

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

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

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Сафин Руслан Рушанович

Казань – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ МОДИФИКАЦИИ ДРЕВЕСНОГО МАТЕРИАЛА.....	11
1.1. Научные взгляды на теоретические основы процесса модификации древесины.....	11
1.2. Современные научные представления о принципах ультрафиолетовой обработки материалов.....	18
1.3. Структура древесины.....	22
1.4. Обеспечение пожарной безопасности деревянных строительных конструкций.....	29
Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАНИЯ МАССИВНОЙ ДРЕВЕСИНЫ В СРЕДЕ «УХОДЯЩИХ» ГАЗОВ КОТЛОАГРЕГАТОВ ТЭС.....	34
2.1. Исследования процесса термомодифицирования древесины в среде «уходящих» газов котлов-утилизаторов.....	34
2.2. Разработка математической модели кинетики плотности древесины в процессе термической обработки методом конвекции.....	41
Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ.....	52
3.1. Экспериментальные установки для ультрафиолетовой обработки древесины.....	52
3.2. Исследование основных свойств модифицированной древесины.....	55
Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ МОДИФИКАЦИИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ.....	62
4.1. Исследование на гигроскопичность.....	64
4.2. Исследования на эффективность пропитки огнезащитными составами.....	69
4.3. Исследования на прочность клеевого шва.....	76
4.4. Анализ химических изменений в образцах древесины, прошедших обработку.....	80
Глава 5. ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ДРЕВЕСИНЫ.....	85
5.1. Промышленная реализация результатов исследования ТМД.....	85
5.2. Анализ экономической эффективности внедрения устройства термомодифицирования в котле-утилизаторе.....	89
5.3. Исследования, произведённые в кабельном канале тепловых электрических станций.....	91
5.4. Промышленная реализация результатов исследования древесины, облучённой УФ.....	96

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	107
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	110
ИДЕНТИФИКАТОРЫ.....	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	112
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	126
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Результаты аналитических исследований модифицированной древесины методом преобразования ИК-Фурье.....	127
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Протоколы испытаний на прочность клеевого шва.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Расчёты математической модели термомодифицированной древесины	139
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Коэффициенты в уравнении регрессии.....	141
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Акт внедрения	144

ВВЕДЕНИЕ

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 В.Н., 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 $7,4 \text{ кДж/м}^2$, 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 термодревесины 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» (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» (24 марта 2023 г, г. Москва), 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.

Глава 1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ МОДИФИКАЦИИ ДРЕВЕСНОГО МАТЕРИАЛА

1.1. Научные взгляды на теоретические основы процесса термической модификации древесины

За последние десятилетия эта тема стала доминирующей в области наук о древесине. В частности, в последнее время активно развивается термическая модификация, в основу которой заложена древняя практика воздействия на древесину огнём (обугливание). При этом к настоящему времени данная технология достигла промышленного масштаба с достаточно широким спектром использования и созданием новых функциональных материалов на основе термомодифицированной древесины.

Термическая модификация древесины реализуется в специализированных камерах при повышенных температурных режимах. Ключевые характеристики процесса включают:

- температурный диапазон: от 180 °С до 240 °С;
- отсутствие кислорода;
- продолжительность варьируется в зависимости от породы древесины и желаемых результатов.

Исследователи разрабатывают различные методики термомодифицирования, отличающиеся, прежде всего средой, в которой происходит обработка материала [61]. Многочисленные эксперименты демонстрируют, что именно среда обработки оказывает существенное влияние на конечные характеристики модифицированной древесины [57].

Среди наиболее распространённых сред для термомодифицирования можно выделить:

1. вода – проведение процессов термогидролиза;
2. масляная среда – обеспечивает равномерный прогрев;
3. инертные газы – гарантируют полное отсутствие окислительных процессов;

4. вакуум – позволяет снизить энергозатраты и ускорить процесс.

Пионерские работы в этом направлении были инициированы ещё в довоенное время, в 30-х годах XX столетия немецкими учёными, а впоследствии, в 40-е годы эстафету подхватили американские исследователи. Данные первоначальные научные изыскания привели к фундаментальному открытию: температурное воздействие в диапазоне 180 – 230 °С вызывает существенные трансформации в биологической структуре древесины, которые:

- меняют физико-механические характеристики материала;
- влияют на долговечность изделий;
- модифицируют эстетические свойства;
- необратимым образом преобразуют молекулярный состав древесины.

Современные научно-технические исследования направлены не только на совершенствование существующих технологий, но и на разработку принципиально новых подходов к термомодифицированию древесины. Особый акцент делается на создании оборудования, способного обеспечить высокую эффективность обработки при минимальных энергозатратах.

На современном этапе развития отрасли сформировался целый спектр технологических подходов к термической обработке древесины, каждый из которых имеет свои особенности и преимущества. Научно-технический прогресс в этой области подтверждается многочисленными исследованиями, отражёнными в работах [24, 29, 39, 45], которые демонстрируют растущий интерес к данной проблематике со стороны научного сообщества и промышленности.

Революционные изменения произошли в середине 1990-х годов, когда специалисты Финляндского Государственного Исследовательского Центра VTT разработали принципиально новый подход. Они предложили использовать водяной пар для создания среды с пониженным содержанием кислорода при термической обработке древесины. Эта инновация привела к созданию технологии Thermowood®, которая позволила предотвратить горение древесины во время высокотемпературной обработки, сохранить эстетичный внешний вид материала без почернения, улучшить физико-механические свойства обработанной

древесины [93].

Также прогрессивным является принцип работы немецкой технологии ОНТ [99]. Компания «Menz Holz GmbH & Co. KG» из Германии разработала уникальный метод термической обработки древесины, получивший название Oil Heat Treated (ОНТ). В отличие от традиционных методов, эта технология использует органические теплоносители высокой температуры в качестве основного рабочего агента.

Процесс термомодификации происходит следующим образом: предварительно высушенные деревянные заготовки помещаются в специальную камеру, полностью погружаются в нагретое растительное масло, температура постепенно повышается до диапазона 160 – 220 °С, общая продолжительность термической обработки может достигать 4 часов. Эта технология примечательна тем, что позволяет использовать различные типы растительных масел в качестве теплоносителей: льняное, подсолнечное, рапсовое и другие натуральные масла растительного происхождения.

Термомодификация может проводиться как в открытых ваннах, так и в специализированных камерах автоклавного типа, что позволяет регулировать давление в процессе обработки. Эта гибкость в выборе оборудования делает технологию ОНТ доступной для предприятий разного масштаба. Важно отметить, что точное соблюдение температурного режима и продолжительности обработки имеет критическое значение для достижения желаемых свойств древесины.

Технология термомодификации ОНТ сегодня считается одним из самых экологически чистых методов улучшения эксплуатационных характеристик древесины, поскольку использует исключительно натуральные материалы без вредных химических добавок. Однако использование растительных масел значительно удорожает процесс по сравнению с аналогами.

Технологии термической обработки древесины постоянно развиваются, предоставляя производителям широкий спектр возможностей для улучшения свойств материала. Рассмотрим различные аспекты этих процессов и их влияние на качество древесины.

Французская методология Via Perdyur [99] представляет собой инновационный подход, основанный на использовании естественных процессов:

- а) технология использует пар, который выделяется из самой древесины;
- б) процесс не требует дополнительных внешних источников влаги;
- в) парообразование происходит непосредственно при нагревании материала;
- г) технология считается более экологичной по сравнению с традиционными методами.

Известна также другая французская технология, включающая применение азотной среды для создания инертных условий, поддержание температурного режима в диапазоне 160 – 260 °С, при минимальной длительности обработки 22 часа.

Канадская технология термической обработки древесины характеризуется длительным производственным циклом, занимающим от 7 до 10 суток. Такой продолжительный процесс обеспечивает глубокое проникновение термического воздействия и стабильность полученных свойств материала.

Отечественный рынок термомодифицированной древесины находится в стадии активного развития. При этом развитие термомодификации древесины в России связано не только с освоением иностранных технологий, но и с разработкой собственных методов, учитывающих особенности отечественного сырья и климатических условий эксплуатации готовых изделий. ООО «Бикос» разработала собственный вариант технологии под названием «Bicos» (Barkett-Thermoholz). Это инновационное решение представляет собой многоступенчатую систему термомодификации древесины, проводимую при следующих условиях:

- повышенное давление водяного пара 16 кгс/см²;
- использование специальных камер автоклавного типа;
- отсутствие необходимости применения конвекционных сушильных камер.

Технология предусматривает проведение полного технологического цикла термомодификации в едином автоклаве, без перемещения материала между различными установками. Данный подход позволяет значительно оптимизировать производственный процесс, сокращает энергозатраты и минимизирует риски

повреждения материала при перегрузках.

Следует отметить, что выбор метода термомодификации напрямую зависит от целевого назначения древесины и её исходных свойств. Каждая технология имеет свои преимущества, которые проявляются при работе с определёнными породами и в конкретных условиях эксплуатации конечных изделий.

Современные исследования в области термомодификации древесины показывают взаимосвязь между термической обработкой и изменением физических свойств материала.

Исследования Беляковой Е.А. [65] убедительно демонстрируют, что термическое воздействие существенно влияет на механическую прочность древесных материалов. По мере повышения температуры обработки практически все показатели механической прочности обнаруживают выраженную тенденцию к снижению. Этот феномен требует особого внимания при выборе режимов термической модификации в зависимости от целевого назначения материала.

Значительный вклад в понимание тепловых характеристик термодревесины внёс Кайнов П.А. В своём исследовании [38] он представил данные, свидетельствующие о существенном изменении теплофизических параметров материала после высокотемпературной обработки. Примечательно, что увеличение температуры обработки приводит к заметному снижению как коэффициента теплопроводности, так и показателей температуропроводности древесины. Учёный Кайнов П.А. связывает наблюдаемые изменения теплофизических свойств с уменьшением плотности древесины в процессе термической модификации. Это объяснение представляется логичным, учитывая, что при высокотемпературной обработке происходит частичная деструкция компонентов клеточных стенок древесины.

Анализ научных работ в данной области позволяет сделать вывод о необходимости поиска баланса между желаемыми тепловыми характеристиками и механической прочностью при выборе режимов термической модификации древесины для конкретных случаев.

Важным аспектом исследований является изучение влияния

термомодифицирования на биостойкость древесины. Современные исследования в этой области деревообработки позволили значительно расширить представления о термомодифицированной древесине. Работы, включая труды Д.А. Ахметовой [65] и исследования Р.Р. Зиатдинова [40], внесли существенный вклад в понимание процессов, происходящих при термической обработке древесины.

Согласно исследованиям Разумова Е.Ю. [58] и Сафина Р.Р. [60], воздействие повышенных температур значительно изменяет химический состав древесины, что напрямую влияет на её биологическую устойчивость. Основным механизмом повышения сопротивляемости термодревесины к разрушению микроорганизмами заключается в существенном снижении содержания гемицеллюлоз и водорастворимых сахаров в структуре материала. Именно эти компоненты являются предпочтительной питательной средой для большинства дереворазрушающих грибов и бактерий.

В работе «Исследование термомодифицирования древесины в среде топочных газов» [62] авторы детально анализируют изменения, происходящие в структуре древесины при нагревании в специально созданной газовой среде. Данный метод позволяет не только повысить биостойкость материала, но и улучшить ряд других важных эксплуатационных характеристик.

В работе Разумова Е.Ю. [58] было выявлено влияние технологических режимных параметров термомодифицирования древесины на её механические характеристики после годовой выдержки во влажном грунте. Было установлено, что прочностные показатели натуральной древесины падают значительно интенсивнее, чем у термомодифицированной, что приводит к тому, что термодревесина через год выдержки в грунте превосходит натуральную древесину по прочности, хотя изначально уступала ей по данному показателю.

Особый интерес представляет разработанная технология производства влагостойкой фанеры из термомодифицированного шпона [71], где термическая обработка применяется на этапе подготовки сырья. Такой подход обеспечивает получение композиционных материалов с улучшенными показателями влагостойкости и долговечности, что расширяет возможности их применения в

различных отраслях строительства и промышленности.

Биостойкие характеристики термодревесины делают её особенно привлекательной для современного строительства и отделочных работ. Несмотря на определённое снижение прочностных показателей, этот материал остаётся перспективным как для конструкционного применения, так и для декоративных целей. Особенно важно отметить, что термическое модифицирование позволяет значительно увеличить сопротивляемость древесины к воздействию биологических агентов разрушения.

При анализе механических свойств материала обнаружено, что интенсивная термическая обработка приводит к существенным изменениям физико-механических характеристик. Так, при глубоких степенях термомодифицирования наблюдается снижение предела прочности при изгибе до 33 %, предела прочности при сжатии до 28 %, а ударная твёрдость может уменьшаться на величину до 36 % [60].

Данный компромисс между повышением биостойкости и снижением некоторых прочностных характеристик требует дальнейших исследований для оптимизации параметров термической обработки. Это особенно актуально для разработки новых стандартов и технологических режимов, которые позволят получать термодревесину с оптимальным соотношением биостойкости и механической прочности для различных областей применения.

При этом поиск новых решений и разработка новых технологий термомодифицирования древесины, обеспечивающих снижение энергетических затрат на проведения процесса, использования вторичного тепла, является актуальным направлением исследований. Одним из таких направлений исследования является использования отходящих газов котлоагрегатов на тепловых электрических станциях, работающих на газообразном топливе.

Таким образом, термомодификация древесины открывает новые перспективы для создания высококачественных биостойких материалов с расширенным сроком эксплуатации в условиях повышенной влажности и риска биологического поражения.

Однако, снижение гигроскопичности и смачиваемости термодревесины вызывает сложности при обработке огнезащитными составами, что является необходимым при эксплуатации деревянных конструкций. Поэтому в последние годы активно развивается такое направление исследований, как придание объёмно-термически модифицированной древесине поверхностной гидрофильности, которая обеспечивает улучшение склеиваемости и пропитки. В этом направлении ведутся исследования по применению низкотемпературной плазмы воздуха и воздействия озона [72].

В то же время известно влияние ультрафиолетового солнечного излучения на древесину, которое также способствует повышению смачиваемости. В этой связи целесообразно проанализировать исследования, касающиеся фотодegradации древесины.

1.2. Современные научные представления о принципах ультрафиолетовой обработки материалов

В современном мире ультрафиолетовые технологии претерпели колоссальную трансформацию, открывая новые горизонты в различных отраслях. Искусственные источники УФ-излучения совершили настоящий прорыв в научно-практической деятельности.

Отличительной особенностью современных ультрафиолетовых излучателей является их селективный спектральный профиль. В отличие от обычных осветительных приборов, каждый такой источник проектируется для обеспечения оптимальных параметров конкретного фотобиологического процесса, что многократно повышает эффективность применения.

Индустрия производства УФ-оборудования привлекает ведущих мировых производителей светотехники. Корпорация Philips, являясь одним из лидеров отрасли, предлагает потребителям ассортимент из более чем 80 разновидностей ультрафиолетовых ламп, удовлетворяющих разнообразные профессиональные потребности.

Разработка эритемных ламп началась в 1960-е годы как ответ на проблему дефицита ультрафиолетового излучения в жизни людей, особенно в регионах с ограниченным солнечным светом. Основная цель их создания заключалась в стимулировании синтеза витамина D₃ в человеческом организме путём компенсации так называемой «УФ-недостаточности», характерной для естественного освещения в некоторых географических зонах.

Примечательно, что спектральные характеристики эритемных ламп существенно отличаются от солнечного спектра. Их излучение преимущественно концентрируется в ультрафиолетовом диапазоне, причём до 20 % этого излучения может приходиться на волны короче 300 нанометров – диапазон, который практически отсутствует в естественных условиях земной поверхности благодаря защитным свойствам атмосферы.

Период наибольшего распространения эритемных ламп пришёлся на 1970-1980-е годы. В это время специально оборудованные помещения – «фотарии» – стали неотъемлемой частью программ здравоохранения для работников шахт и жителей северных регионов, где солнечного света традиционно недостаточно. Технология нашла применение не только в медицине человека, но и в животноводстве, где эритемные лампы использовались для обеспечения оптимального развития молодых сельскохозяйственных животных.

Сегодня с развитием безопасных альтернатив и пониманием потенциальных рисков УФ-излучения, эритемные лампы используются более избирательно, но их историческое значение в решении проблемы «световой недостаточности» остаётся важной главой в развитии профилактической медицины и биотехнологий.

Физическая природа ультрафиолетового излучения характеризуется специфическим диапазоном длин волн, находящимся между 100 и 400 нм. Международная комиссия по освещению (CIE) предложила структурированную классификацию, разделяющую ультрафиолетовый спектр на три основные категории в зависимости от длины волны излучения.

Длинноволновый ультрафиолет, известный как UV-A, охватывает спектральный диапазон от 315 до 400 нм. Средневолновой диапазон UV-B

включает излучение с длинами волн от 280 до 315 нм. Наиболее коротковолновой считается категория UV-C, охватывающая диапазон от 100 до 280 нм.

Ранние научно-исследовательские разработки в области ультрафиолетовых технологий были сосредоточены преимущественно на использовании бактерицидных свойств этого вида излучения, что обусловило его первоначальное применение в медицинской сфере для стерилизации помещений и инструментов. Со временем спектр использования ультрафиолетового излучения значительно расширился.

В настоящее время технологии, основанные на ультрафиолетовом излучении, активно внедряются в таких областях, как косметология (лечение заболеваний кожи, процедуры фототерапии), полиграфия (закрепление красок и покрытий), банковское дело (проверка подлинности документов и купюр), криминалистика (обнаружение следов преступлений) и многих других сферах деятельности. Это свидетельствует о значительном потенциале ультрафиолетовых технологий в решении широкого спектра практических задач современного общества.

Газоразрядная технология, используемая в производстве УФ-ламп, базируется на взаимодействии электрического тока и паров металлов. Электромагнитные разряды, проходя через парообразную ртуть, заключённую в специальную колбу, провоцируют выделение ультрафиолетовых волн определённой частоты.

Трубки таких ламп изготавливаются из кварцевого или увиолевого стекла – материалов, обладающих высокой проницаемостью для ультрафиолетового спектра. Выбор материала колбы существенно влияет на экологические параметры изделия.

Увиолевое стекло способно минимизировать генерацию озона, возникающего как побочный результат работы ультрафиолетовых источников. Это свойство приобретает особую значимость в контексте безопасности, поскольку повышенная концентрация озона может оказывать негативное воздействие на дыхательную систему человека и вызывать различные патологические состояния.

Исследования в области бактерицидного действия УФ-излучения показывают, что максимальная эффективность воздействия на патогенные микроорганизмы достигается в определённом диапазоне ультрафиолетового спектра. В спектральном диапазоне 205 – 315 нм наблюдается различная степень бактерицидной активности, которая может быть охарактеризована как относительная спектральная бактерицидная эффективность.

Удивительно точное соответствие наблюдается между излучением ламп низкого давления и оптимальными длинами волн для инактивации микроорганизмов. Спектральный анализ в таблице 1.1 демонстрирует, что эти лампы генерируют излучение преимущественно с длиной волны 265 нм, что идеально согласуется с пиковыми показателями кривой бактерицидной эффективности (S_λ).

Таблица 1.1 – Бактерицидная эффективность

λ , нм	S_λ	λ , нм	S_λ
205	0,0000	260	0,950
210	0,009	265	1,000
215	0,066	270	0,980
220	0,160	275	0,900
225	0,260	280	0,760
230	0,360	285	0,540
235	0,460	290	0,330
240	0,560	295	0,150
245	0,660	300	0,030
250	0,760	305	0,006
255	0,860	310	0,001
–	–	315	0,000

По этим данным максимум бактерицидного действия приходится на длину волны 265 нм согласно последним публикациям [40], а не 254 нм, как считалось ранее.

Такое совпадение не случайно, поскольку именно на этой длине волны происходит максимально эффективное поглощение ультрафиолетовых лучей молекулами ДНК микроорганизмов. Это критически важный механизм дезинфекции, основанный на способности УФ-излучения разрушать генетический

материал патогенов, предотвращая их размножение.

Стоит отметить, что относительная бактерицидная эффективность существенно варьируется в пределах всего УФ-диапазона, достигая пика именно в области, соответствующей излучению ламп низкого давления. Это обстоятельство делает такие лампы особенно ценными в системах обеззараживания воды, воздуха и поверхностей, где требуется максимальная эффективность при минимальных энергозатратах.

Ультрафиолетовое излучение представляет серьёзную угрозу для живых организмов, разрушая их на молекулярном уровне. Применительно к древесине УФ-излучение является одним из ключевых факторов, который приводит к её ускоренному старению и разрушению. Длительное воздействие UV-лучей вызывает выцветание, потерю прочности и изменение структуры деревянных изделий.

1.3. Структура древесины

Древесина – это природный полимерный композит, являющийся строительным материалом, который обладает высоким соотношением прочности и плотности. Благодаря особому строению древесные ткани наделены определёнными механическими и физическими свойствами. Эти преимущества делают древесину простой в обработке и широко используемой в качестве конструкционного материала [27].

