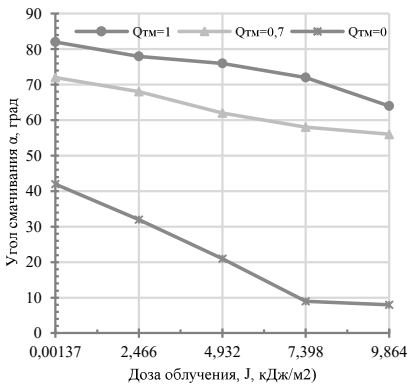
Таким образом, разработанная математическая модель позволяет определить

степень термомодифицирования пиломатериала в зависимости его толщины, от температуры и продолжительности обработки и принять обоснованное решение при выборе режимов модификации древесины.

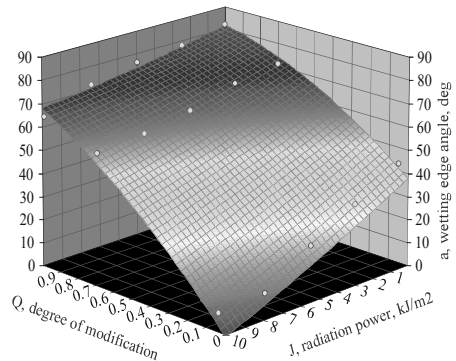
В третьей главе описана экспериментальная установка, разработанная для исследования модификации поверхности древесины УФ-излучением, представлены методы и результаты исследования характеристик модифицированных образцов. Замеры интенсивности ультрафиолетового облучения выполнены при помощи ультрафиолетового радиометра LS125 многозондового.

Дистанция между исследуемым материалом и источником излучения регулировалась в пределах от 50 до 300 мм, что дало возможность контролировать интенсивность воздействия ультрафиолета на поверхность образцов. Таким образом, методология экспериментов позволила создать разносторонний массив данных для подробного анализа процессов фотодеградации в зависимости от различных физических параметров воздействия.

Обработанные ультрафиолетом образцы были проанализированы на смачиваемость. По результатам исследования построены графики зависимости краевого угла смачивания от дозы облучения (рис.4а). С помощью программы TableCurve3D (рис.4б) получена соответствующая математическая зависимость (3):



а)



б)

Рисунок 4 — Зависимость краевого угла смачивания от дозы облучения и степени ТМД:

а) результаты эксперимента; б) анализ с помощью программы TableCurve3D

$$\alpha = 37,77312 + 70,01116 \cdot \theta - 4,32702 \cdot J - 26,07287 \cdot \theta^2 + 0,04708 \cdot J^2 + 2,49635 \cdot J \cdot \theta. \quad (3)$$

Полученное уравнение позволяет определить эффективность обработки древесины в зависимости от степени термомодификации и дозы ультрафиолетового облучения в промышленных и научных целях.

В четвёртой главе приведены результаты исследования свойств материалов, полученных на основе термомодификации и предварительной УФ обработки древесины.

Исследования на гигроскопичность показали, что у образцов, прошедших

термомодифицирование с последующей УФ-обработкой, существенного увеличения гигроскопичности не наблюдается.

Проведённый анализ поглотительной способности древесины проводился по двум параметрам: пропиточному коэффициенту по поглощению и пропиточному коэффициенту по глубине проникновения огнезащитного состава. Итоговые результаты проведённых исследований указаны в таблице 2.

Для создания эффективного огнезащитного слоя на поверхности материала важное значение имеют пропиточные коэффициенты по поглощению, а не по глубине, что объясняется необходимостью удержания максимального количества огнезащитного состава в поверхностной зоне материала. При этом из таблицы 2 видно, что предварительное термомодифицирование с ультрафиолетовой обработкой обеспечивают хорошую поглотительную способность поверхности древесины при минимальной глубине проникновения огнезащитного средства.

Таблица 2 — Расчёты пропиточных коэффициентов

..N группы	1	2	3	4
Метод обработки образцов	ТМ, $\theta=0,7$; $J=0$ кДж/м ²	УФ-С, $\theta=0$; $J=7$ кДж/м ²	ТМ+УФ, $\theta=0,5$; $J=7$ кДж/м ²	К, $\theta=0$; $J=0$ кДж/м ²
Пропиточные коэффициенты по поглощению	0,57	0,81	0,78	0,41
Пропиточные коэффициенты по глубине проникновения	0,64	0,94	0,73	0,51

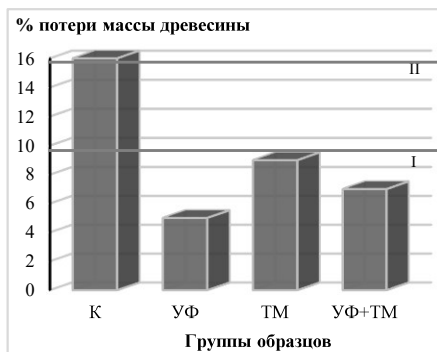


Рисунок 5 — Диаграмма изменения массы объектов огнезащиты

Проведены испытания на огнестойкость образцов, полученных в ходе экспериментов. Результаты испытания на огнестойкость представлены на рисунке 5.

Как видно из диаграммы, ультрафиолетовая обработка поверхности перед пропиткой огнезащитным составом позволяет снизить горючесть материала как в случае натуральной, так и в случае термомодифицированной древесины.

Далее были проведены исследования прочности клеевых соединений при испытании склеенных образцов древесины на сдвиг.

Полученные данные показали, что при склеивании термически модифицированной древесины целесообразно использовать предварительную УФ-обработку склеиваемых поверхностей для повышения качества склеивания.

Также проведены исследования с помощью ИК-Фурье спектрометра Frontier. При спектроскопическом исследовании термически обработанных образцов обнаружены значительные структурные преобразования. Наиболее информативными оказались диапазоны 2902,05 и 1736,67 см⁻¹, где наблюдаются изменения, свидетельствующие о дегидратации материала и реорганизации

карбонильных функциональных групп.

Таким образом, исследования свойств образцов, прошедших объёмную термическую обработку с последующей поверхностной модификацией ультрафиолетом, показали целесообразность дальнейшего применения данной технологии в промышленности.

В пятой главе представлены результаты промышленной апробации результатов исследования.

Учитывая параметры (температуру «уходящих» газов котла-утилизатора, толщину древесины, время выдержки) предложено в котле-утилизаторе в районе ремонтных лазов между газовым подогревателем конденсата (ГПК) и поворотным газоходом установить загрузочное устройство с металлическими решётками, изготовленными из стали марки 12X18H10T для термомодифицирования древесины. В данном отрезке котла-утилизатора есть возможность размещения данной конструкции (рис.6).

Для апробации результатов исследования в промышленных условиях была произведена термомодификация партии пиломатериала, из которой была изготовлена специальная подпорная конструкция прямоугольной формы, с последующей УФ-обработкой и пропиткой огнезащитным составом. Готовое изделие было установлено в кабельный канал (рис.7).

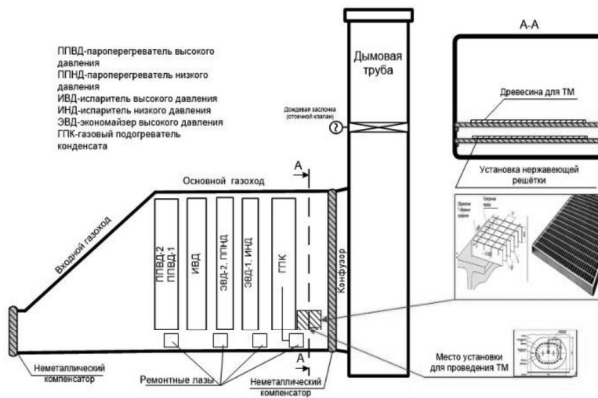


Рисунок 6 — Модернизация котла-утилизатора для возможности проведения ТМД

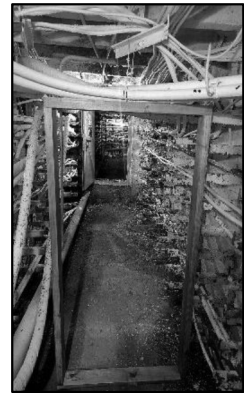


Рисунок 7 — Подпорная рама в кабельном канале

Монтаж подпорной рамки для высоковольтных кабелей произведён в рамках этапа практической эксплуатации, во время которой оценивалась долговечность и надёжность разработанной конструкции. На рисунке 8 показано, что конструкция подпорной рамки из ТМД более стабильна по сравнению с натуральной древесиной при изменении относительной влажности в кабельном канале промышленного предприятия.

Анализ экономической эффективности внедрения устройства термомодифицирования в котле-утилизаторе подтвердил, что термомодификация

в котле-утилизаторе экономически оправдана: экономический эффект составил 189 тыс. рублей/год.