В древесине можно выделить два типа веществ: структурные и неструктурные. Основную часть древесины составляют структурные компоненты – строительные материалы клеточных стенок. Они не растворяются в воде при обычных условиях. К основным компонентам древесины относятся три вещества: целлюлоза, гемицеллюлозы и лигнин. Они образуют стенки клеток и являются природными полимерами (рис.1.1).

Целлюлоза – это природный структурный полимер, который составляет 40 – 50 % сухой массы древесины. Она служит основой (каркасом, сеткой-матрицей) для клеточных стенок. Гемицеллюлозы – это группа нецеллюлозных

структурных полисахаридов.

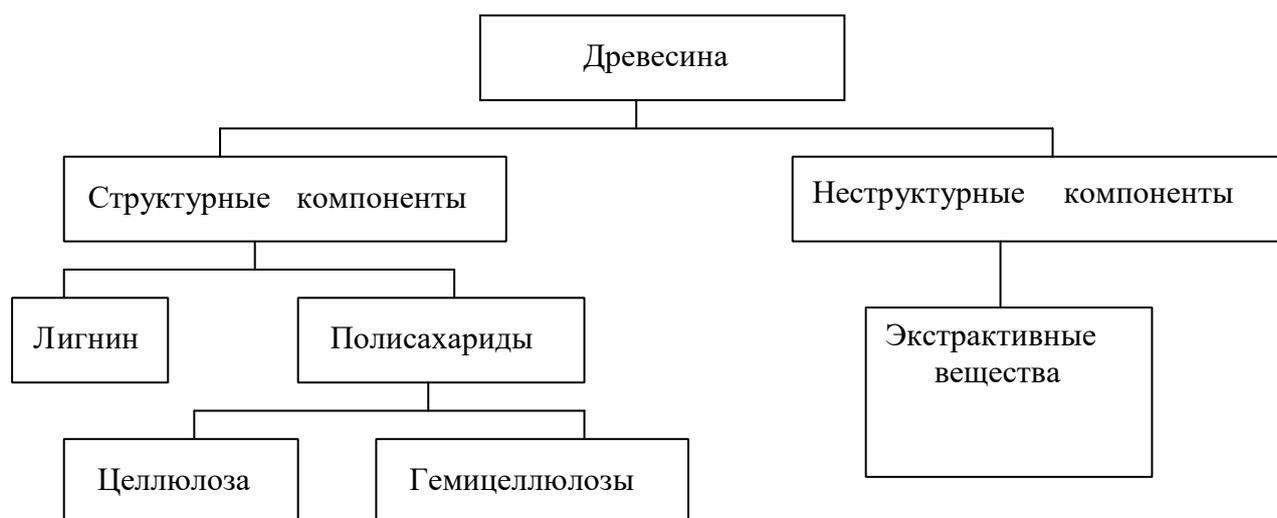


Рисунок 1.1 – Химический состав древесины

Вместе с целлюлозой они образуют клеточные стенки. Комплекс полисахаридов древесины, включающий целлюлозу и гемицеллюлозы, называется холоцеллюлозой. Лигнин – это природный полимер ароматического ряда. Он пропитывает целлюлозную сетку-матрицу в составе клеточной стенки. Лигнин (от лат. *lignum* - дерево, древесина) представляет собой природный полимер, соединяющий одревесневшие стенки растительных клеток. Содержится в клетках сосудистых растений и некоторых водорослей. Древесина хвойных пород содержит 23 – 50 % лигнина [2]. При анализе древесины лигнин рассматривают как негидролизуемую часть древесины (рис.1.2).

Клеточные стенки растений состоят из мёртвых клеток, которые по своей микроструктуре напоминают железобетон. Микрофибриллы целлюлозы выступают в качестве армирования, а лигнин, обладающий высокой прочностью на сжатие, служит аналогом бетона. Лигнин, который содержится в клеточных стенках и межклеточном пространстве, связывает волокна целлюлозы воедино. Вместе с гемицеллюлозой он обеспечивает механическую прочность стволов растений. Кроме того, лигнин действует как мембрана, снижая проницаемость клеточных стенок для воды и питательных веществ.

Целлюлоза и гемицеллюлоза обладают способностью поглощать лишь

небольшую часть ультрафиолетового излучения, составляющую от 5 до 15 %.

В тоже время лигнин, благодаря наличию хромофоров и ароматических колец, поглощает до 80 – 95 % УФ-излучения, что делает его более восприимчивым к фотоокислению и последующему разложению. Под воздействием ультрафиолетового излучения в лигнине происходят три химические реакции: дегидрирование, дегидроксиметилирование, деметоксилирование.

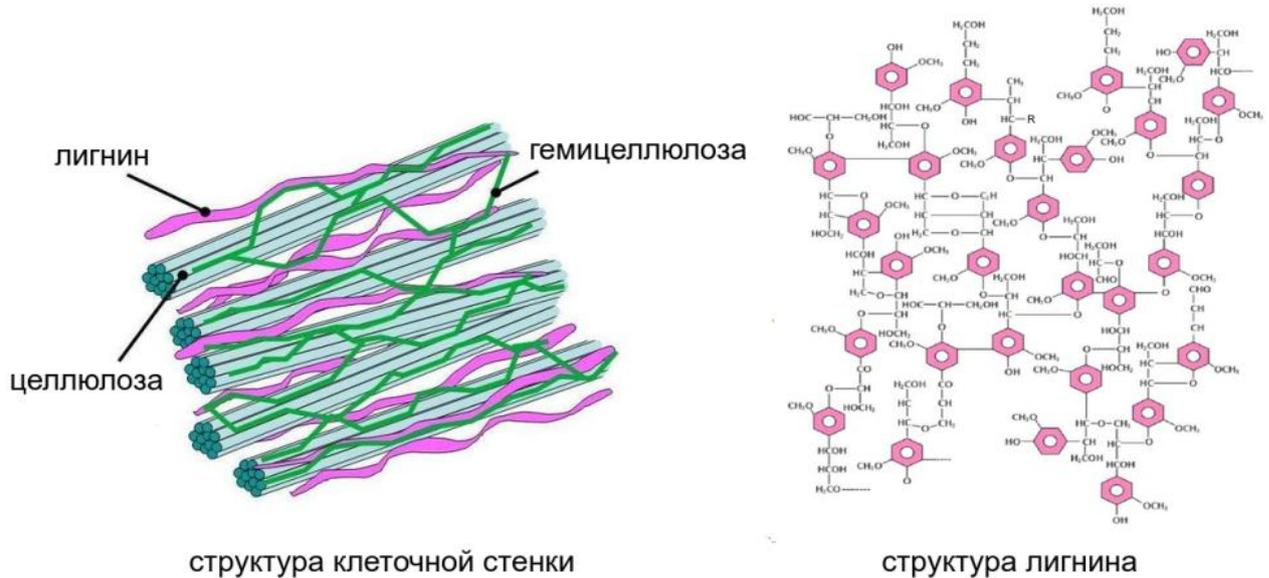


Рисунок 1.2 – Фрагмент разветвлённой молекулы лигнина

Образование свободных радикалов запускает процесс УФ-деградации, который приводит к окислению фенольных гидроксильных групп в структуре лигнина. Свободные фенольные радикалы образуются непосредственно под воздействием УФ-излучения. Делокализация радикалов способствует образованию о- и р-хиноноидных структур после деметилирования и расщепления боковой цепи [70].

Как видно из рисунка 1.3, новообразованные карбонильные группы в о- и р-хиноноидах представляют собой хромофорные группы, которые вызывают значительные изменения цвета поверхности древесины.

Помимо лигнина, экстрактивные вещества также подвержены УФ-разложению. Типы и содержание экстрактивных веществ существенно влияют на цвет, запах и биологическую долговечность древесины [73]. Подобно лигнину, экстрактивные вещества также претерпевают структурные изменения после

воздействия ультрафиолета, способствуя обесцвечиванию древесины [40].

На рисунке 1.4 показаны изображения структуры образцов до (слева) и после (справа) их облучения ультрафиолетом. Воздействие света вызывает появление микроскопических трещин, что приводит к потере клетками прочности связей с соседними клетками на поверхности древесины за счёт разложения лигнина.

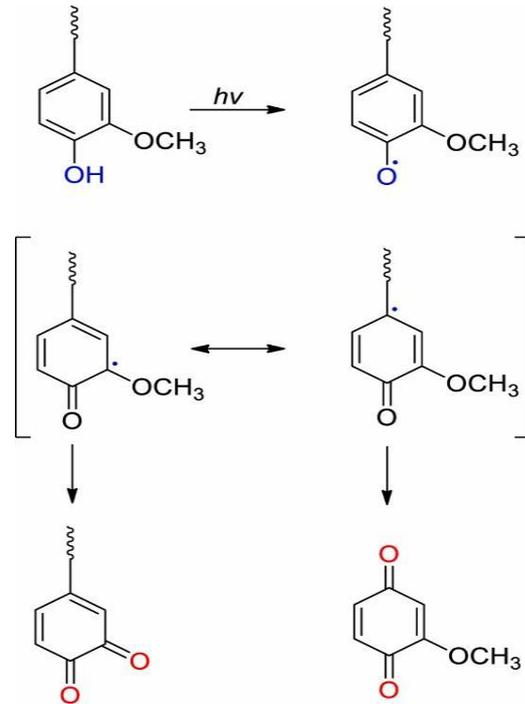


Рисунок 1.3 – Образование о- и р-хиноноидных структур в результате УФ-разложения лигнина

Наиболее заметные изменения приводит к образованию микротрещин и разрушению различных слоёв клеточной стенки. Эти микроскопические изменения сопровождаются изменением окраски и химическими превращениями древесины в процессе её разложения.

Глубина проникновения УФ- и видимого излучения в древесину невелика, поэтому изменения ограничиваются неглубоким поверхностным слоем. УФ-излучение полностью поглощается слоем древесины толщиной от 75 до 80 мкм [64]. Воздействие УФ-облучения на полисахариды усиливает химические реакции из-за фотоокислительного разложения. Квантовая энергия, связанная с этим процессом, может разрушать многие химические связи, присутствующие в компонентах

древесины (углерод – углерод, углерод – кислород, углерод –водородные связи) [73]. Свободные радикалы являются основными фотохимическими продуктами, образующимися в результате этого гомолитического процесса, что может вызвать деполимеризацию и образование хромофорных групп, включая карбонилы, карбоксилы, хиноны, пероксиды, гидропероксиды и сопряжённые двойные связи, как с участием кислорода и воды, так и без них.

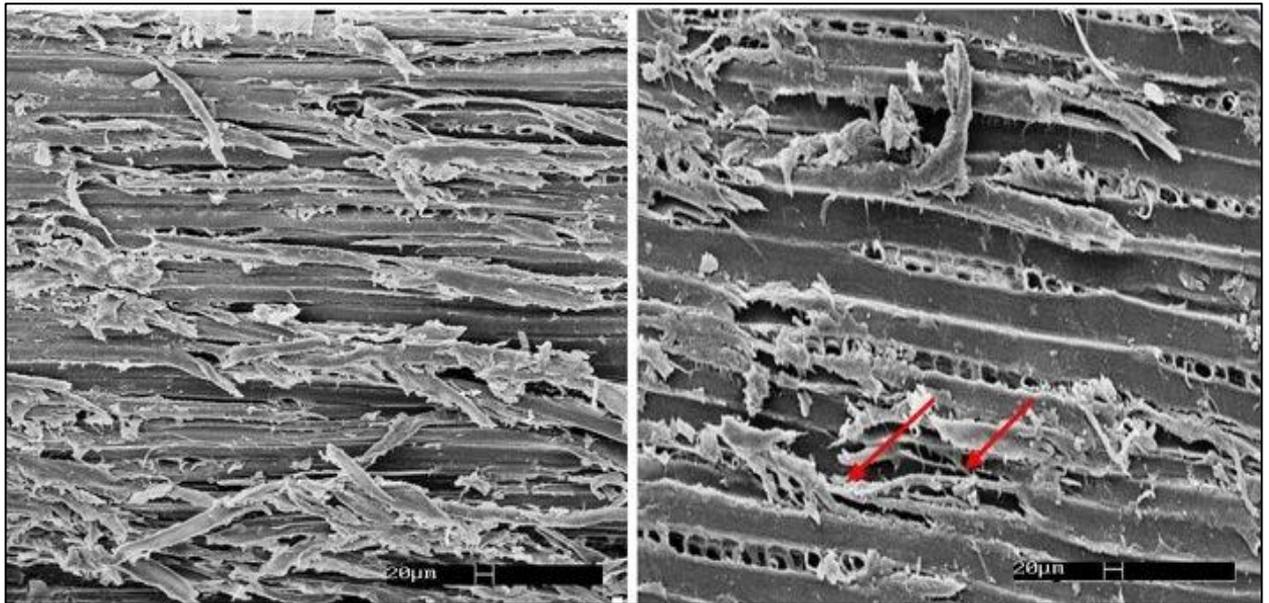


Рисунок 1.4 – Микроструктура образцов древесины до (слева) и после (справа) УФ-облучения сосны (стрелками показаны микротрещины в структуре древесины)

Ультрафиолетовое излучение (УФ) является одним из главных факторов, ускоряющих процессы старения и деградации древесины. Это излучение влияет на изменение физических, химических и оптических свойств материала, что в конечном итоге влияет на его прочность, цвет и долговечность.

Древесина под воздействием ультрафиолетового излучения подвергается фотоокислению, что приводит к разрушению целлюлозы и лигнина – основных компонентов древесных материалов. Лигнин, поглощая УФ-излучение, претерпевает фотохимические реакции, в результате которых образуются свободные радикалы. Эти радикалы инициируют дальнейшую цепную реакцию окисления, что приводит к потере механической прочности и изменению цвета древесины.

Цветовые изменения, вызванные УФ-излучением, обычно проявляются в виде потемнения или, в некоторых случаях, серого выцветания. При длительном воздействии УФ-лучей на дерево, особенно на открытом воздухе, происходит значительное увеличение шероховатости поверхности, что обусловлено микро-разрушением верхнего слоя материала [80].

Влияние УФ-излучения на древесину часто усугубляется в сочетании с другими атмосферными воздействиями, такими как влажность и температурные перепады. Это синергическое воздействие ускоряет процессы деградации, чему способствует также входящая в состав древесины вода, активирующая гидролиз лигнина и целлюлозы.

С течением времени повреждения, вызванные УФ-излучением, могут привести к значительным функциональным нарушениям древесины, что потребует дополнительных методов обработки и защиты материала. Важным аспектом в области защиты древесины от воздействия УФ-излучения является использование покрытий, содержащих УФ-стабилизаторы, поглотители УФ-света или отражающие частицы, которые могут значительно продлить срок службы и сохранить внешний вид деревянных конструкций.

Исследования показывают, что своевременная и правильно организованная защита может не только замедлить процессы деградации под влиянием УФ, но и способствовать сохранению первоначальных свойств древесины на длительное время. Однако выбор метода защиты должен учитывать тип древесины и условия её эксплуатации.

Одним из популярных методов защиты древесины от УФ-лучей является применение прозрачных или тонированных лаков, содержащих УФ-фильтры. Такие покрытия не только улучшают внешний вид древесины, но и обеспечивают её дополнительную защиту от ультрафиолета и погодных условий. Разработаны также специальные добавки, которые можно вводить в лакокрасочные материалы. Эти добавки позволяют увеличить стойкость покрытия к УФ-излучению и продлить срок службы древесины.

В линейке современных УФ-стабилизаторов лидирующие позиции занимают

соединения класса бензотриазолов и различные галогениды. Популярность этих веществ обусловлена их исключительной способностью перехватывать ультрафиолетовые лучи широкого диапазона длин волн, обеспечивая комплексную защиту материала.

Применение нанотехнологий также открывает новые возможности в защите древесины от УФ-лучей. Нано-покрытия могут формировать на поверхности древесины экстремально тонкий, но очень эффективный барьер, который способен отражать ультрафиолетовые лучи и предотвращать их вредное воздействие. Эти покрытия часто содержат оксиды цинка или титана, которые известны своими УФ-защитными свойствами [134].

Параллельно традиционным методам активно развивается нанотехнологическое направление в защите древесины. Интеграция наноразмерных частиц в защитные композиции представляет собой качественно новый подход к решению проблемы УФ-деградации. Наночастицы диоксида титана и оксида цинка, внедрённые в состав лакокрасочных материалов, образуют многофункциональный защитный слой на поверхности древесины.

Уникальность наночастиц состоит не только в их выдающихся УФ-блокирующих характеристиках, но и в дополнительных функциональных свойствах. При воздействии ультрафиолета эти наноматериалы проявляют фотокаталитическую активность, способствуя разложению органических загрязнений и патогенных микроорганизмов на поверхности древесины. Таким образом, нанотехнологические покрытия обеспечивают многоуровневую защиту, одновременно противодействуя ультрафиолетовому излучению, микробному заражению и загрязнению.

Исследования последних лет показывают, что комбинированное применение различных защитных технологий позволяет достичь синергетического эффекта, существенно повышая долговечность древесных материалов в условиях интенсивного солнечного излучения. В современном строительстве и деревообработке защита древесины от разрушительного воздействия окружающей среды приобретает всё большую актуальность. Наряду с традиционными

химическими методами, физические способы защиты древесины от ультрафиолетового излучения демонстрируют высокую эффективность и экологическую безопасность.

Развитие индустрии защиты древесины движется в направлении создания интегрированных систем, сочетающих преимущества различных подходов и нивелирующих их отдельные недостатки, что открывает новые возможности для расширения сферы применения деревянных конструкций в условиях воздействия агрессивных факторов окружающей среды.

Важно понимать, что существующие технологии защиты имеют свои ограничения. Ни один из современных методов не способен обеспечить абсолютную защиту деревянных поверхностей от всего спектра разрушительных воздействий окружающей среды. Это связано с многофакторностью процессов выветривания и старения древесины, что требует комплексного подхода в вопросах защиты древесины. Одним из таких комплексных подходов, в частности, является комбинация объёмной термической обработки с поверхностной огнебиозащитой.

При этом, анализ литературы показал, что влияние УФ-излучения на древесину достаточно хорошо изучено с позиции фотодеградаци, как негативного фактора воздействия окружающей среды на материал. При этом практически отсутствуют исследования УФ-воздействия, как метода направленной модификации поверхности древесины и термодревесины, в частности, как метода предварительной обработки перед процессом пропитки. Известно, что при всех достоинствах деревянные конструкции нуждаются в тщательной защите от источников повышенной температуры искусственного или техногенного характера, особенно при эксплуатации на промышленных предприятиях.

1.4. Обеспечение пожарной безопасности деревянных строительных конструкций

Использование древесины в качестве строительного материала является

актуальным даже в том случае, когда здание возводится с использованием других строительных материалов. При изготовлении внутренних дверных рам, перекрытий, крыш часто используют именно древесину. Благодаря хорошим физико-механическим свойствам древесина применяется для изготовления несущих и ограждающих конструкций и при строительстве крупных конструкций, таких как стены, потолки и полы.

Древесные конструкции имеют недостатки, обусловленные природным происхождением, такие как биологическое поражение, высокая гигроскопичность, высокая пожарная опасность [39]. Для повышения срока эксплуатации несущих и ограждающих деревянных конструкций и обеспечения требуемого уровня пожарной безопасности применяются средства огнебиозащиты.

К огнезащитным средствам относятся вспучивающиеся краски, а также огнезащитные средства и огнебиозащитные составы для поверхностной и глубокой пропитки изделий из древесины. При этом важным вопросом, связанным с использованием огнезащитного состава, является определение наличия антипиренов на деревянных строительных изделиях при осуществлении надзора за соблюдением требований пожарной безопасности на предприятии, а также при расследовании пожаров.

Согласно ГОСТ 53292-2009 «Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на её основе» необходимо соблюдать технологию обработки огнезащитным составом и осуществлять контроль качества выполняемых работ [16]. Особое внимание заслуживает защита деревянных конструкций промышленных зданий, находящихся в эксплуатации. Как известно, на сегодняшний день больше половины производственных зданий и сооружений промышленных предприятий являются постройками прошлого века и включают деревянные конструкции (перекрытия, несъёмная опалубка, полы). Они пригодны к эксплуатации при проведении качественных мероприятий по защите и повышению их огнестойкости. Определённую трудность при этом вызывают способы защиты от пожарной опасности деревянных конструкций,

уже находящихся в эксплуатации.

В число основных задач огнезащиты строительных конструкций входят: предотвращение загорания, прекращение развития начальной стадии пожара, создание «пассивной» локализации пожара, ослабление опасных факторов пожара [39, 41]. Огнезащита конструкций является составной частью общей системы мероприятий по обеспечению пожарной безопасности и огнестойкости зданий и инженерных сооружений. Она направлена на снижение пожарной опасности конструкций, обеспечение требуемых пределов их огнестойкости.

Технические методы предотвращения возгораний дополняются физическими и химическими средствами, которые в комплексе минимизируют риски возникновения пожарных ситуаций. Формирование эффективных тепловых экранов на поверхностях конструктивных элементов является одной из ключевых технологий в современной системе огнезащиты.

Специальные огнезащитные составы и материалы, разработанные с применением инновационных технологий, интегрируются в конструктивные решения на этапе проектирования. Это обеспечивает повышенную огнестойкость объектов и создаёт дополнительный уровень безопасности.

Глубинная пропитка деревянных элементов специализированными огнестойкими составами представляет собой ещё один действенный метод защиты. Антипирены, проникающие в структуру древесины, замедляют процесс термической деградации материала, уменьшая интенсивность выделения воспламеняющихся газов и способствуя формированию защитного карбонизированного слоя при воздействии высоких температур.

Глубина проникновения огнезащитных составов определяется как свойствами этих составов, так и свойствами древесины, на которую наносится состав. Успешная защита деревянных конструкций от огня зависит от множества взаимосвязанных факторов. Пористость, влажность и плотность древесного материала существенно влияют на эффективность проникновения огнезащитных пропиток.

Особую роль играют показатели межфазного взаимодействия и образования

стойких химических связей или межмолекулярного взаимодействия между древесиной и защитным составом, что обеспечивает как физическое проникновение состава в структуру древесины, так и надёжную долгосрочную защиту.

Исследователи выделяют восемь разнообразных методов пропитки древесины, каждый из которых предназначен для определённого класса защиты древесных изделий, используемых в различных условиях эксплуатации. Для придания древесине нужного уровня защиты (от 1 до 8 класса) чаще всего применяют метод поверхностного нанесения. Такой подход позволяет наносить пропитку кистью или опрыскиванием на древесину, сохранив влажность материала не более 30 %.

Метод вымачивания, обеспечивающий 8 – 12 уровней защиты, значительно отличается от простого нанесения на поверхность за счёт увеличенного времени, которое изделие проводит в пропиточном составе. Время выдержки зависит от степени проницаемости древесины (легко-, умеренно- или труднопроницаемые). Пропитывающая жидкость проникает в структуру древесины через морфологические элементы, такие как капилляры, сердцевинные лучи, поры, сосуды и трахеиды.

Диффузионный метод близок к этому способу, но отличается поверхностным нанесением в несколько слоёв. Пропитка дерева данным методом требует значительного времени и характеризуется низкой эффективностью. Также необходимо учитывать, что применение этого метода возможно только при использовании пропиточных составов с высокой вязкостью при комнатной температуре.

Существует два основных метода «горячей» обработки древесины. Первый метод заключается в пропитке древесины в горячем растворе, за которым следует выдерживание материала в контейнере до полного остывания пропиточной жидкости. Другой метод предполагает пропитку древесины в контейнере с горячим составом, а затем перемещение пропитанного материала в ванну с холодным раствором. Этот способ обеспечивает надёжную защиту древесины различных

классов и может быть применён с различными пропиточными составами при изменении времени выдерживания в ваннах, температуры и начальной влажности изделий из древесины. Процесс пропитки древесины осуществляется посредством резкого перепада температур и создания отрицательного давления в нагретой до высокой температуры (100 – 140 °С) древесине. Этот процесс стимулирует активное впитывание пропиточной жидкости древесиной за счёт разницы в давлениях.

Для защиты изделий из древесины высокого качества часто используется метод автоклавной пропитки. Его ключевой особенностью является применение повышенного давления для увеличения эффективности и глубины пропитки. Различают несколько методов автоклавной пропитки, такие как автоклавнодиффузионный, автоклавный метод с обработкой в вакууме и под давлением, а также метод с применением вакуума, атмосферного давления и вакуума.

Таким образом, существующие технологии огнезащиты древесины основаны на повышении эффективности путём использования перепада давления и снижения вязкости защитного состава. В плане предварительной подготовки древесины к пропитке выделяют только предварительную сушку до влажности 30 % (за исключением случаев диффузионной пропитки) и накалывание труднопропитываемых пород древесины для увеличения глубины пропитки.

Однако методов и исследований, посвящённых повышению эффективности пропитки за счёт улучшения смачиваемости материала, найдено не было. В связи с этим исследования, посвящённые изучению УФ-облучения материала, как метода предварительной обработки древесины и термомодифицированной древесины перед пропиткой с целью повышения поверхностной смачиваемости, являются актуальными в научном и практическом плане.

Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАНИЯ МАССИВНОЙ ДРЕВЕСИНЫ В СРЕДЕ «УХОДЯЩИХ» ГАЗОВ КОТЛОАГРЕГАТОВ ТЭС

2.1. Исследование процесса термомодифицирования древесины в среде «уходящих» газов котлов-утилизаторов

Термическое модифицирование позволяет изменить химическое строение и структуру древесины [61]. Исходя из этого в работе исследован конвективный метод термообработки древесины. Выбор данного способа модифицирования материала связан с тем, что при конвективном подводе тепла создаётся интенсивный и равномерный нагрев древесного сырья, а также отмечается снижение коробления [63].

В современной энергетике эффективное использование топливных ресурсов становится всё более приоритетным направлением. Парогазовые установки (ПГУ) представляют собой инновационное решение для повышения коэффициента полезного действия тепловых электростанций. В центре этой технологии находится котёл-утилизатор – устройство, обеспечивающее максимальное извлечение энергии из отработанных газов.

Котёл-утилизатор функционирует как связующее звено между газотурбинной и паротурбинной частями ПГУ на тепловых электростанциях. Его основная задача заключается в рекуперации тепловой энергии выхлопных газов газовых турбин, которые имеют температуру порядка 450 – 650 °С. Без этого компонента значительная часть энергии просто выбрасывалась бы в атмосферу, существенно снижая показатели эффективности всей установки.

Конструктивно котёл-утилизатор представляет собой сложную систему теплообменных поверхностей. Он включает экономайзеры, испарители, пароперегреватели и, в некоторых случаях, промежуточные пароперегреватели. Такая структура позволяет поэтапно извлекать тепло из потока отработанных газов и передавать его воде и пару в паровом цикле.

Интеграция котла-утилизатора в ПГУ позволила довести КПД до 58 – 60 %,

что значительно превышает эффективность традиционных паросиловых установок, где этот показатель редко достигает 40 – 42 %. Это стало возможно благодаря комбинированию высокотемпературного газового цикла с паровым циклом низкого давления.

Однако несмотря на значительную эффективность котлов-утилизаторов температура «уходящих» газов остаётся достаточно высокой, что позволяет использовать их для проведения процесса термомодифицирования древесины, способствуя, тем самым, диверсификации услуг, представляемых ТЭС, и повышению эффективности использования тепловой энергии.

Для исследования процесса термического модифицирования древесного материала было выполнено погружение в среду «уходящих» газов энергетического котла-утилизатора типа Е-114/16-8,1/0,8-537/218-3,8вв с естественной циркуляцией, с вертикальным расположением труб поверхностей нагрева с отсутствием кислорода при температуре от 180 °С до 240 °С.

Утилизационный котёл в составе парогазовой установки, представленный на рисунке 2.1, использует тепло отработанных газов газотурбинной установки для производства пара двух типов. Генерируется высокотемпературный пар под высоким давлением (535°– 545 °С) и низконапорный пар с температурой 218 °С. Также происходит нагрев сетевой воды в специальном теплообменнике. Этот энергоблок ПГУ обеспечивает комбинированную выработку – 110 МВт электроэнергии и 74 Гкал тепловой мощности, что позволяет одновременно получать как электричество, так и тепло в форме горячей воды.

На заводе ЭМАльянс (известном также как Таганрогский котельный завод) произведены котлы-утилизаторы с данной маркировкой. Данное оборудование имеет естественную циркуляцию, что отражено в обозначении «Е». Контур низкого давления обеспечивает выработку 16 т/ч пара с абсолютным давлением 0,7 МПа. Система высокого давления производит значительно больше – 114 т/ч пара с абсолютным давлением на выходе 8,1 МПа. Производитель гарантирует температуру пара на выходе из высокотемпературного контура 535 °С.

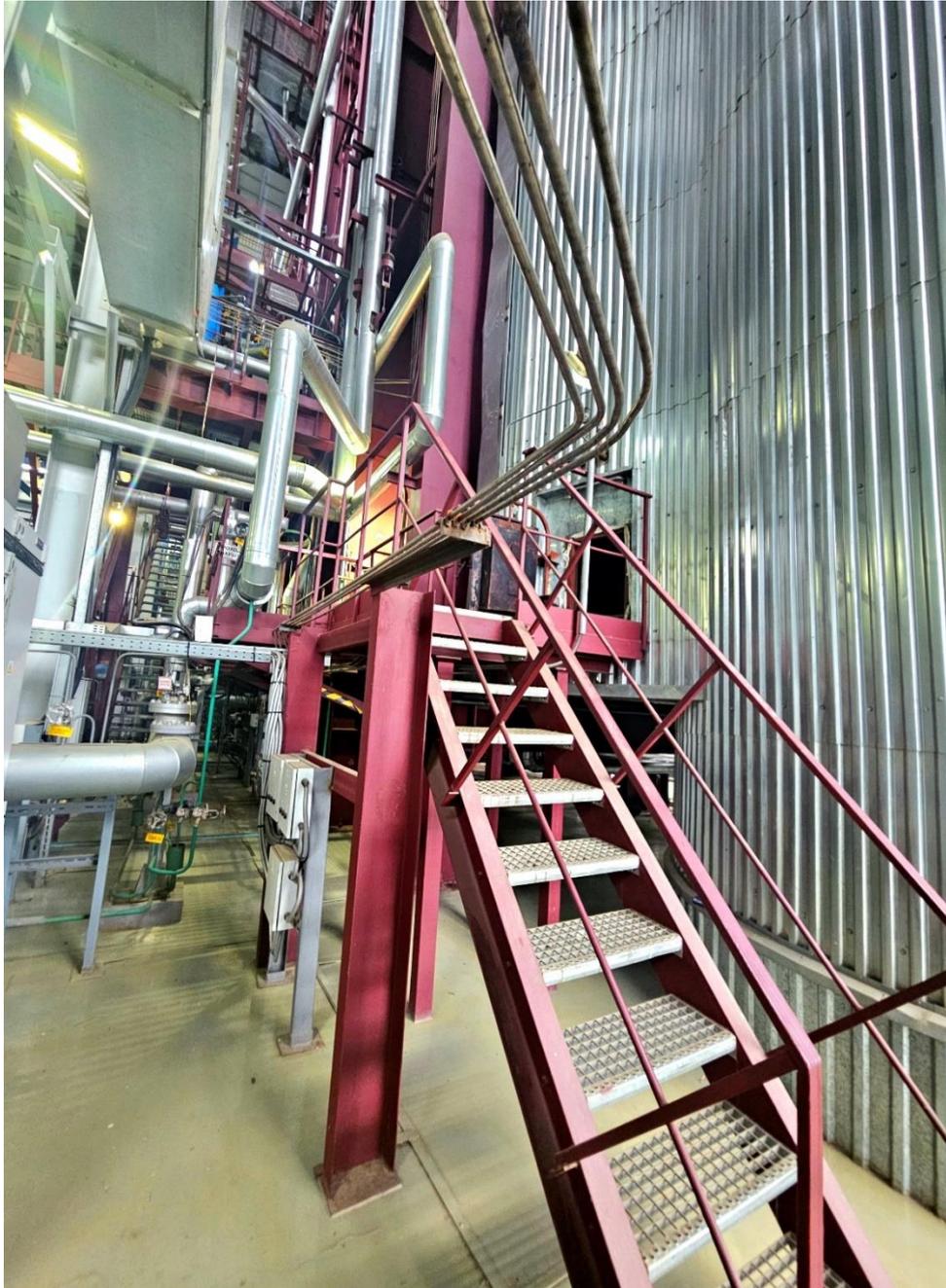


Рисунок 2.1 – Фото котла-утилизатора

Горизонтальная конструкция котла-утилизатора Е-114/16-8,1/0,8-537/218-3,8вв оборудована вертикально размещёнными трубами нагревательных поверхностей и функционирует на базе естественной циркуляции с двумя уровнями давления. В маркировке оборудования число «218» указывает на температуру пара (в °С), гарантированную на выходе из низкого контура давления. Коэффициент «3,8вв» отражает предельную тепловую производительность (в мегаваттах) водо-водяного теплообменного блока, включённого в систему котла-утилизатора.

Конструктивно нагревательные элементы котла организованы в пять последовательных модульных блоков, расположенных соответственно направлению потока газов.

Структура включает пять блоков: первый блок содержит пароперегреватель высокого давления ППВД-1 и ППВД-2, во второй входит только испаритель высокого давления – ИВД, третий объединяет пароперегреватель низкого давления – ППНД с экономайзером высокого давления – ЭВД-2, в четвёртом размещены испаритель низкого давления ИНД и ЭВД-1, а пятый блок представлен исключительно газовым подогревателем конденсата ГПК. Температура газов в районе ГПК варьируется от 160 °С до 240 °С, поэтому в данной зоне может проводиться термомодифицирование пиломатериалов (рис. 2.2).

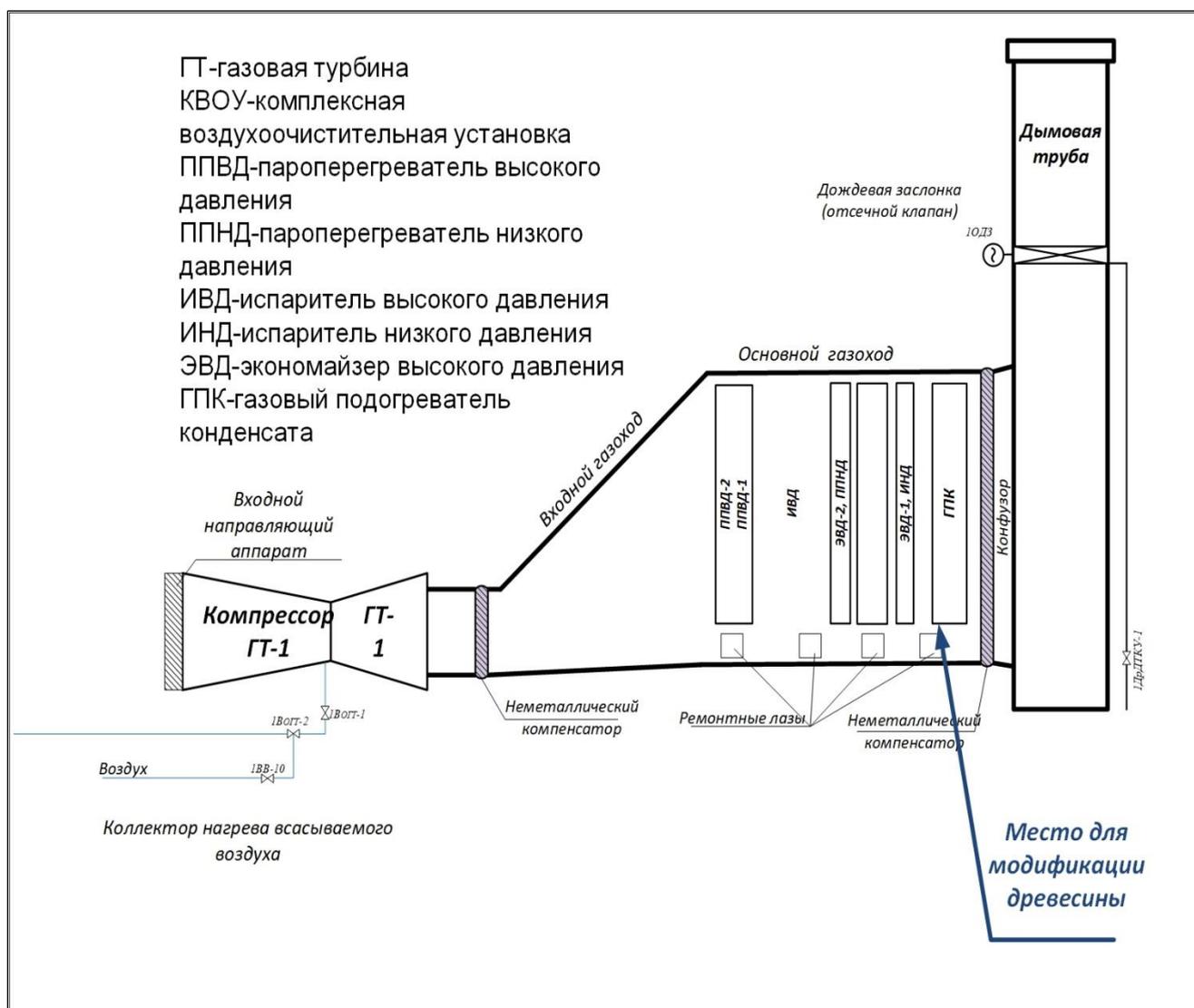


Рисунок 2.2 – Схема газового котла утилизатора

При работе в неотапительный период и при малых нагрузках на котле-утилизаторе повышается температура «уходящих» газов: температура за поверхностями нагрева с 155 °С до 225 °С, для повышения экономичности предлагается использовать качественный отбор топочных газов из модуля 5 для проведения операций по термомодифицированию древесины. На рисунке 2.3 показан контейнер для проведения экспериментальных работ по термомодифицированию образцов сосны.



Рисунок 2.3 – Контейнер для термомодифицирования образцов

Для проведения эксперимента был изготовлен контейнер с размерами 350x250 мм из перфорированного листа металла марки 12Х18Н10Т для погружения в котёл-утилизатор образцов (рис.2.4). Для этого после загрузки образцов древесины в контейнер, последний помещался в конвективную часть энергетического котла с соответствующей температурой «уходящих» газов для проведения эксперимента, модуль 5 – в район газового подогревателя конденсата.

Изменение температуры «уходящих» газов в котле-утилизаторе блока 5 производилось регулированием задания установленной мощности и нагрузки парогазовой установки от 110 до 80 МВт (метод перераспределения тепла с паровой турбины).

После стабилизации температуры в контрольной точке на заданных значениях 200, 220 и 240 °С контейнер с образцами погружали в

экспериментальную камеру, которая помещалась в модуль котла-утилизатора, далее выставлялся таймер на 2, 3 и 4 часа соответственно. Через определённое время контейнер с образцами выгружался из котла и производился режим естественного отпуска образцов в герметичных условиях.

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

В начале древесные бруски были подвергнуты сушке при температуре 60 °С в течении 5 суток, что обеспечило равномерное распределение влажности по сечению образцов в интервале 5 – 6 %.



Рисунок 2.4 – Модуль для загрузки образцов для ТМД

Перед началом эксперимента все образцы взвешивали для определения средней плотности всей партии. До дальнейших экспериментов были допущены образцы с отклонением их плотности от среднего значения по всей партии не более 1 %.

Удовлетворяющие всем требованиям образцы были разбиты на четыре

группы для проведения соответственно трёх серий экспериментов по термической обработке при температурах 200, 220 и 240 °С.

У полученных образцов определяли плотность. Для этого образцы взвешивали на высокоточных весах с погрешностью 0,02 гр и замерялись с помощью штангенциркуля.

На рисунках 2.5-2.7 представлены графики с результатами экспериментальных исследований изменения плотности термообработанных древесных брусков в зависимости от температуры и продолжительности термомодифицирования.