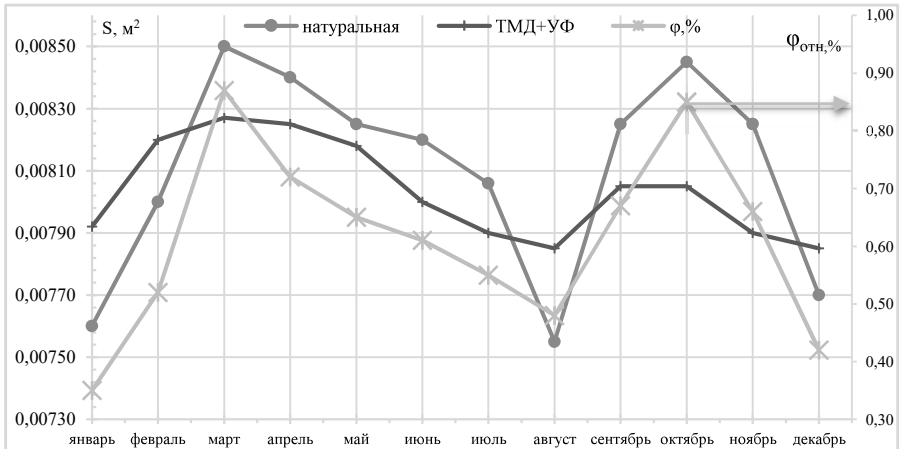


Рисунок 8 — График испытаний пиломатериалов на разбухание

Результаты исследований ультрафиолетовой предобработки натуральной древесины перед пропиткой огнебиозащитной пропиткой легли в основу разработки технологии для промышленных объектов с большой площадью деревянных чердачных перекрытий, которые подвергаются первичной или периодической огнебиозащите методом воздушного, безвоздушного или комбинированного распыления. Для реализации этой технологии была взята установка «Светолит-100» с характеристиками мощности 300 Вт, бактерицидным потоком 100 Дж/м² и сроком службы УФ лампы 12000 часов. Для определения количества перестановок ультрафиолетовой лампы необходимо определить площадь и объём призм чердачного помещения и не допускать уменьшение дозы облучения 7,4 кДж/м². Режим облучения должен быть непрерывным. Доза облучения прямо пропорциональна мощности облучения и времени его воздействия и обратно пропорциональна квадрату расстояния до него: при увеличении расстояния до 2 метров доза облучения снижется в 4 раза.

Предварительно выполняется расчёт площади (в зависимости от конструкции) облучаемой поверхности и подбор мощности по таблице 3.

Таблица 3 — Подбор УФ ламп в зависимости от мощности

Эффективная мощность УФ лампы, Вт	Доза облучения, кДж/м² (д.б. более 7.4) при расстоянии от объекта			
	1 м	3 м	4 м	6 м
20	72	8	4,5	2
40	144	16	9	4
60	216	24	16	6
100	360	40	22,5	10

Далее провели испытания на огнестойкость (табл.4) с целью определения состояния древесины и качества нанесённого огнезащитного состава. В качестве огнезащитного средства использован препарат «Neomid», который предназначен для огнезащиты и антисептирования древесины для наружных и внутренних работ. Он переводит древесину в трудновоспламеняемый и трудногорючий материал, предназначен для комплексной защиты от огня и биопоражения строительных систем, несущих брусев, перекрытий, лаг.

Таблица 4 – Результаты испытаний огнестойкости объектов защиты

Показатели	Образцы древесины					
	Группа 1 L=6 м		Группа 2 L=3 м		Группа 3 L=1 м	
	подгруппы: 1 - стропила, 2 - обрешётка					
	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2
Вес до испытаний, г	7,6	7,3	7,9	7,7	9,4	9,8
Вес после испытаний, г	5,9	5,7	7,2	7,1	8,8	9,5
Потеря массы образца, %	22	21	8,9	7,8	6	3
Группа огнестойкости	II	II	I	I	I	I

Анализ результатов, представленных в таблице 4 показал, что образцы древесины 1.1 и 1.2 имеют II группу огнестойкости и представляют собой трудновоспламеняемую древесину с пределом огнестойкости до 90 минут, поскольку изменение массы после огневого испытания составило в среднем 22 %. Это обусловлено тем, что расстояние от УФ-ламп до деревянных конструкций составило – 6 и более метров, что недостаточно для подготовки к огнезащитному покрытию промышленных и административных зданий. Средняя потеря массы образцов 2 и 3 группы составила 8 % и 5 % соответственно, поэтому они относятся к I группе огнестойкости с пределом огнестойкости до 150 минут, являются трудносгораемой древесиной и могут эксплуатироваться в производственных зданиях.