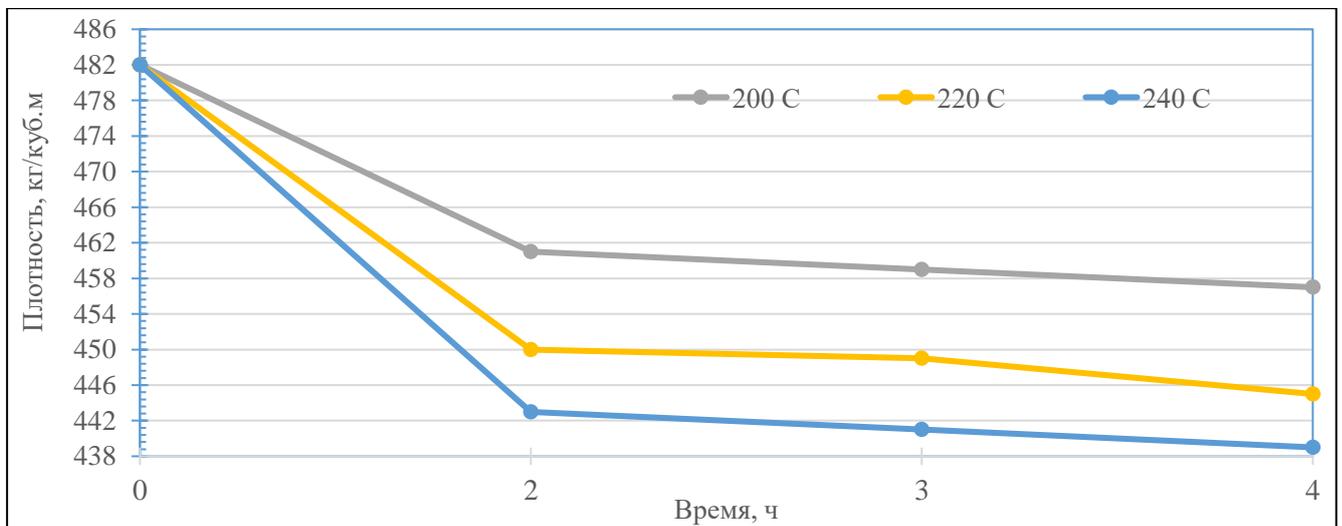


Рисунок 2.5 – Плотность образцов сосны в процессе высокотемпературной обработки при толщине образцов 30 мм

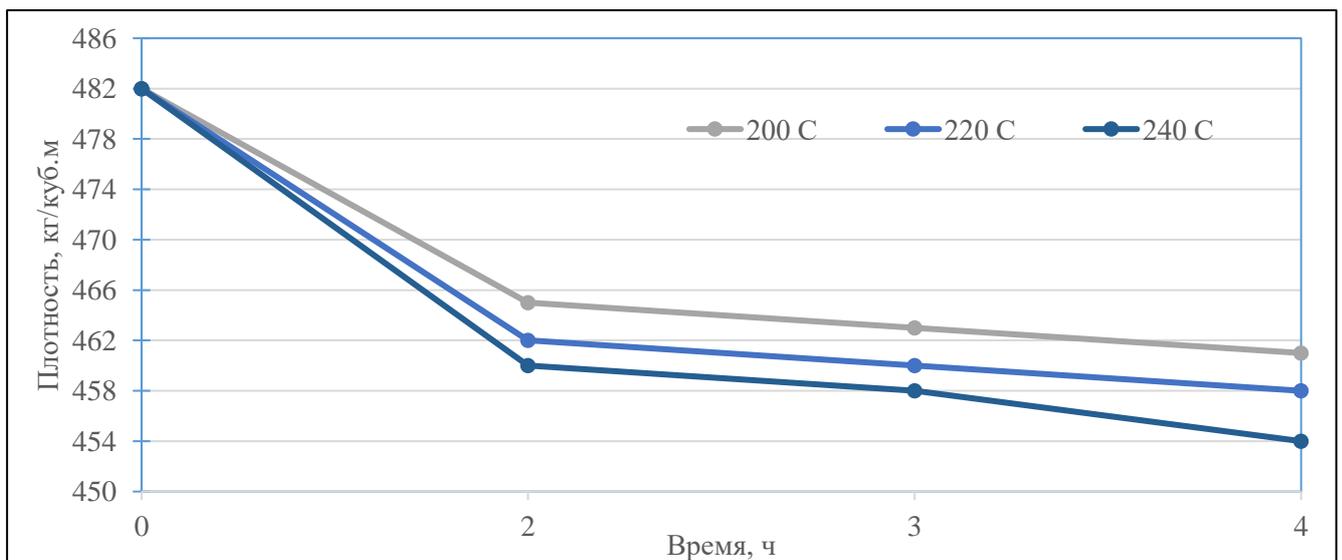


Рисунок 2.6 – Плотность образцов сосны в процессе высокотемпературной обработки при толщине образцов 40 мм

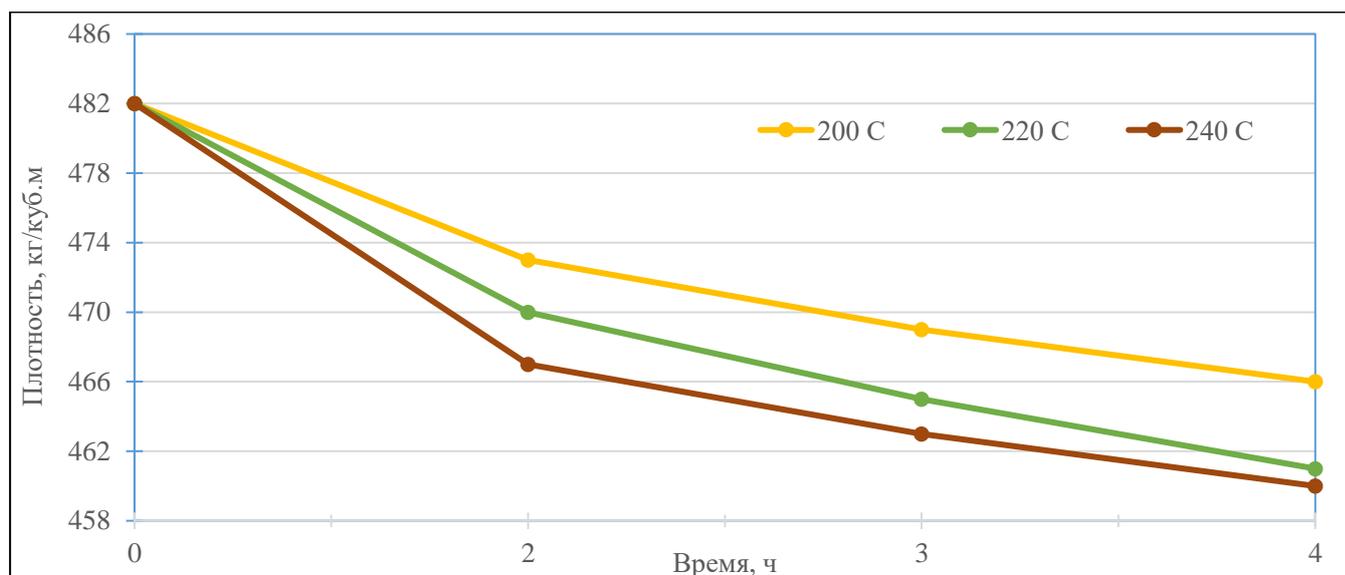


Рисунок 2.7 – Плотность образцов сосны в процессе высокотемпературной обработки при толщине образцов 50 мм

Из выше представленных графиков невозможно точно определить промежуточные значения плотности древесины в зависимости от значений времени термомодифицирования и температуры среды, поэтому была разработана математическая модель кинетики плотности древесины в процессе термической обработки.

2.2. Разработка математической модели кинетики плотности древесины в процессе термической обработки методом конвекции

Для математического моделирования изменения плотности древесины в процессе термической обработки были использованы полученные результаты, представленные на рисунках 2.5-2.7. Для определения промежуточных значений плотности в зависимости от толщины образца, температуры термомодифицирования и времени выдержки применялось моделирование экстремальных экспериментов с использованием планов второго порядка.

Применение математического моделирования предоставляет возможности для обработки экспериментальных данных, а также позволяет оптимизировать выполнение экспериментов с применением математических методов для расчётов на компьютере [55].

В связи с тем, что описать область достижения оптимальных значений

процесса линейным уравнением регрессии не удаётся из-за нелинейности физических процессов факторного пространства и значимости эффектов взаимодействия факторов и квадратичных эффектов, область оптимума описывается полиномами более высоких порядков, среди которых самые распространённые уравнения второго порядка:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i,j=1}^n b_{ij} x_i x_j \quad (2.1)$$

В современной исследовательской практике критически важно применять эффективные методы планирования экспериментов для достижения оптимальных результатов. При разработке экспериментальной стратегии учитывались различные уровни воздействующих параметров: высокий уровень (+1), основной уровень (0), низкий уровень (-1).

В таблице 2.1 представлена информация о натуральных значениях каждого из выбранных факторов, что позволило систематизировать подход к проведению экспериментов. Правильный выбор уровней факторов имеет решающее значение для достоверности получаемых результатов.

Таблица 2.1 – 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 обработки, час	τ	x ₃	(τ-3)/1	1	2	3	4

Детальный анализ включал применение классического статистического инструментария. В частности, использование t-статистики Стьюдента для каждого рассчитанного коэффициента регрессии позволило с уверенностью отклонить нулевую гипотезу о незначимости параметров. Каждый элемент уравнения продемонстрировал значимость на выбранном доверительном интервале, что

существенно усилило общую достоверность модели.

Математическое моделирование в данном контексте служит фундаментальным инструментом для прогнозирования поведения системы. Используя полиномиальную экспериментально-статистическую модель (ЭСМ), можно эффективно определить взаимосвязи между исследуемыми параметрами.

Трёхфакторный план, описанный в источнике [23], представляет собой комплексный подход к моделированию, который позволяет:

- минимизировать плотность образца (кг/м^3);
- идентифицировать оптимальные значения факторов;
- прогнозировать поведение системы при различных комбинациях параметров.

По результатам анализа методологии [52] исследователи пришли к выводу, что оптимальным подходом является использование полного факторного плана (ПФП). Данный выбор обоснован следующими преимуществами:

- максимальная информативность полученных данных;
- возможность выявления взаимодействий между факторами;
- высокая точность прогнозирования.

При рассмотрении исходной задачи и анализе условий было определено, что требуется построение экспериментальной статистической модели (ЭСМ) второго порядка. Эта модель способна отражать нелинейные зависимости между исследуемыми параметрами, что критически важно для многих практических приложений.

В методологии полного факторного эксперимента (ПФЭ) ключевым принципом является систематическое исследование всех возможных комбинаций уровней изучаемых факторов. Именно тщательный анализ всех сочетаний позволяет построить высокоточную и информативную модель.

В нашем случае число опытов равно 27. Результаты проведённых опытов представлены в таблице 2.2 и на рисунках 2.8-2.10.

Следует отметить, что эффективность факторных экспериментов проявляется не только в количественном, но и в качественном улучшении получаемых результатов.

Таблица 2.2 – Результаты опытов

№	s мм	t °C	τ ч	ρ кг/м ³	№	s мм	t °C	τ ч	ρ кг/м ³	№	s мм	t °C	τ ч	ρ кг/м ³
1	30	200	2	461	10	40	200	2	465	19	50	200	2	473
2	30	200	3	459	11	40	200	3	463	20	50	200	3	469
3	30	200	4	457	12	40	200	4	461	21	50	200	4	466
4	30	200	2	459	13	40	220	2	462	22	50	220	2	470
5	30	200	3	449	14	40	220	3	460	23	50	220	3	465
6	30	200	4	445	15	40	220	4	457	24	50	220	4	461
7	30	240	2	457	16	40	240	2	460	25	50	240	2	467
8	30	240	3	445	17	40	240	3	458	26	50	240	3	463
9	30	240	4	439	18	40	240	4	454	27	50	240	4	460

Отсутствие повторяющихся экспериментальных конфигураций в плане позволяет максимально эффективно использовать исследовательские ресурсы и время.

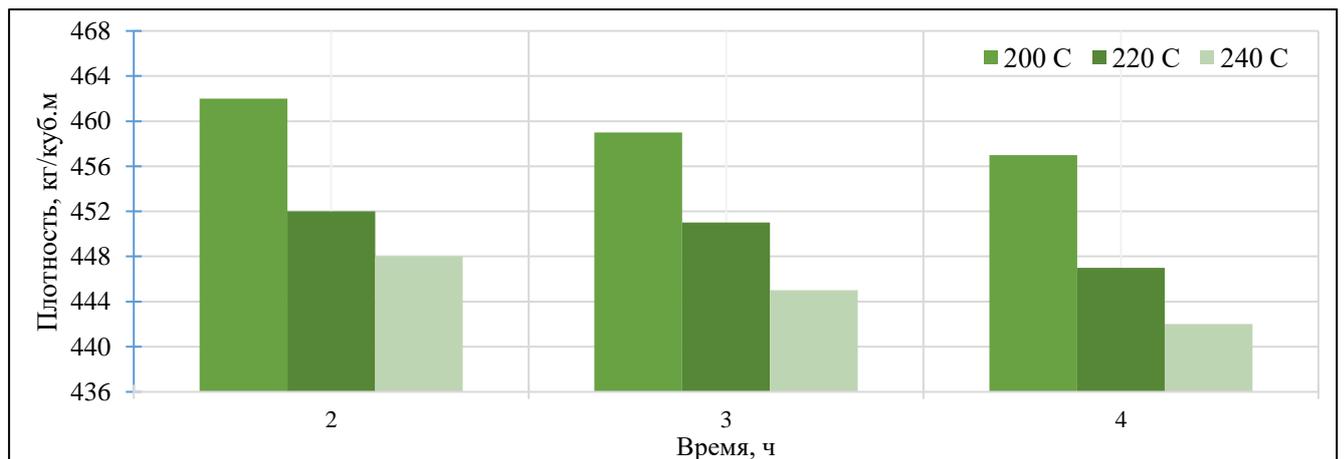


Рисунок 2.8 – Плотность образцов сосны после высокотемпературной обработки при толщине образцов 30 мм

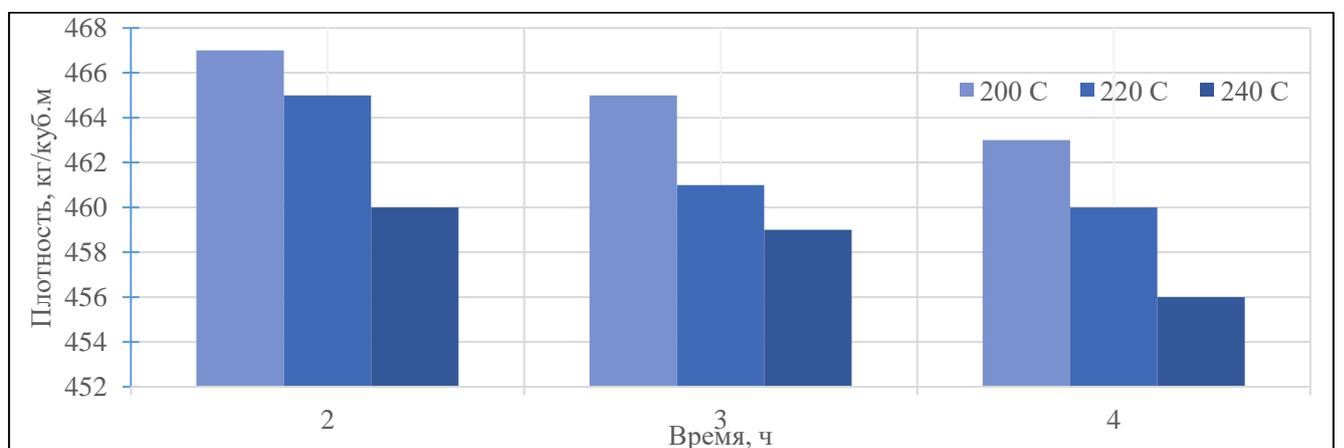


Рисунок 2.9 – Плотность образцов сосны после высокотемпературной обработки при толщине образцов 40 мм

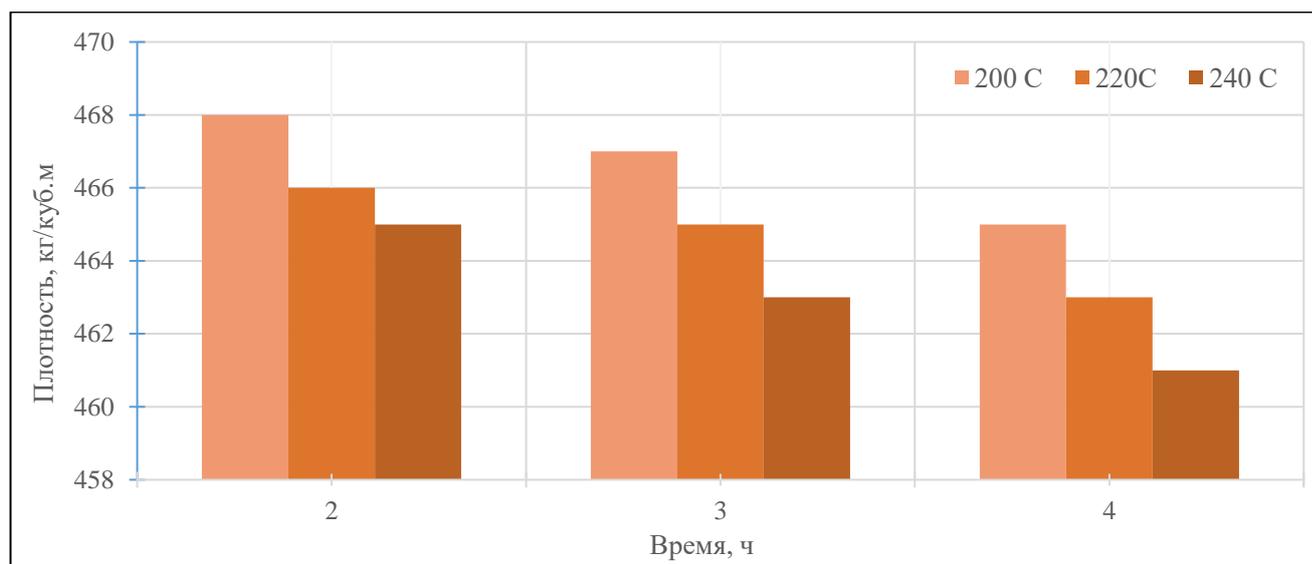


Рисунок 2.10 – Плотность образцов сосны после высокотемпературной обработки при толщине образцов 50 мм

Прежде чем приступить к расчётам, необходимо убедиться в корректности собранных данных и их соответствии предположениям метода наименьших квадратов. После формирования матричных структур, представляющих как независимые переменные, так и отклики системы, можно выполнить необходимые математические операции для нахождения искомых коэффициентов.

В современной статистической науке существует множество подходов к оценке параметров регрессионных моделей. Одним из фундаментальных методов является метод наименьших квадратов (МНК), который позволяет получить оптимальные оценки коэффициентов регрессии при соблюдении определённых условий. Процесс определения коэффициентов регрессионной модели второго порядка можно представить в следующей последовательности:

- формирование матрицы базисных функций, учитывающей влияние независимых переменных;
- создание матрицы-столбца наблюдаемых откликов системы;
- вычисление матрицы моментов, на основе полученных данных;
- расчёт матрицы-столбца коэффициентов для выбранной модели.

Выполняем переход от натуральных единиц X к безразмерным кодированным единицам. Результат записываем в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Матрица полного факторного плана

№опыта	x_1 толщина	x_2 температура	x_3 время	x_1x_2	x_2x_3	x_1x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	Y
1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	461
2	-1	-1	0	1	0	0	1	1	0	459
3	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	457
4	-1	0	-1	0	0	1	1	0	1	459
5	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	449
6	-1	0	1	0	0	-1	1	0	1	445
7	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	457
8	-1	1	0	-1	0	0	1	1	0	445
9	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	439
10	0	-1	-1	0	1	0	0	1	1	465
11	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	463
12	0	-1	1	0	-1	0	0	1	1	461
13	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	462
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	460
15	0	0	1	0	0	0	0	0	1	457
16	0	1	-1	0	-1	0	0	1	1	460
17	0	1	0	0	0	0	0	1	0	458
18	0	1	1	0	1	0	0	1	1	454
19	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	473
20	1	-1	0	-1	0	0	1	1	0	469
21	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	466
22	1	0	-1	0	0	-1	1	0	1	470
23	1	0	0	0	0	0	1	0	0	465
24	1	0	1	0	0	1	1	0	1	461
25	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	467
26	1	1	0	1	0	0	1	1	0	463
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	460

Матричный подход значительно упрощает вычислительный процесс, особенно при работе с моделями высокого порядка, содержащими множество предикторов. Найденные коэффициенты модели второго порядка позволяют не только описать линейные эффекты, но и учесть квадратичные члены и взаимодействия между факторами, что делает модель более гибкой и информативной.

Таким образом, подставив найденные матрицы в соответствующие формулы, находим коэффициенты полинома, таблица 2.4:

Таблица 2.4 – Значения коэффициентов регрессии

Коэффициенты b	Значения коэффициентов
b_0	458,7777778
b_1	6,833333333
b_2	-3,944444444
b_3	-4,111111111
b_{12}	1,5
b_{23}	-1,333333333
b_{13}	1,083333333
b_{11}	-0,833333333
b_{22}	1,166666667
b_{33}	0,666666667

Для вычисления произвольных значений плотности образца y (кг/м^3), находящихся в диапазоне полученных опытным путём значений в таблице 2.4, используем формулу для модели с трёхфакторным планом [52]:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1 \cdot x_1 + b_{22} \cdot x_2 \cdot x_2 + b_{33} \cdot x_3 \cdot x_3. \quad (2.2)$$

После построения матрицы планирования необходимо её преобразовать в рабочую матрицу плана (2.4). Для этого все нормализованные значения заменяем натуральными из таблицы 2.1: $x_i \rightarrow Xi$ и подставляем значения коэффициентов регрессии из таблицы 2.4:

$$Y = 458,778 + 6,8333((X_1 - 40)/10) - 3,9444((X_2 - 220)/20) - 4,1111((X_3 - 3)/1) + 1,5((X_1 - 40)/10)((X_2 - 220)/20) - 1,3333((X_2 - 220)/20)((X_3 - 3)/1) + 1,0833((X_1 - 40)/10)((X_3 - 3)/1) - 0,8333((X_1 - 40)/10)((X_1 - 40)/10) + 1,1667((X_2 - 220)/20)((X_2 - 220)/20) + 0,6667((X_3 - 3)/1)((X_3 - 3)/1). \quad (2.3)$$

Подставляем натуральные переменные вместо нормализованных:

$$\rho = 458,778 + 6,8333((s - 40)/10) - 3,9444((t - 220)/20) - 4,1111((\tau - 3)/1) + 1,5((s - 40)/10)((t - 220)/20) - 1,3333((t - 220)/20)((\tau - 3)/1) + 1,0833((s - 40)/10)((\tau - 3)/1) - 0,8333((s - 40)/10)((s - 40)/10) + 1,1667((t - 220)/20)((t - 220)/20) + 0,6667((\tau - 3)(\tau - 3)). \quad (2.4)$$

$$\rho = 654,497 + 0,425s - 1,729t + 10,408\tau + 0,011st - 0,0665t\tau + 0,11s\tau - 0,0083s^2 + 0,0042t^2 + 0,665\tau^2. \quad (2.5)$$

По рассчитанным значениям плотности образца ρ (кг/м³) построены графики в зависимости от толщины образцов, температуры и времени выдержки в котле-утилизаторе (рис. 2.11-2.13) с использованием рассчитанных данных. При вводе данных возможно получить промежуточные параметры и расчёты в Excel (Приложении В).

Полученные уравнения регрессии позволяют оценить закономерность влияния таких факторов, как толщина обрабатываемого материала, температура процесса и время термомодифицирования на плотность древесины в результате термической обработки.

Решение данных уравнений при заданных условиях позволяет разработать инженерную методику расчёта установки термической обработки в среде «уходящих» газов и определить эффективную степень термомодифицирования древесины согласно требованиям заказчиков или условиям эксплуатации объектов.

Для нахождения степени термомодифицирования древесного материала использовалась формула, представленная в работе [69]

$$Q'_{\text{ТМ}} = \frac{\rho_n - \rho_i}{\rho_n - \rho_k}, \quad (2.6)$$

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.

В формуле (2.6) в качестве конечной плотности процесса термической обработки древесины принята плотность, образующаяся в результате термомодифицирования при температуре 260 °С, поскольку если рассматривать процесс пиролиза древесины, то он состоит из двух основных стадий: эндотермического процесса (разложение древесины, протекающее с поглощением

тепла) и экзотермического процесса (разложение древесины, протекающее с выделением тепла). Процесс термомодифицирования древесины можно охарактеризовать как начальную стадию процесса пиролиза древесины, протекающую с поглощением тепла. Соответственно, завершение эндотермической стадии процесса пиролиза древесины, характеризующееся пиролизом материала до температуры 260 °С, можно считать завершением процесса термомодифицирования древесины. Отсюда конечная плотность, образующаяся в результате термомодифицирования древесины при температуре 260 °С, является минимальным значением плотности термодревесины для конкретной породы дерева.

На рисунках 2.11-2.13 представлены графики зависимости степени термомодифицирования Q'_{TM} от времени τ (ч) и температуры (°С) «уходящих» газов котла-утилизатора.

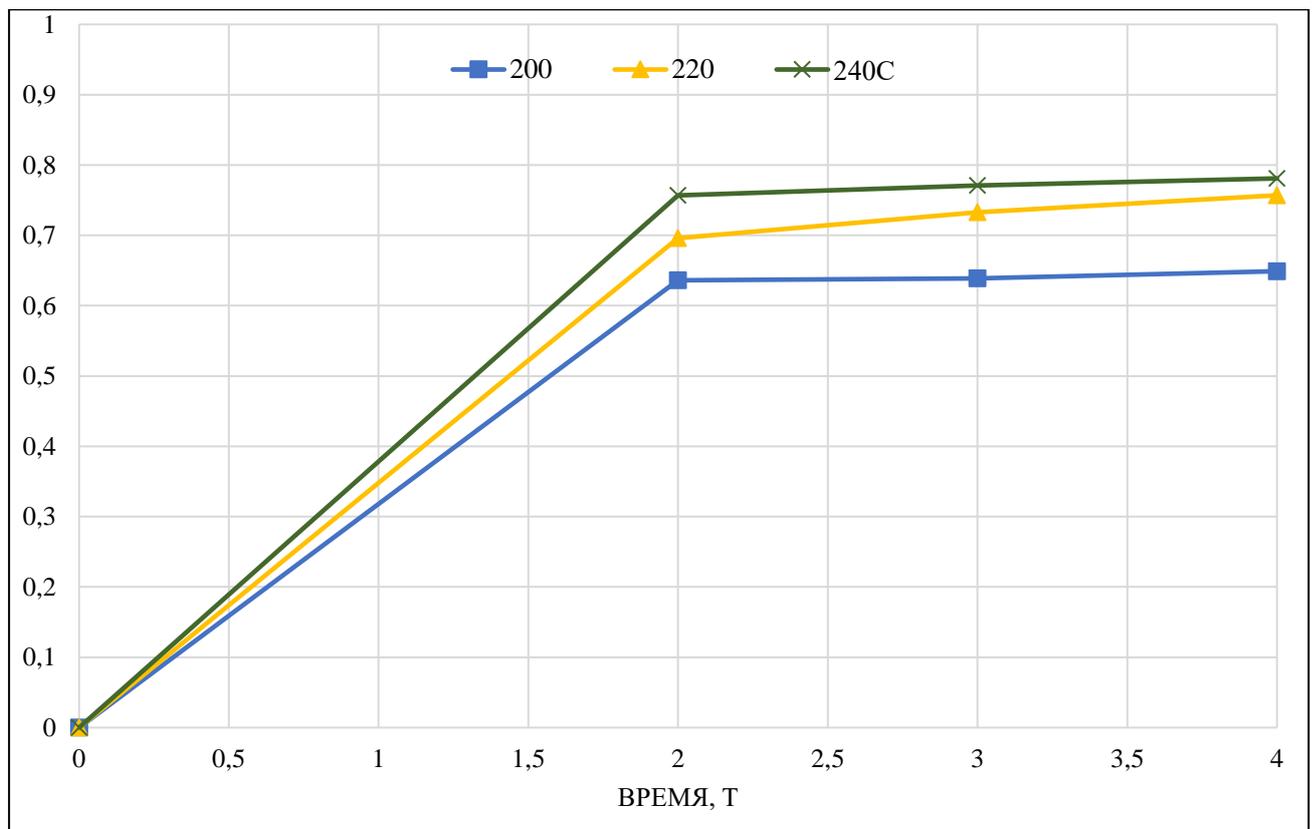


Рисунок 2.11 – График зависимости степени термомодифицирования Q'_{TM} от времени τ (ч) и температуры, (°С) при $S=30$ мм

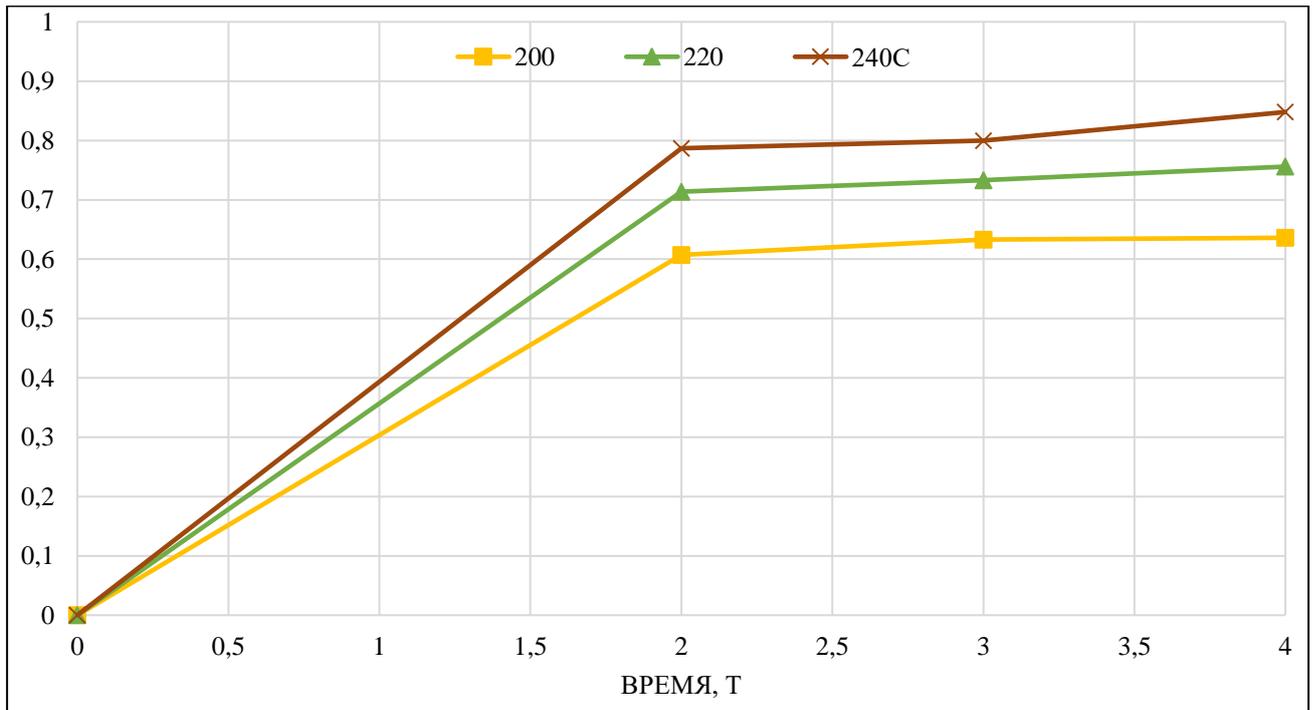


Рисунок 2.12 – График зависимости степени термомодифицирования Q'_{TM} от времени τ (ч) и температуры, ($^{\circ}C$) при $S=40$ мм

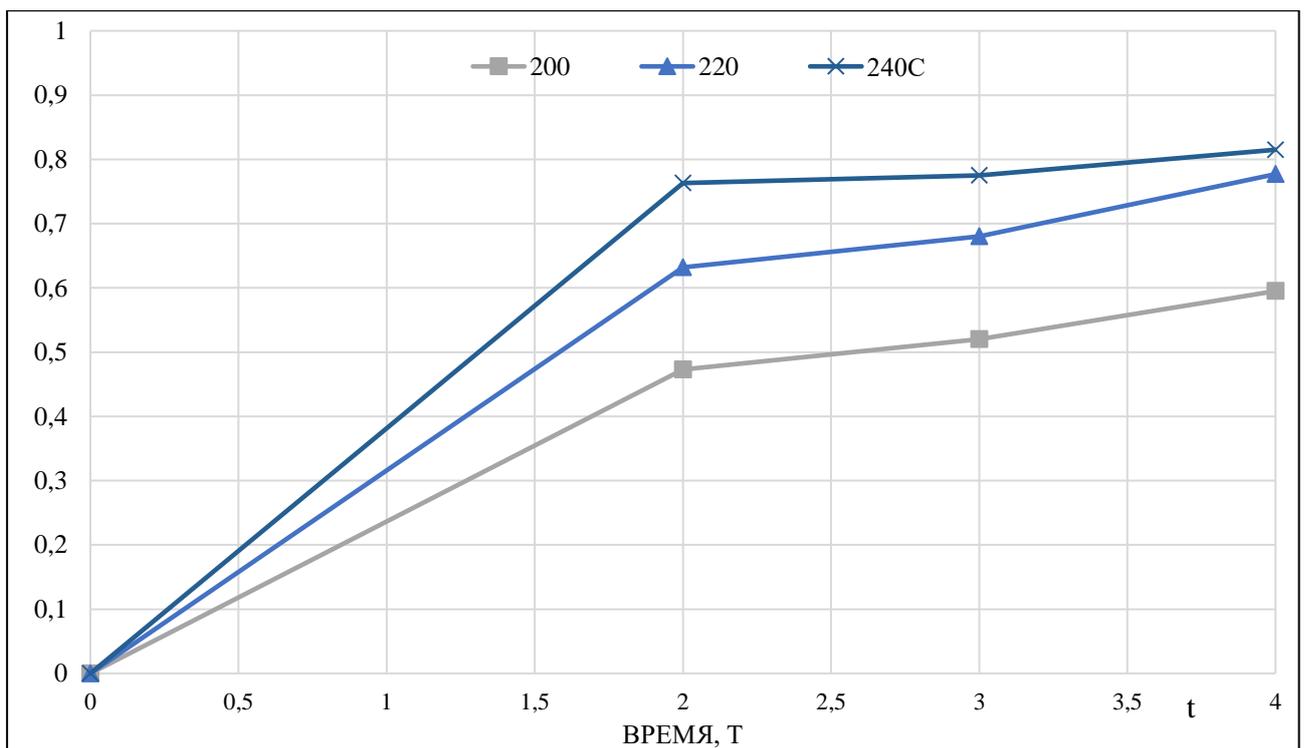


Рисунок 2.13 – График зависимости степени термомодифицирования Q'_{TM} от времени τ (ч) и температуры, ($^{\circ}C$) при $S=50$ мм

Рассмотрим графики, которые позволяют нам определить рациональные параметры модификации материала в зависимости от времени воздействия и толщины обрабатываемой древесины. Эти данные являются ключевыми при

выборе рационального режима обработки.

Учёт временных и размерных характеристик древесного материала помогает оптимизировать процесс модификации и повысить его эффективность. Экспериментальные данные позволяют изучить взаимосвязь между степенью модификации, временем обработки и толщиной материала и принять обоснованное решение при выборе режимов обработки древесины.

Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБРАБОТКИ НА СВОЙСТВА ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ

В данной главе описана экспериментальная установка, разработанная для исследования модификации древесины путём термообработки без использования кислорода воздуха и ультрафиолетового излучения, представлены объект исследования, а также методы и результаты исследования характеристик модифицированных образцов.

3.1. Экспериментальная установка для ультрафиолетовой обработки древесных материалов

Для исследования процесса ультрафиолетовой обработки древесины была выбрана ультрафиолетовая лампа открытого типа для обработки помещений без нахождения персонала, схема и внешний вид которой представлены на рисунках 3.1. и 3.2.

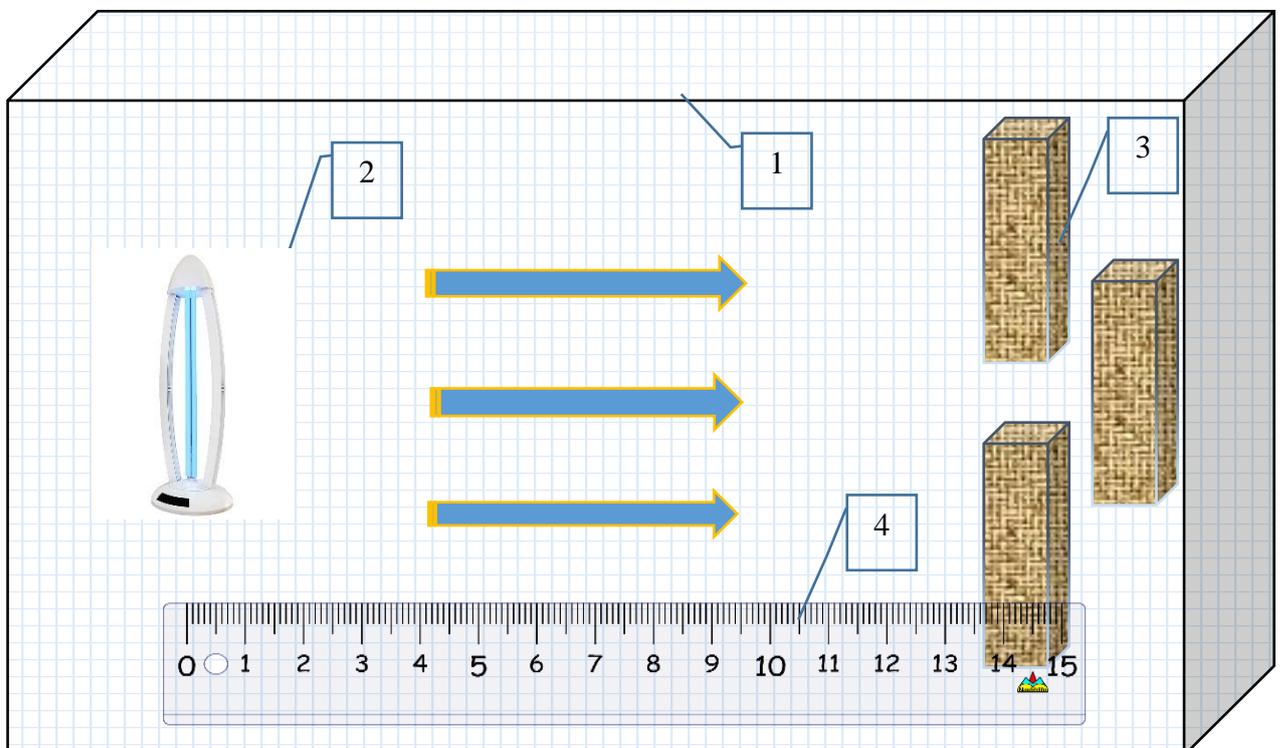


Рисунок 3.1 – Схема установки для проведения эксперимента: 1 – бокс; 2 – ультрафиолетовая лампа; 3 – образцы древесины; 4 – линейка



a)

б)

Рисунок 3.2 – Вид в работе (а) и внешний вид (б) экспериментальной установки по ультрафиолетовому облучению материалов

Данное исследование представляет собой комплексный подход к изучению процессов фотодegradации древесины под воздействием ультрафиолетового излучения.

Для проведения экспериментальной серии испытаний была задействована высокотехнологичная стерилизующая ртутно-дуговая лампа UVC LAMP высокого давления, которая обеспечивает стабильные параметры излучения в заданном диапазоне. Эта установка была выбрана благодаря своим оптимальным характеристикам для достижения необходимого уровня воздействия на структуру древесины.

Экспериментальная схема предполагала варьирование нескольких ключевых параметров. Номинальная мощность источника составляла 38 Вт, что обеспечивало достаточную интенсивность воздействия при соблюдении энергоэффективности процесса. Обработка проводилась в спектральном диапазоне 185 – 265 нм, что

соответствует наиболее активной части ультрафиолетового спектра с точки зрения воздействия на органические соединения.

Образцы древесины сосны подвергались различным режимам фотодегradации с варьированием временных интервалов от 30 до 120 минут. Важно отметить, что в исследование были включены как обычные высушенные образцы, так и материалы, прошедшие предварительную термическую модификацию, что позволило проанализировать влияние комбинированного воздействия на структурные изменения древесины.

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 фотодегradации в зависимости от различных физических параметров воздействия.

Полученные в ходе данного исследования результаты открывают перспективы для дальнейшей оптимизации методов обработки древесины и других органических материалов с использованием ультрафиолетового излучения в промышленных и научных целях.

Современные технологии фотохимической обработки материалов имеют широкое применение в промышленности и научных исследованиях. Наш эксперимент был сосредоточен на изучении воздействия ультрафиолетового излучения на структуру древесных образцов.

Для начала процедуры дистанционно активировалась комплексная экспериментальная установка с интегрированным таймером и источником ультрафиолетового излучения. Ключевым моментом являлось правильное размещение исследуемых материалов: центральная часть каждого образца должна была находиться непосредственно внутри зоны максимального излучения.

В ходе эксперимента происходил процесс фотоокисления – специфическая УФ-обработка, влияющая на химическую структуру древесины. Эта стадия требует особой тщательности, поскольку от равномерности облучения зависит

достоверность получаемых результатов.

Последующий этап предполагал выдержку обработанных образцов в контролируемых условиях лабораторного помещения. Данная операция, длящаяся 24 часа, необходима для стабилизации влагосодержания в структуре древесины, что критически важно для объективной оценки результатов. Это позволяет зафиксировать количественные изменения, произошедшие в результате фотохимической трансформации материала, и сделать точные выводы об эффективности данного метода обработки древесины.

В лабораторных условиях полученные образцы проходят тщательную подготовку к исследованию. Это включает в себя предварительную очистку и маркировку для последующей идентификации. После подготовительного этапа все собранные материалы направляются на многоступенчатую аналитическую обработку с применением различных методов исследования.

Важно отметить, что процесс анализа строго регламентирован, следует установленным протоколам, что даёт согласованность и сопоставимость данных. По завершении всех аналитических процедур формируется комплексное заключение, отражающее полную картину исследуемого материала.

3.2. Выполнение инструментальных замеров образцов древесины

Дополнительно были выполнены инструментальные замеры при помощи ультрафиолетового радиометра источника света LS125 многозондового измерителя УФ-излучения. Диапазон зонда UVC-X0 по спектру 230 – 280 нм, по измерению мощности 0 – 200000 мкВт/см². Данный датчик оттарирован на заводе изготовителе (рис.3.3).

Получено среднее значение всех замеров (порядка 100) поверхностной дозы 2206 мкВт/м² при расстоянии 25 см, что соответствует 1,37 Вт/м² при расстоянии 1 м. Фотоокисление образцов производилось лампой UFC Disinfection Lamp с паспортными характеристиками: потребляемая тип лампы 38W2G11, электрическая мощность 38 Вт, длина волны 253 нм, излучение 1,25 Вт/м². Принимаем, что излучение ультрафиолетовой лампы правильное и соответствует

паспортным характеристикам. В таблице 3.1 приведены данные влияния дозы облучения на краевой угол смачивания образца.



Рисунок 3.3 – Инструментальный контроль УФ обработки образцов

Параллельно с измерением влагопоглощения необходимо оценить смачиваемость образцов, что даёт дополнительную информацию о гидрофильности поверхности древесины. В данном исследовании было использовано высокоточное оборудование – цифровой микроскоп Digital Microscope 15 – 40 mm.

Важные характеристики используемого оборудования: диапазон увеличения от 50^X до 100^X , высокая разрешающая способность, возможность цифровой обработки изображений.

Методология исследования основана на измерении краевого угла "лежачей" капли, что является общепринятым стандартом при определении смачиваемости поверхностей различных материалов. Такой подход позволил количественно оценить взаимодействие жидкости с поверхностью древесины различных пород и

с различными типами обработки.