Так, деревянные строительные конструкции, которые обработаны огнезащитными составами и предварительно облучены УФ на расстоянии более 4 метров, не могут применяться в объектах промышленного строительства, так как не обеспечивают требуемую степень огнезащиты древесины, что подтверждено обугливанием образцов на всю глубину зоны воздействия пламени. Данные конструкции соответствуют II группе эффективности огнезащиты и не могут выполнять функции перекрытий и несущей конструкции промышленного здания. При этом требуется проведение работ по скорейшему обновлению огнезащитного покрытия.

Данная работа прошла апробацию на ООО «Инженерно-техническая фирма «АММ» (г. Казань), где технология глубокой пропитки деревянных конструкций, находящихся в эксплуатации, была внедрена в технологический процесс. Предложенное усовершенствование позволяет увеличить сроки огнебиозащитной обработки деревянных строительных конструкций, межремонтный период их

эксплуатации и снизить затраты на содержание и обслуживание деревянных конструкций, требующих соблюдения сроков контроля качества защитной обработки.

В приложении представлены результаты исследования образцов методом преобразования ИК-Фурье, протоколы испытаний на прочность клеевого шва, расчёты математической модели ТМД, акт внедрения в производство технологии глубокой пропитки деревянных конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Разработана математическая модель кинетики плотности древесины сосны в процессе термической обработки методом конвекции «уходящих» газов котлов-утилизаторов. Получена регрессионная зависимость плотности древесины сосны от толщины, температуры и времени выдержки образцов. Выполнены расчёты и построены графики определения степени термомодифицирования материала, что даёт возможность детально изучить взаимосвязь между степенью модификации, временем обработки, толщиной материала и принять обоснованные решения при выборе режимов обработки древесины.

2) Проведены исследования влияния ультрафиолетовой обработки на свойства термомодифицированной древесины с использованием экспериментальной установки. Определены краевые углы смачивания образцов древесины в зависимости от дозы облучения. Исследование воздействия ультрафиолета на краевой угол смачивания выявило, что наиболее эффективной дозой облучения является $7,4 \text{ кДж/м}^2$. С помощью прикладного комплекса TableCurve3d получено математическое описание изменения краевого угла смачивания древесины в зависимости от степени термической обработки в среде «уходящих» газов котлоагрегатов ТЭС и полученной дозы облучения.

3) В результате исследований древесины сосны, модифицированной предложенным способом, установлено, что с увеличением дозы ультрафиолетового излучения наблюдается незначительное повышение гигроскопичности. Проведённые исследования на эффективность пропитки огнезащитными составами показали, что термомодифицирование в совокупности с ультрафиолетовой обработкой увеличивает способность древесины к поглощению защитного средства. Доказана высокая огнестойкость образцов древесины, прошедших ТМД и УФ, и обработанных огнезащитой. В результате исследования прочности клеевого шва установлено, что предварительная УФ обработка целесообразна лишь для склеивания термодревесины. В этом случае наблюдается увеличение прочности клеевого соединения. При склеивании натуральной древесины использование предварительного УФ облучения приводит к абляции клея вглубь материала, снижая его количество в зоне контакта склеиваемых поверхностей, что снижает прочность клеевого соединения. Проведённый анализ химических соединений в образцах древесины показал, что ультрафиолетовое облучение способствует разрыву С-С связей и формированию активных центров, где вследствие каскада химических превращений формируются новые двойные связи в структуре материала.

4) Проведена промышленная апробация результатов исследования: выполнено

термомодифицирование пиломатериалов в котле-утилизаторе; изготовленная из данных пиломатериалов подпорная рама используется в кабельном канале промышленного предприятия. Произведённые в течении 12 месяцев испытания в кабельном канале показали, что ТМД более стабильна в сравнении с натуральной древесиной при изменении влажности от 30 % до 90 %. Выполнен анализ экономической эффективности внедрения устройства термомодифицирования в котле-утилизаторе, экономическая эффективность проекта составляет 189 тыс. рублей/год. Предложена технология предварительной УФ-обработки деревянных конструкций, находящихся в эксплуатации, перед процессами пропитки огнезащитными составам. Данная технология внедрена на ООО «Инженерно-техническая фирма «АММ» (г. Казань).