Комплексный анализ как влагопоглощения, так и смачиваемости позволяет получить полную картину поведения древесины при контакте с влагой, что критически важно для прогнозирования долговечности деревянных конструкций в различных условиях эксплуатации.

В современном материаловедении способность поверхности смачиваться жидкостями представляет собой фундаментальный параметр, определяющий эффективность множества технологических процессов. Особенно критичным данный показатель становится при работе с материалами, включающими древесную основу и защитные составы.

Процедура проведения эксперимента выглядела следующим образом:

- подготовленный образец материала устанавливался в строго горизонтальном положении на измерительном столе;
- с помощью калиброванного шприца-дозатора на поверхность образца наносилась капля дистиллированной воды определённого объёма;
- каждые полминуты измерялся угол смачивания.

Эксперимент проводился при контролируемой постоянной температуре, что исключало влияние её колебаний на результаты измерений. Выбор методики обработки поверхности образцов также оказывал существенное влияние на характер взаимодействия с жидкостью, что отражалось в соответствующих поправках при настройке измерительного оборудования.

В рамках проведения исследования была разработана комплексная методология, обеспечивающая достоверность результатов. Экспериментальные данные подвергались анализу с использованием современного программного обеспечения. Для обеспечения статистической значимости результатов были предприняты следующие меры:

- количество параллельных экспериментов в каждой серии исследований составляло 10 и более;
- доверительный интервал был установлен на уровне 90 %;
- все эксперименты проводились в стандартизированных условиях.

Все полученные в ходе опытов профили капель подвергались цифровой обработке. Анализ морфологических характеристик капель осуществлялся посредством специализированного программного обеспечения «HiView 2.2». Визуализация типичного профиля капли, обработанного с помощью данной программы, представлена на рисунке 3.4.

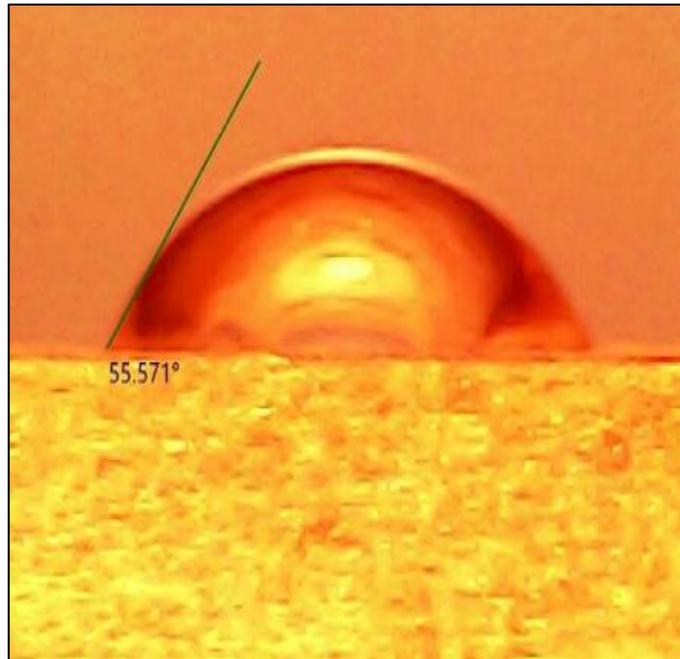


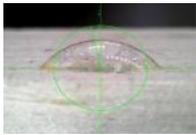
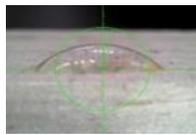
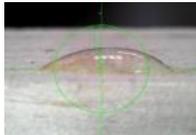
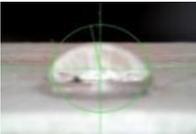
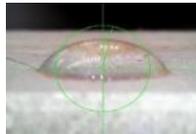
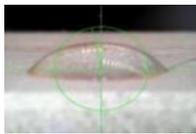
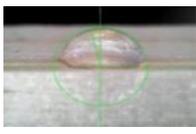
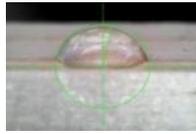
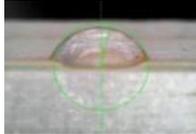
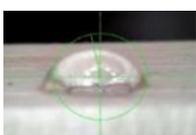
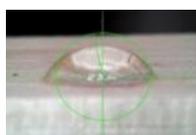
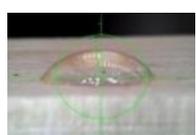
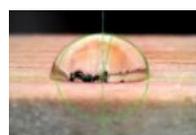
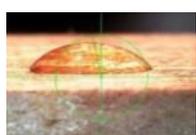
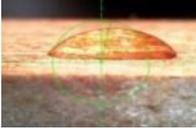
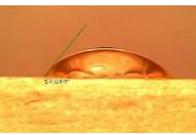
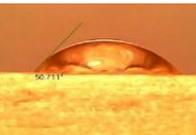
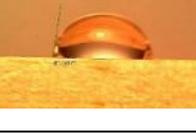
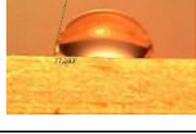
Рисунок 3.4 – Анализ полученного изображения

Использование современных методов компьютерного анализа позволило значительно повысить точность измерений и минимизировать влияние субъективных факторов на результаты исследования.

В таблице 3.1 наглядно представлены изменения размеров и формы капли на различных образцах: контрольном, термомодифицированном и термически обработанном с последующим ультрафиолетовым облучением. Как видно из данных, на образцах, прошедших термическую обработку, изменение формы и размеров капли в течение нескольких секунд практически отсутствует.

В данном случае термомодифицирование образцов существенно препятствует растеканию капли по поверхности образца. Таким образом, высокотемпературная обработка древесного материала способствует увеличению влагостойкости образца. И напротив, УФ облучение увеличивает смачиваемость образцов сосны.

Таблица 3.1 – Результаты определения краевых углов образцов

№ образца	Наименование	30 секунд	60 секунд	90 секунд
1	UF ³⁰ $\theta=0$; J=2,47 кДж/м ²			
2	UF ⁶⁰ $\theta=0$; J=4,93 кДж/м ²			
3	UF ⁹⁰ $\theta=0$; J=7,39 кДж/м ²			
4	UF ¹²⁰ $\theta=0$; J=9,86 кДж/м ²			
5	UF ³⁰ M $\theta=0,2$; J=2,47 кДж/м ²			
6	UF ⁶⁰ M $\theta=0,3$; J=4,93 кДж/м ²			
7	UF ⁹⁰ M $\theta=0,5$; J=7,39 кДж/м ²			
8	UF ¹²⁰ M $\theta=0,7$; J=9,86 кДж/м ²			
9	M $\theta=0,7$; J=0 кДж/м ²			
10	K $\theta=0$; J=0 кДж/м ²			

На фотографиях видно, что капля воды, нанесённая на поверхность образца,

уже через 30 секунд начала растекаться и на 90-ой секунде покрыла подложку тонким слоем. Результаты обработки экспериментальных данных представлены в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Влияние дозы облучения на краевой угол смачивания образцов

Время облучения t , мин		0	30	60	90	120
Доза облучения J , кДж/м ²		0,00137	2,466	4,932	7,398	9,864
Краевой угол смачивания α , град.	$Q'_{TM=0}$	43	32	21	8	7
	$Q'_{TM=0,7}$	71	68	62	58	56
	$Q'_{TM=1}$	82	78	76	72	64

По данным, указанным в таблице 3.2, с помощью программы TableCurve2D и TableCurve3D построены графики зависимости дозы облучения от краевого угла смачиваемости (Приложение Г).

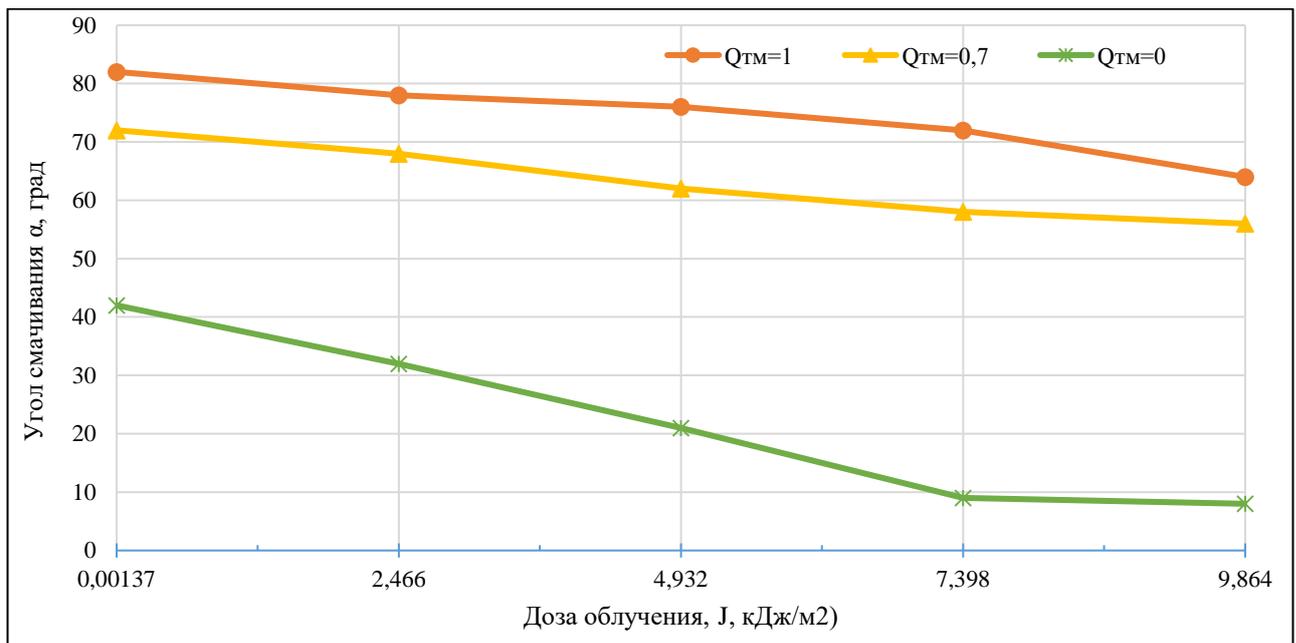


Рисунок 3.5 – Влияние дозы УФ-облучения на краевой угол смачивания древесины

Графики отражают влияние ультрафиолетовой обработки на краевой угол смачивания древесины. На термомодифицированную древесину УФ-обработка оказывает существенно меньшее влияние. Исследование воздействия ультрафиолетового облучения на краевой угол смачивания выявило, что наиболее

эффективной дозой облучения является 7,4 кДж/м². Дальнейшее увеличение дозы облучения не оказывает значительного влияния.

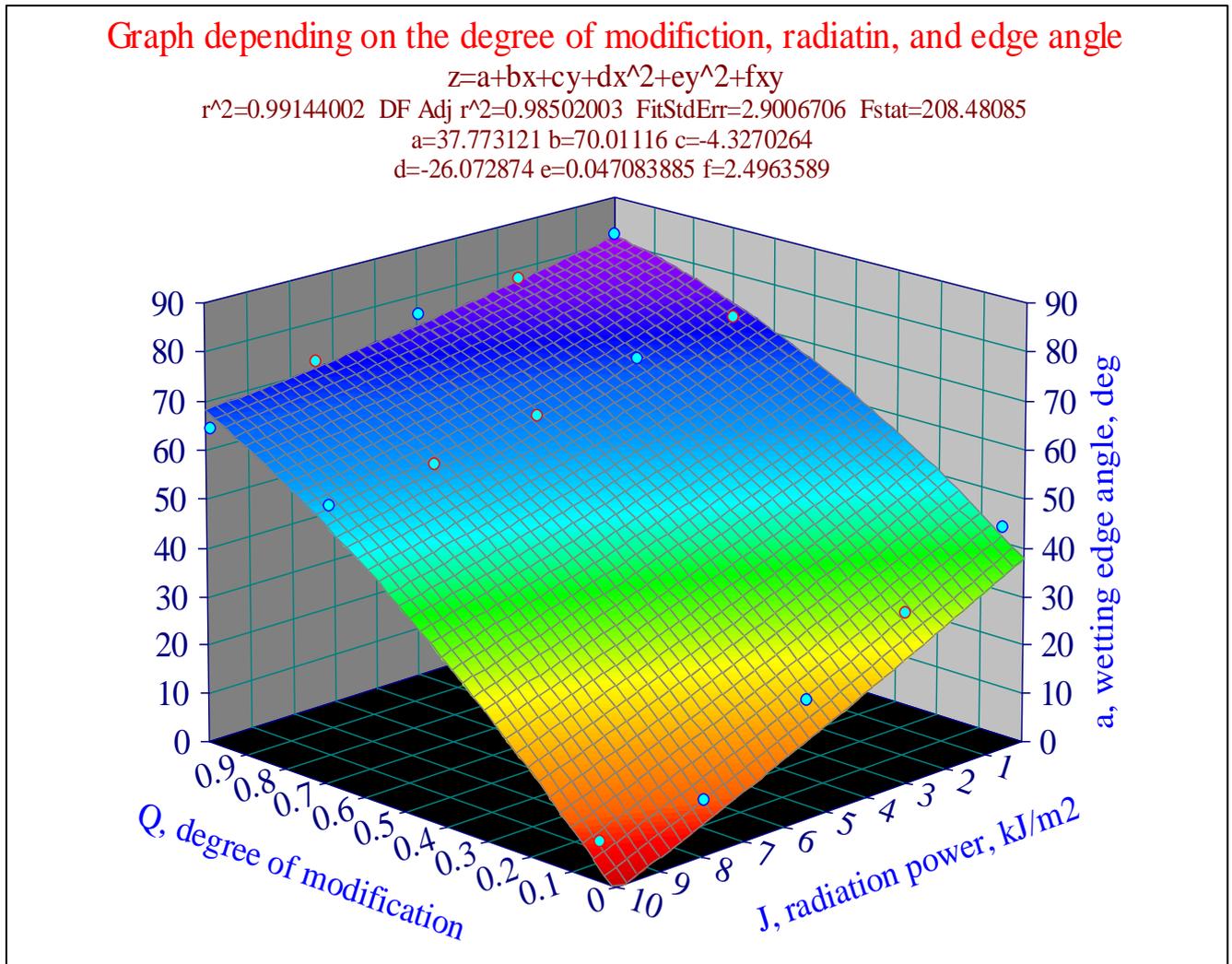


Рисунок 3.6 – Влияние краевого угла смачивания от дозы облучения и степени ТМД

На рисунке 3.6 изображено влияние краевого угла смачивания при УФ+М α (град) от дозы облучения J (кДж/м²) и от степени термомодифицирования Q' _{ТМ}. У формулы 3.1 полином с вероятностью $r^2 = 0,99144$ подставляем значения постоянных величин a, b, c, d, e, f и натуральные переменные (формула 3.2):

$$z = a + b \cdot x + c \cdot y + d \cdot x^2 + e \cdot y^2 + f \cdot x \cdot y. \quad (3.1)$$

$$\alpha = 37,77312 + 70,01116 \cdot \theta - 4,32702 \cdot J - 26,07287 \cdot \theta^2 + 0,04708 \cdot J^2 + 2,49635 \cdot J \cdot \theta. \quad (3.2)$$

Таким образом, воздействие УФ-излучения является простым и эффективным способом улучшения смачиваемости поверхности древесины. Для того, чтобы достичь полного светового воздействия, при котором смачиваемость значительно

возрастает, процесс УФ-активации должен быть оптимизирован, что возможно путём изменения расстояния между УФ-лампой и обрабатываемой поверхностью, или при использовании лампы с более высокой интенсивностью излучения.

Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ НА ОСНОВЕ МОДИФИКАЦИИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ

В современном материаловедении особое внимание уделяется оптимизации древесных материалов для промышленного использования. Их правильная подготовка и модификация играют ключевую роль в достижении желаемых свойств конечного продукта.

Для проведения исследований важно качество исходного материала. Из хвойных пород, преимущественно сосны, производилась тщательная заготовка образцов без структурных дефектов. Этот процесс включал:

- первичную распиловку массива древесины;
- детальную обработку полученных заготовок на фуговальном оборудовании;
- финишную подгонку до требуемых параметров.

Преобразование теоретических и экспериментальных данных в практические рекомендации составляет ключевой компонент данного исследования. Современная промышленность нуждается в научно обоснованных методиках выбора оптимальных способов модификации древесины для различных изделий. Данное исследование направлено на систематизацию взаимосвязей между параметрами обработки и свойствами материалов, разработку алгоритмов подбора технологических режимов, создание справочных материалов для инженеров-технологов.

Стратегическая задача исследования состояла в создании гибкой системы технологических параметров обработки древесных частиц. Данная система должна учитывать:

- специфические требования к конечному материалу;
- условия эксплуатации будущих изделий;
- экономические аспекты производственного процесса;
- экологические стандарты современного производства.

В итоге работа направлена на создание методологии, позволяющей

промышленным предприятиям оперативно адаптировать технологию обработки древесины под меняющиеся требования рынка и специфические задачи конкретных производственных процессов.

В современной промышленности существует множество подходов к модификации древесных компонентов. Эффективная стратегия выбора методов обработки должна учитывать не только конечный результат, но и экономическую целесообразность процесса.

Определение оптимальной методики модификации заключается в поиске баланса между следующими ключевыми параметрами: продолжительность затраты процесса, энергоэффективность обработки, стабильность получаемых характеристик, экологичность применяемых технологий.

Для комплексного понимания процессов критически важно изучать структурные изменения древесины под воздействием различных факторов. Особое внимание следует уделить:

- влиянию ультрафиолетового излучения разной интенсивности;
- варьирующимся режимам термической обработки;
- комбинированным методам воздействия;
- зависимости результатов от исходного сырья.

Каждый из применяемых режимов должен соотноситься с будущими условиями эксплуатации модифицированной древесины, что позволит достичь оптимального соотношения между затратами на обработку и получаемыми характеристиками материала. Прочность соединений в деревянных конструкциях играет ключевую роль при возведении долговечных зданий и сооружений.

В данной главе представлены комплексные результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение механизмов адгезии между связующими компонентами и модифицированными поверхностями древесных материалов.

Цели исследования:

- определение оптимальных параметров обработки древесины;
- анализ изменений на молекулярном уровне при воздействии экстремальных факторов;

- разработка рекомендаций для повышения прочностных характеристик соединений.

Центральным аспектом проведённых экспериментов стало изучение трансформации физико-механических и физико-химических свойств древесных материалов после воздействия на них высокотемпературных режимов и ультрафиолетового излучения различной интенсивности. Особое внимание уделялось молекулярным изменениям в структуре поверхностного слоя и их влиянию на адгезионные характеристики.

Таким образом, системный подход к выбору методов модификации древесины требует междисциплинарных исследований и учёта множества взаимосвязанных факторов для достижения технологического и экономического оптимума.

4.1. Исследование на гигроскопичность

Рассматривая комплекс проблем, связанных с долговечностью деревянных конструкций, нельзя недооценивать роль физических свойств материала. Особенно важно учитывать такие характеристики, как гигроскопичность и способность к увлажнению, поскольку именно они становятся ключевыми факторами при решении многочисленных инженерных задач.

Для проведения экспериментальных исследований в данной области был применён метод [6], регламентированный ГОСТ 16483.19–72, который обеспечивает точные и воспроизводимые результаты. Данный стандартизованный подход предполагает использование эксикатора с дистиллированной водой ($pH=5,4$), в котором на специальных эксикаторных вставках размещаются обработанные защитными составами и контрольные образцы древесины (рис.4.1).

Важно отметить, что такая методика позволяет не только количественно оценить влагопоглощение, но и проанализировать эффективность различных защитных составов, применяемых для обработки древесины в строительной

отрасли и производстве.

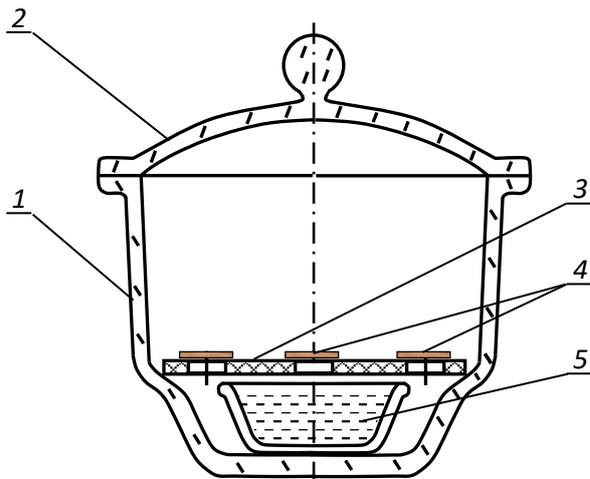


Рисунок 4.1 – Схема и внешний вид устройства для определения влагопоглощения образцов:
1 – эксикатор; 2 – крышка эксикатора; 3 – эксикаторная вставка; 4 – образцы;
5 – ёмкость с насыщенным раствором соды

Образцы имели форму прямоугольных призм с размером основания 20x20 мм, их высушивали до постоянной массы при температуре 100 – 105 °С. После в эксикатор 1 заливали дистиллированную воду для создания среды с относительной влажностью 100 % и на специальные вставки 3 помещали заготовки 4. Закрывали крышку 2.

На протяжении всего эксперимента эксикатор поддерживали при постоянной температуре 20 °С. И, согласно установленному графику, проводили наблюдение за изменением массы образцов.

Взвешивание образцов (рис.4.2) осуществлялось не хаотично, а согласно строгому временному регламенту:

- через 24 часа после начала эксперимента;
- через 48 часов (2 суток);
- через 72 часа (3 суток);
- на шестые сутки эксперимента;
- на девятые сутки;
- на тринадцатые сутки;
- на двадцатые сутки.

После достижения 20-суточной отметки взвешивание проводилось с интервалом

в 10 суток до достижения общей продолжительности эксперимента в 40 суток.

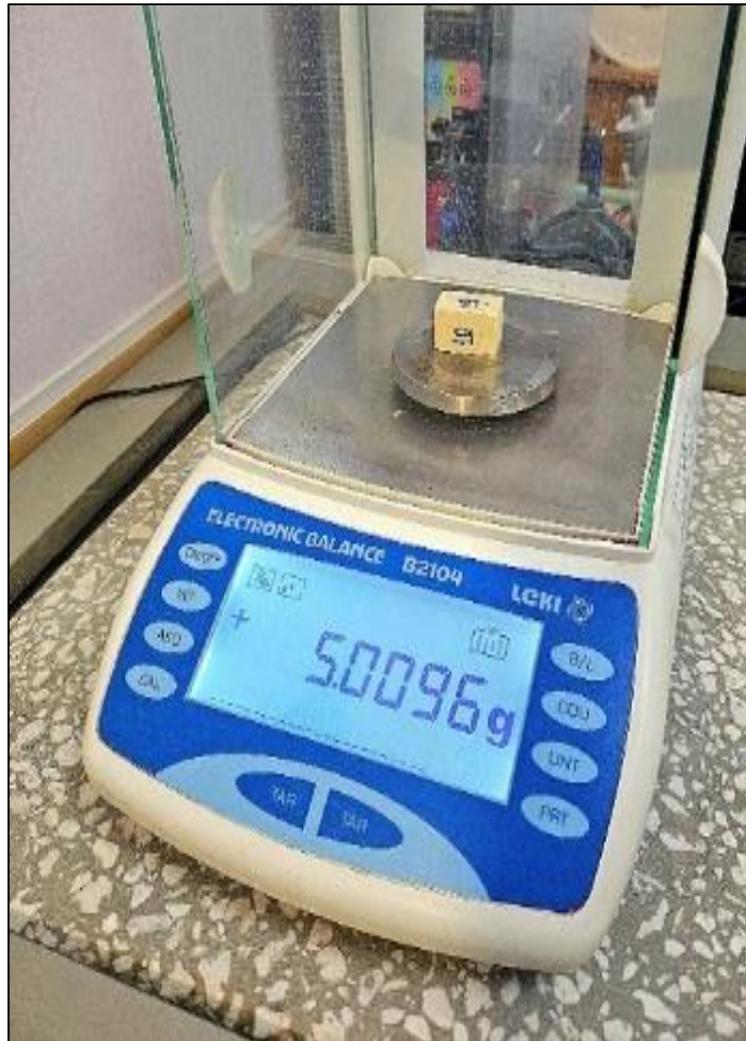


Рисунок 4.2 – Взвешивание образцов

После достижения 20-суточной отметки взвешивание проводилось с интервалом в 10 суток до достижения общей продолжительности эксперимента в 40 суток.

Рисунок 4.3 демонстрирует комплексные зависимости массовых показателей исследуемых образцов от продолжительности их контакта с влажной средой. Представленные графики показывают прогрессивные изменения относительной массы материалов в условиях длительной выдержки в среде с повышенной влажностью.

Полученные результаты позволяют проследить несколько ключевых аспектов:

- скорость насыщения образцов влагой на различных этапах эксперимента;

- предельные значения водопоглощения для каждого типа материала;
- сравнительную гигроскопичность исследуемых образцов;
- возможные структурные изменения при длительном воздействии влаги.

Полученные зависимости могут служить основой для прогнозирования стабильности свойств материалов в реальных эксплуатационных условиях с переменной влажностью. Результаты исследования критически важны при разработке материалов для применения во влагонасыщенных средах.

По результатам анализа графиков можно сделать следующие выводы:

1. Облучение древесины ультрафиолетовым излучением приводит к увеличению её гигроскопичности. Это обусловлено тем, что УФ-излучение разрушает целлюлозу, что делает поверхность материала более пористой и облегчает проникновение жидкости.

2. Высокотемпературная обработка древесины, наоборот, снижает её гигроскопичность.

3. С увеличением времени обработки древесины улучшается её влагостойкость.

4. После последующего процесса ультрафиолетового фотоокисления термомодифицированной древесины наблюдается незначительный рост гигроскопичности образцов.

5. Продолжительность ультрафиолетовой обработки материала имеет важное значение для изменения его гигроскопичности в условиях выдержки во влажной среде.

При увеличении времени воздействия ультрафиолетового излучения на образцы наблюдалось увеличение гигроскопичности. Особенно значительное повышение гигроскопичности древесины отмечается при обработке материала ультрафиолетовым излучением длительностью от 60 до 90 минут.

Полученные результаты исследований гигроскопичности образцов древесины, прошедшей ультрафиолетовую обработку, термомодифицирование и ультрафиолетовую обработку представлены на рисунке 4.3. Как видно из рисунка 4.3. наибольшая гигроскопичность наблюдается у образцов древесины, прошедших

только ультрафиолетовую обработку при высоких значениях дозы облучения.

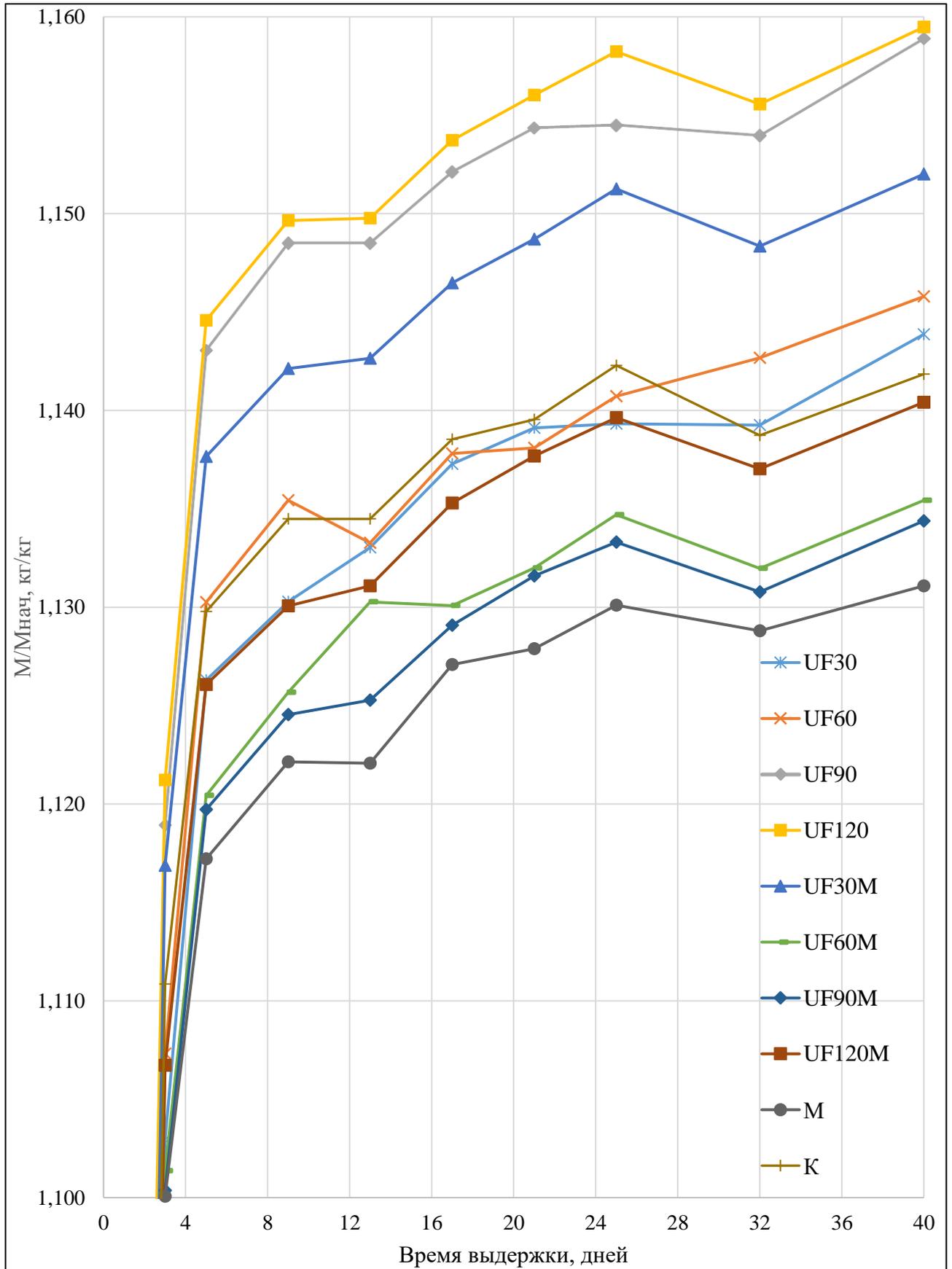


Рисунок 4.3 – Динамика изменения относительного веса образцов из древесины в условиях повышенной влажности

У образцов, прошедших термомодифицирование с последующей ультрафиолетовой обработкой, существенного увеличения гигроскопичности не наблюдается. Даже в случае высоких доз ультрафиолетового облучения показатели гигроскопичности сохраняются на значениях близких с гигроскопичностью термомодифицированной древесины.

4.2. Исследования на эффективность пропитки огнезащитными составами

Для определения интенсификации процессов пропитки деревянных конструкций были взяты образцы из древесины сосны с влажностью от 5 % до 10 %, которые получили путём распиловки и обработки на фуговальном станке. Древесные образцы подготовили в виде прямоугольных брусков с поперечным сечением 30х60 мм и длиной 150 мм в соответствии с НПБ 251-98. Образцы были предварительно взвешены и распределены по способам обработки [10] (рис.4.4).

Первая группа была подвержена термомодифицированию в среде «уходящих» газов котла-утилизатора тепловой электрической станции в составе парогазовой установки с отсутствием кислорода при температуре 207 °С. Вторая группа была подвержена облучению ультрафиолетом типа С со спектральным излучением 253 nm и в течении 90 минут бактерицидной ртутно-дуговой лампой мощностью 38 Вт. Третья группа была термомодифицирована в среде «уходящих» газов и подвержена облучению УФ-С (группа 1+группа 2). Четвертую группу оставили без изменения как контрольную.

Все образцы были покрыты средством для огнебиозащиты древесины фирмы Neomid, которое переводит древесину в трудновоспламеняемый и трудногорючий материал, обеспечивая первую группу огнебиозащитной эффективности согласно правилам пожарной безопасности.

Проводились испытания согласно ГОСТ Р 59292-2009 «Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на её основе. Общие требования. Методы испытания». Испытания образцов древесины показали положительный результат и соответствуют первой группе огнезащитной эффективности. Такая трудногораемая древесина может эксплуатироваться в общественных местах

(школах, административно-бытовых помещениях, а также производственных зданиях) с пределом огнестойкости до 150 минут [11].



Рисунок 4.4 – Образцы древесины, прошедшие испытания

Анализ проникающей способности в древесину проводился по двум параметрам: пропиточному коэффициенту по поглощению и пропиточному коэффициенту по глубине проникновения огнезащитного состава. Перед пропиткой образцы древесины вышеупомянутых групп маркировались и кондиционировались при температуре 20 °С и относительной влажности 65 % до достижения ими равновесной влажности. Метод покрытия образцов – погружение в рабочий раствор в течении 5-ти минут при температуре окружающей среды 20 °С.

После этого образцы извлекались, досушивались и взвешивались. На основании изменения массы до и после пропитки составом определялся пропиточный коэффициент по поглощению защитного состава:

$$K_1 = \frac{m_1 - m_0}{m_0}, \quad (4.1)$$

где m_0 – масса образца древесины до пропитки, г; m_1 – масса образца древесины после пропитки, г.

Далее образцы раскалывали вдоль волокон и определялась глубина проникновения защитного состава. Для измерения использовался штангенциркуль с погрешностью измерения 0,05 мм. Для точности измерения использовался

цифровой микроскоп Digital Microscope 15 – 40 mm с увеличением $50^x - 100^x$.

За глубину проникновения защитного состава вдоль волокон принималось среднеарифметическое значение четырёх измерений. Пропиточный коэффициент по глубине проникновения защитного состава определялся как отношение глубины проникновения к половине толщины образца (вследствие симметричности):

$$K_2 = \frac{h_{гп}}{h_0}, \quad (4.2),$$

где h_0 – половина толщины образца, мм; $h_{гп}$ – глубина проникновения защитного состава, мм.

Итоговые результаты проведённых исследований и расчёты пропиточных коэффициентов по глубине проникновения и по поглощению указаны в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Расчёты пропиточных коэффициентов

№ группы	1	2	3	4
Метод обработки образцов	ТМ, $\theta=0,7$; $J=0\text{кДж/м}^2$	УФ-С, $\theta=0$; $J=7,39\text{кДж/м}^2$	ТМ+УФ, $\theta=0,5$; $J=7,39\text{кДж/м}^2$	К, $\theta=0$; $J=0\text{кДж/м}^2$
Пропиточные коэффициенты по поглощению	0,057	0,081	0,078	0,041
Пропиточные коэффициенты по глубине проникновения	0,064	0,094	0,073	0,051

Необходимо отметить, что для оценки эффективности обработки проникающей способности огнезащитным составом важное значение имеют пропиточные коэффициенты по поглощению, а не по глубине, поскольку образование насыщенного защитного слоя будет способствовать лучшей огнестойкости древесной поверхности.

Полученные данные были исследованы методом цифровой микроскопии с увеличением от 50 до 100 крат, результаты представлены в таблице 4.2.

Из таблицы 4.2 видно, что контрольный образец древесины №4 обладает самой низкой впитывающей способностью. Это обусловлено тем, что хвойные породы вследствие смолистости плохо пропитываются методом погружения.

Образцы, прошедшие только термическую модификацию №2, имеют средние значения пропиточных коэффициентов как по поглощению, так и по глубине проникновения пропиточного состава. Объясняется это тем, что при термомодификации несмотря на снижение смачиваемости образца происходит увеличение поверхностных пор древесины, а также удаление смол, что и вызывает некоторое увеличение пропитывающей способности.

Что касается образцов 2-й группы, обработанных ультрафиолетом, то можно сказать, что повышение значений пропиточных коэффициентов объясняется следующими эффектами: фотодеградация смол на поверхности образца и повышение смачиваемости поверхности.

По данным микроскопии образцов 3-й группы (ТМ+УФ) видно, что образуется насыщенный тонкий слой пропитывающего состава, который имеет большую толщину, чем образцы, подверженные только термической модификации. Однако глубина проникновения и интенсивность окраски защитного средства уступают образцам, обработанным только ультрафиолетом. Этим объясняется среднее значение пропиточного коэффициента по поглощению и низкое значение коэффициента по глубине проникновения пропитывающей жидкости.

Таким образом, наилучшими вариантами предварительной обработки древесины перед пропиткой являются методы ультрафиолетовой обработки и термической обработки в сочетании с УФ.

Учитывая основную функцию огнезащитного средства – создание защитного барьера при воспламенении древесины – то в этом случае термомодифицирование с ультрафиолетовой обработкой обеспечивает эффективную способность древесины к поглощению защитного средства при незначительной глубине пропитки.

При этом предварительное термомодифицирование с ультрафиолетовой обработкой обеспечивает хорошую впитывающую способность древесины при минимальной глубине проникновения огнезащитного средства. Данное обстоятельство играет решающую роль именно при организации пропитки

огнезащитными составами, основное назначение которых является создание не проницаемой для огня плёнки.

Таблица 4.2 – Исследование методом цифровой микроскопии

N группы	Фото образцов	Результат
1		Незначительное проникновение
2		Значительное проникновение пропитывающего состава
3		Достаточное проникновение пропитывающего состава
4		Незначительное проникновение пропитывающего состава

При этом предварительное термомодифицирование с ультрафиолетовой обработкой обеспечивает хорошую впитывающую способность древесины при

минимальной глубине проникновения огнезащитного средства. Данное обстоятельство играет решающую роль именно при организации пропитки огнезащитными составами, основное назначение которых является создание не проницаемой для огня плёнки.

В практике противопожарной безопасности важно иметь надёжные инструменты для быстрой проверки качества огнезащитной обработки. Поэтому был использован мобильный прибор ПМП-1 для проведения экспресс-диагностики эффективности противопожарной защиты деревянных конструкций. Согласно рекомендациям ГОСТ 53292-2009 [18] данное устройство позволяет оперативно оценивать состояние огнезащитного покрытия непосредственно на объекте.

Прибор ПМП-1 состоит из следующих элементов: корпус, газовая горелка, поворотная крышка и зажимное устройство.

В качестве газовой горелки рекомендуется использовать бытовую газовую зажигалку (предпочтительно с регулируемой высотой пламени).



Рисунок 4.5 – Внешний вид прибора ПМП-1 с образцами древесины до и во время проведения испытаний

При потере массы образца более 25 % считается, что огнезащитный состав не обеспечивает огнезащиту древесины и объект не может быть допущен к

эксплуатации. За образцами проводилось визуальное наблюдение во время испытания и их осмотр после извлечения из прибора.

Результаты испытания на огнестойкость представлены на рисунке 4.6. Все образцы были взвешены до и после испытаний, произведён анализ (рис.4.7).



Рисунок 4.6 – Проведение испытаний древесины на огнестойкость

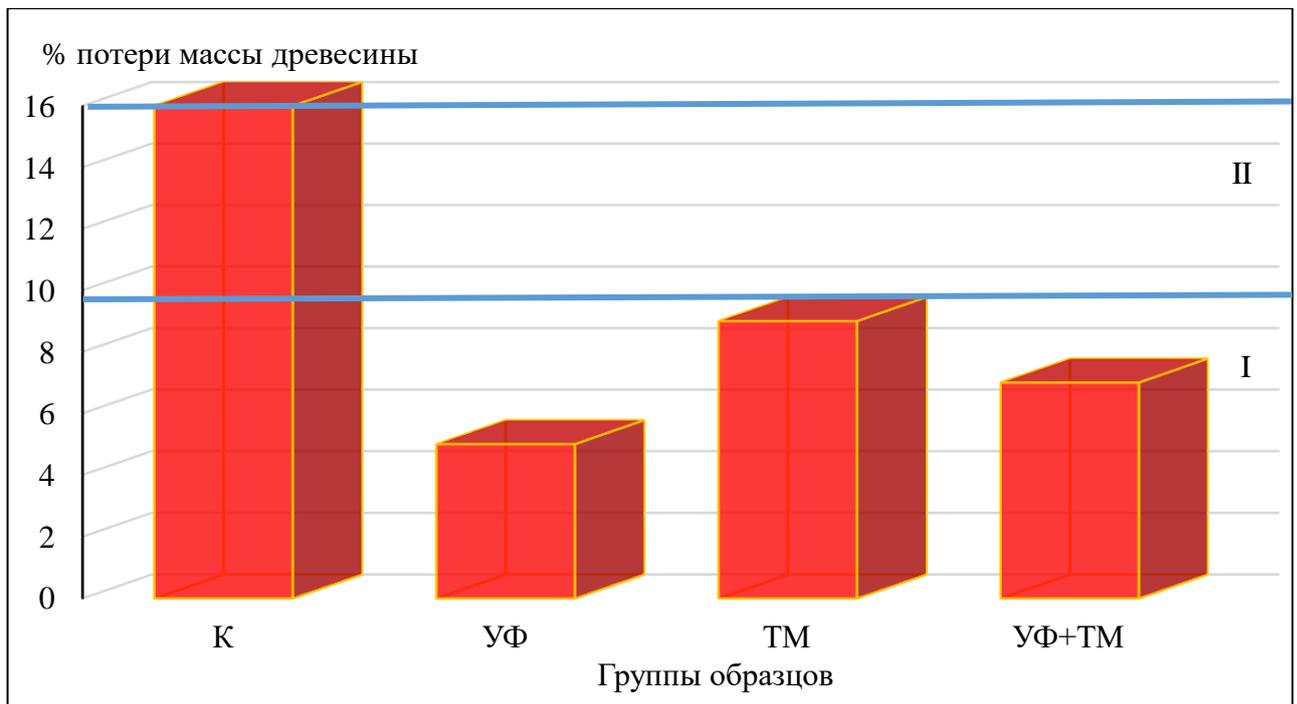


Рисунок 4.7 – Диаграмма изменения массы объектов огнезащиты

Контрольный образец: произошло изменение формы, тление и обугливание, самостоятельное горение отсутствовало, имеет огнестойкость защиты – II, поскольку изменение массы после огневого испытания составило 16 %.