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с развитием ресурсосберегающих технологий, а полученные результаты могут стать основой дальнейших исследований в области использования предварительной УФ обработки сырья в производстве древесных композиционных материалов.

Основные обозначения: m – масса, кг; S – толщина, мм; UVC – ультрафиолетовое излучение тип С; $\phi_{отн}$ – влажность относительная, %; ρ – плотность, кг/м³; τ – время, сек; $G_{кал}$ – тепловая мощность; ПГУ – парогазовая установка; M – модификация; $P_{л}$ – мощность лампы, Вт; T – температура, °C; ТЭС – тепловая электрическая станция; ТМД – термомодифицированные древесные материалы; УФ (UF) – ультрафиолетовое облучение.

В приложении представлены результаты исследования образцов методом преобразования ИК-Фурье, протоколы испытаний на прочность клеевого шва, расчёты математической модели ТМД, акт внедрения в производство технологии глубокой пропитки деревянных конструкций.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России:

1. Гирфанов А.А. Влияние методов предварительной обработки поверхности древесины на проникающую способность огнезащитного средства / Гирфанов А.А., Сафин Р.Р., Саерова К.В., Сафина А.В. // Деревообрабатывающая промышленность. – 2023. – №4. – С. 11-16.

2. Гирфанов А.А. Исследование огнезащитной эффективности деревянных конструкций различного периода эксплуатации / Гирфанов А.А., Сафин Р.Р., Сафина А.В. // Системы. Методы. Технологии (СМТ). – 2023. – №2(58). – С. 107-112.

3. Гирфанов А.А. Исключение применения коагулянта в схеме очистки исходной воды на тепловых электрических станциях на примере Казанской ТЭЦ-2 / Гирфанов А.А., Фазлеев Р.Р., Гаврилов А.Ю. // Энергосбережение и водоподготовка. – 2023. – №1(141). – С. 8-10.

4. Гирфанов А.А. Влияние методов предварительной обработки поверхности древесины на проникающую способность огнезащитного средства / Гирфанов А.А., Сафин Р.Р., Саерова К.В., Сафина А.В. / Деревообрабатывающая промышленность. –

2023. – №4. – С.11-19.

5. Гирфанов А.А. Исследование воздействия ультрафиолетового облучения на гигроскопичность и смачиваемость древесины / Гирфанов А.А., Сафин Р.Р., Кайнов П.А. // Деревообрабатывающая промышленность. – 2024. – №3. – С. 43-50.

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

6. Girfanov A.A. Behavior of Wood During photo-oxidation / Girfanov A.A., Safin R.R. // III International Scientific Practical Conference: Technologies. Material Science and Engineering, EEA-III-2024. – 2024. – P. 20049.

Труды в прочих изданиях:

7. Гирфанов А.А. Требования к огнезащите строительных деревянных конструкций / Гирфанов А.А., Сафин Р.Р. // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2022. – №62. – С. 284-287.

8. Гирфанов А.А. Экспериментальная установка для исследования огнестойкости деревянных строительных конструкций // Материалы XI-й Международной научно-практической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы-2022». – Казань. – 2022. – С. 168-170.

9. Гирфанов А.А. Комплексный подход к формированию огнезащитных покрытий для деревянных строительных конструкций / Гирфанов А.А., Сафин Р.Р., Сасрова К.В., Сафина А.В. // Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции «Лесоэксплуатация и комплексное использование древесины». – Казань. – 2023. – С. 3-7.

10. Гирфанов А.А. Интенсификация процессов пропитки термомодифицированной древесины посредством предварительной ультрафиолетовой обработки / Гирфанов А.А., Сафин Р.Р., Сафина А.В. // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии (сушка, тепловые и массообменные процессы) СЭТМТ – 2023». – Москва. – С. 252-255.

11. Гирфанов А.А. Предварительная обработка древесины ультрафиолетом для интенсификации пропитки / Гирфанов А.А., Кайнов П.А. // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2024. – №66. – С. 298-300.

12. Аникеева К.Р. Оценка влияния озонирования на свойства древесного наполнителя методом ИК-спектроскопии / Аникеева К.Р., Гирфанов А.А. // Актуальные проблемы лесного комплекса – 2024. – №66. – С. 325-330.