По остальным образцам: произошло изменение цвета, самостоятельного горения образцов после отключения источника горения и прогорания образцов не установлено, изменение масс образца составило менее 9 %, огнестойкость объекта защиты высокая – I. Таким образом, модификация древесины только улучшает её стойкость к огню и может применяться в гражданском и промышленном строительстве.

4.3. Исследования на прочность клеевого шва

В настоящем параграфе приведены экспериментальные исследования по определению механических свойств образцов древесины, склеенных при различных режимах.

Часть партии образцов подвергали всестороннему анализу, а другую часть использовали для исследования взаимодействия древесины со связующим материалом.

Были проведены исследования прочности клеевых соединений при испытании склеенных образцов древесины на сдвиг. В качестве модельного материала были взяты высушенные до 7 % образцы сосны обыкновенной, которые далее были разбиты на несколько групп. В первых четырёх группах образцы были подвергнуты фотоокислению в спектре ультрафиолета (UF³⁰, UF⁶⁰, UF⁹⁰, UF¹²⁰) со спектральным излучением 253 nm бактерицидной ртутно-дуговой лампы мощностью 38 Вт в течении соответственно 30, 60, 90, 120 минут. Вторая четвёрка групп образцов сосны была термомодифицирована в среде «уходящих» газов газового котла при температуре 200 – 210 °С в течении 4,5 часов с последующим фотоокислением в спектре ультрафиолета (UF³⁰M, UF⁶⁰M, UF⁹⁰M, UF¹²⁰M) в течении 30, 60, 90 и 120 минут соответственно [10]. Третья группа образцов была подвергнута только термомодифицированию (M) в среде «уходящих» газов при тех же режимах, что и вторая четвёрка образцов. И наконец, к последней группе относились контрольные образцы, не подвергавшиеся влиянию внешних факторов (Control). Режимы обработки указаны в таблице 4.3.

Для проведения исследований опытных образцов древесины на прочность при сдвиге использовалась универсальная испытательная машина. Её внешний вид представлен на рисунке 4.8. Подготовка образцов для проведения экспериментов по определению прочности клеевого соединения между соединяемыми деталями на сдвиг в результате приложения к этим деталям растягивающего усилия проводилась в соответствии с ГОСТ 14759-69 [11]. Внешний вид образцов представлен на рисунке 4.8.



Рисунок 4.8 – Испытательная машина РКМ-300.2

Таблица 4.3 – Режимы обработки древесины

Обозначение		К	UF ³⁰	UF ⁶⁰	UF ⁹⁰	UF ¹²⁰	М	UF ³⁰ М	UF ⁶⁰ М	UF ⁹⁰ М	UF ¹²⁰ М
Режим обработки образцов	Θ _{ТМ}	0	0	0	0	0	0,56	0,21	0,32	0,56	0,73
	J, кДж/м ²	0	2,466	4,932	7,398	9,864	0	2,466	4,932	7,398	9,864

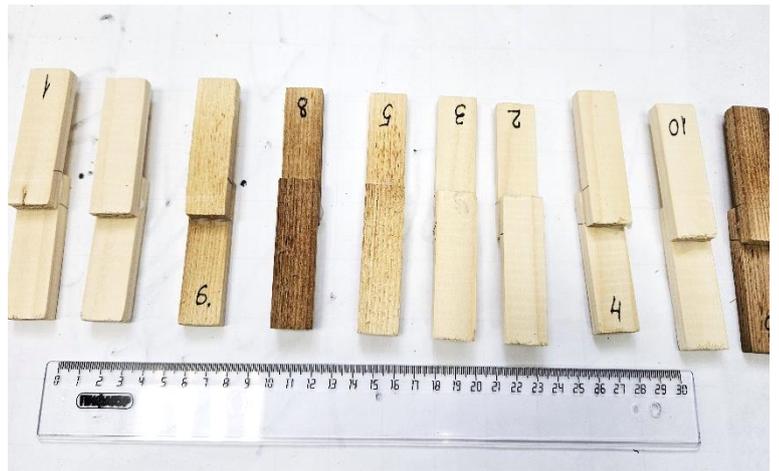
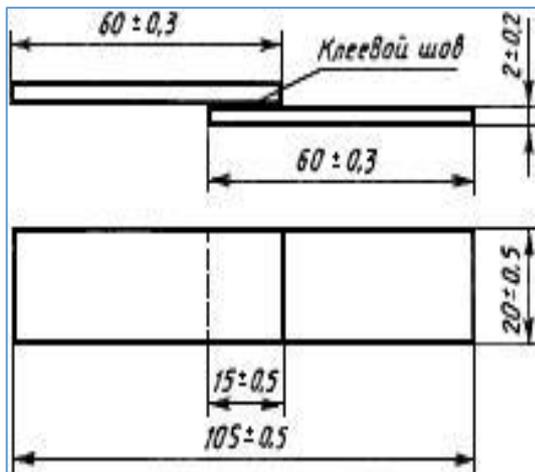


Рисунок 4.9 – Подготовленные образцы для испытаний

Форма, размеры и параллельность сторон испытуемых образцов: ширина перекрытия склеиваемых частей $12,5 \pm 0,25$ мм (рис.4.9), структура клеёного образца в один нахлест. Две пластины этих образцов были покрыты соответствующим количеством клея из расчёта 130 г/м^2 клея поливинилацетата $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_2$ на поверхности одного образца, а затем были собраны в соответствии с требованиями технологии склеивания. Склеенные образцы хранили при температуре $18 - 22 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 10 дней, пока клей не был полностью отверждён.

Исследования прочности склеенных образцов на разрыв проводились на испытательной машине РКМ-300.2 с постоянной скоростью загрузки 20 мм/мин . Машина работает таким образом, что напряжение испытательного соединения или его деформация возрастают с постоянной скоростью (т.е. в установившемся режиме). Эта скорость возрастания напряжения такова, что соединение средней прочности разрывается по истечении времени. Максимальную нагрузку при разрыве регистрируют как разрывное усилие для конкретного образца. Результаты, полученные при разрыве образца в любом другом месте, помимо

самого адгезионного соединения, не учитывают за исключением случая проведения ходовых испытаний. Данные испытаний указаны в таблице 4.3 и в Приложении Б.

Результаты исследования, представленные в таблице 4.4, указывают на то, что при минимальном ультрафиолетовом облучении натуральной древесины наблюдается незначительное увеличение прочности клеевого соединения на разрыв. В частности, после 60 минут облучения прочность соединения увеличивается на 3,6 %. Однако при увеличении времени выдержки до 90 минут наблюдается снижение прочности на 18,7 % по сравнению с контрольным образцом, где натуральная древесина была склеена без какой-либо предварительной обработки УФ-излучением.

Это снижение можно объяснить увеличением глубины проникновения клея в материал, что приводит к недостаточному количеству клея в соединении. Таким образом, предварительная УФ-обработка немодифицированной древесины нецелесообразна для процессов склеивания, поскольку приводит к увеличению расхода клея.

Таблица 4.4 – Результаты испытаний

Группы образцов	Control	UF ³⁰	UF ⁶⁰	UF ⁹⁰	UF ¹²⁰	M	UF ³⁰ M	UF ⁶⁰ M	UF ⁹⁰ M	UF ¹²⁰ M
Максимальная деформация, мм	2,257	2,346	2,349	2,446	2,408	1,963	1,938	1,971	1,943	1,908
Предел прочности, Н/мм ²	7,507	7,613	7,783	6,103	5,293	5,59	5,76	5,87	6,847	5,52

В контексте склеивания термически модифицированной древесины предел прочности клеевого соединения при растяжении значительно снижается по сравнению с немодифицированным контрольным материалом, о чём свидетельствует серия исследований [56,78]. Однако воздействие ультрафиолетового излучения в течение 90 минут улучшает качество склеивания, увеличивая его на 22,4 % и приближая прочность склеивания модифицированной древесины к прочности немодифицированного материала. Разница в этих

параметрах прочности составляет менее 9 %. И наоборот, увеличение продолжительности воздействия ультрафиолетовых лучей на термически модифицированную древесину до 120 минут приводит к заметному снижению прочности склеивания. Поэтому при склеивании термически модифицированной древесины можно использовать предварительную УФ-обработку склеиваемых поверхностей для повышения качества склеивания при условии тщательного контроля дозы ультрафиолетового облучения.

4.4 Анализ химических изменений в образцах древесины

В качестве материала для исследования были взяты высушенные до 5 – 7 % влажности образцы сосны обыкновенной, которые далее были разбиты на несколько групп. Первая группа представляла собой образцы необработанной древесины и использовалась в качестве контрольной. Вторая группа была подвержена термомодифицированию (М) в среде «уходящих» газов котла-утилизатора с отсутствием кислорода при температуре 210 °С в течении 12 часов. Третья группа образцов была подвержена облучению ультрафиолетом (УФ) типа С с помощью бактерицидной ртутно-дуговой лампы с общей дозой ультрафиолетового облучения 7,4 кДж/м², длина волны составляла 253 нм. Четвертая группа образцов сосны была термомодифицирована в среде «уходящих» газов газового котла при температуре 200 – 210 °С с последующим фотоокислением в спектре ультрафиолета (ТМ+УФ). С целью обеспечения представительности проб образцы сосны брали без влияния антропогенных факторов окружающей среды, далее их измельчали до фракции 0,5 – 1,0 мм и высушивали на открытом воздухе [53].

Исследования проводили с помощью ИК-Фурье спектрометра Frontier (Perkin Elmer) с применением приставки нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) с кристаллом ZnSe при условиях: разрешение 4 см⁻¹, диапазон измерений 4000 см⁻¹ – 500 см⁻¹. Спектр фона проходил регистрацию перед каждым измерением, обработка спектров проводилась помощью программы OPUS Spectra.

В таблице 4.5 представлены полосы пропускания образцов, выделенных с помощью программного приложения. Графическое изображение результатов приведено на рисунке 4.10 и в Приложении А.

Таблица 4.5 – Результаты испытаний

№ п/п	Полосы пропускания, см ⁻¹			
	Control (492)	UF (493)	M (494)	UF+M (495)
1	3344,27	3343,28	3339,34	3344,67
2	2893,63	2893,57	2893,11	2896,98
3	1731,76	Сл.	Сл.	Сл.
4	1508,90	1508,76	Сл.	1508,56
5	1420,79	Сл.	Сл.	Сл.
6	1369,66	Сл.	Сл.	Сл.
7	1264,02	1265,17	1264,07	1264,24
8	1023,73	1026,46	1024,15	1023,47
9	610,99	599,07	602,70	610,56

Сл. – интенсивность полосы слабая или размытая.

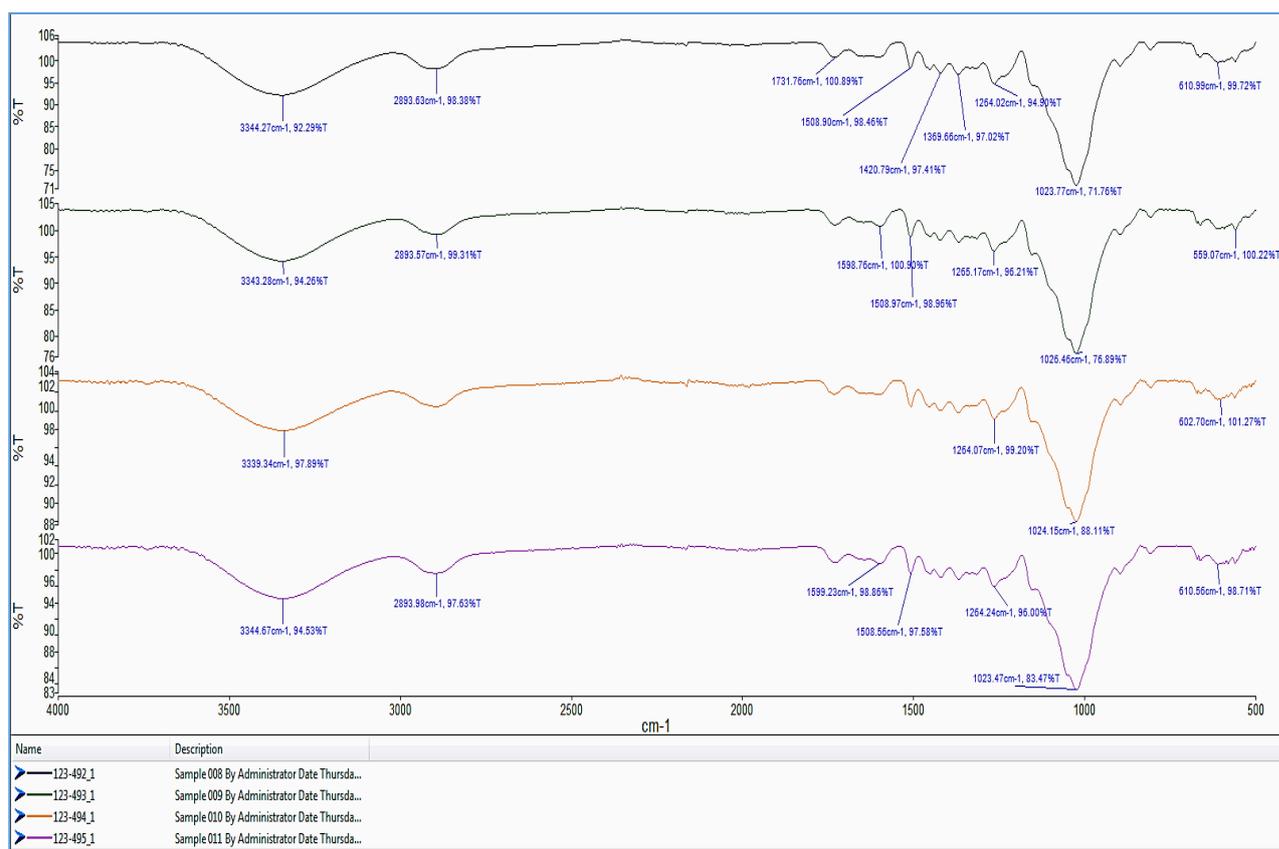


Рисунок 4.10 – Результаты аналитических испытаний

Данные, представленные в таблице 4.5, отражают результаты экспериментального анализа концентрации ключевых компонентов в древесине с

доверительным интервалом ± 1 % при уровне достоверности 95 %. С помощью спектрального анализа образцов древесины сосны обыкновенной удалось выявить наличие спектральных полос поглощения в инфракрасных спектрах, указывающих на различные компоненты древесины, а также полос, указывающих на взаимодействие между этими компонентами (Приложение А).

Анализ полученных ИК-спектров показал наличие областей характерного поглощения образцов сосны. Основные характерные полосы поглощения, выявленные в результате спектрального исследования пород древесины, разделены на девять подгрупп:

1. 3460-3300 см^{-1} . Валентные колебания гидроксильных групп: модифицированные образцы смещаются в область более низких значений и степень поглощения становится больше. Это смещение указывает на образование более прочных водородных связей [71]. Основное различие по времени поглощения, как у контрольного образца 92 %, УФ – 99 %, М – 98 %, а у УФ+М – 97 %;

2. 3100-2750 см^{-1} . Валентные колебания связей С-Н в метильных и метиленовых группах: из данных ИК-спектроскопического анализа следует, что положение в данном диапазоне для всех исследуемых групп совпадает. При модифицировании и ультрафиолете происходит незначительное смещение максимумов в низкочастотную область. Это указывает на увеличение количества –СН₂ групп в образцах по сравнению с исходной древесиной и подтверждает факт химического воздействия на образцы;

3. 1740-1710 см^{-1} . Валентные колебания связей С=О в карбонильных соединениях: в образцах, подверженных испытаниям, наблюдается резкое уменьшение интенсивности данной полосы, что указывает на химическое взаимодействие молекул С=О группами лигнина и гемицеллюлоз, и указывает на отсутствие влаги во всех образцах, кроме контрольного [11];

4. 1599-1508 см^{-1} . Валентные колебания связей С=О пара-замещённых фенолов колец лигнинов и скелетные колебания связей С-С ароматического гваяцильного кольца: модифицирование древесины не влияет на положение полос,

т.к. при воздействии на древесину не происходит разрушения ароматических колец лигнина [49];

5. 1430-1420 cm^{-1} . Изменения в интенсивности полос, связанных с плоскостными деформационными колебаниями С-Н и скелетными колебаниями ароматических С-С связей: определено, что у УФ- минимальны по сравнению с соседними пиками. Основные цепи макромолекулярных составляющих древесины не сохраняют свою структуру, имеются признаки разрушения или модификации;

6. 1370-1363 cm^{-1} . Деформационные симметричные колебания связей С-Н в CN_3 группах: аналогично пункту 5 происходит разрушения цепочек, пики сильно выражены;

7. 1270-1260 cm^{-1} . Скелетные колебания G-кольца и деформационные колебания связи С=О как в исходной, так и в испытуемой древесине сосны связаны с колебаниями ароматического кольца гваяцильного типа, что соответствует хвойным породам дерева, колебания С-О связи в лигнине [40];

8. 1035-1022 cm^{-1} . Деформационные плоскостные колебания связей С-Н в ароматическом кольце относят к первичной спиртовой группе целлюлозы в различных конформациях: основное различие по времени поглощения Т, %, как у контрольного образца, минимальное значение 71,7 %, УФ – 76,9 %, М – 88,1 %, а у УФ+М – 83,5 %;

9. 659-558 cm^{-1} . Деформационные колебания гидроксильных групп целлюлозы и ксилана.

Отнесение обнаруженных полос поглощения к колебаниям соответствующих функциональных групп и химических связей, основанное на анализе инфракрасных спектров, позволило выявить ключевые различия в расположении пиков поглощения в хвойной древесине в девяти различных областях спектра, которые соответствуют колебаниям различных связей в древесине: гваяцильные кольцевые структуры лигнинов.

Современные аналитические методы исследования позволяют нам глубоко изучить трансформацию материалов под воздействием различных факторов. Особый интерес представляют изменения в химической структуре древесины,

происходящие после термической модификации.

При спектроскопическом исследовании термически обработанных образцов обнаружены значительные структурные преобразования. Химические изменения в полимерной матрице проявляются в виде специфических сдвигов и вариаций интенсивности полос пропускания. Наиболее информативными оказались диапазоны 2902,05 и 1736,67 см^{-1} , где наблюдаются изменения, свидетельствующие о дегидратации материала и реорганизации карбонильных функциональных групп.

Когда УФ лучи взаимодействуют с молекулами, происходит фотолитическое разрушение С-С связей, что регистрируется характерными колебаниями в спектре. Разрыв этих связей инициирует каскад химических превращений, существенно меняющих физико-химические свойства материала. В результате деструкции молекулярных цепочек формируются активные центры, где впоследствии образуются С-Н связи.

Особенно интересным аспектом данного процесса является последующее взаимодействие с атмосферным кислородом. Новообразованные С-Н группы проявляют высокую реакционную способность, что способствует адсорбции молекул O_2 из окружающей среды. Этот процесс сопровождается окислительными реакциями, приводящими к формированию новых двойных связей в структуре материала.

Конечным результатом описанных молекулярных трансформаций становится значительное изменение гидрофильных свойств исследуемого соединения. Образование полярных групп и перестройка электронной плотности в молекуле обуславливают повышенную гигроскопичность материала, что необходимо учитывать при его практическом применении в различных условиях эксплуатации.

Глава 5. ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

В ходе изучения в предыдущей части было обнаружено, что облучение ультрафиолетом деревянных образцов приводит к повышению смачиваемости материала, что обусловлено расширением и разрыхлением пор на поверхности древесины. Было установлено, что повышение смачиваемости деревянных образцов напрямую зависит от дозы ультрафиолетового излучения. Одновременно обнаружено противоположное воздействие тепловой обработки. Смачиваемость древесины уменьшается при повышении температуры и времени проведения обработки.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности оптимизации технологических процессов подготовки древесины для строительного применения и разработке новых методик повышения долговечности деревянных конструкций в различных климатических условиях эксплуатации.

5.1. Промышленная реализация результатов исследования ТМД

В современной индустрии электротехнических коммуникаций актуальной остаётся проблема сохранности кабельной инфраструктуры. Существующие решения часто не обеспечивают долговременной эксплуатационной надёжности в сложных условиях. Традиционное использование деревянных опорных элементов в кабельных каналах сопряжено с рядом существенных недостатков:

- прогрессирующее биологическое заражение материала;
- структурная деформация под воздействием климатических факторов;
- критическое сокращение эксплуатационного срока в условиях повышенной влажности;
- нестабильность при температурных колебаниях в диапазоне от -30 °С до +35 °С.

Исследования, представленные во второй главе, были направлены на

преодоление указанных ограничений через термическую модификацию древесины. После успешного завершения лабораторной фазы эксперимента была произведена практическая имплементация полученных результатов.

Особую значимость данный метод приобретает в контексте обеспечения безопасности на объектах, где категорически запрещено использование технологий с применением открытого пламени. Термомодифицированная древесина предлагает оптимальное решение для монтажа опорных конструкций в действующих кабельных каналах, гарантируя:

- повышенную устойчивость к деформации;
- значительное увеличение срока службы;
- сохранение эксплуатационных характеристик во влажной среде;
- расширенный температурный диапазон функциональной стабильности.

На рисунке 5.1 представлена закладка древесных материалов в котёл-утилизатор ТЭС, а также результат термомодифицирования по ключевым параметрам.

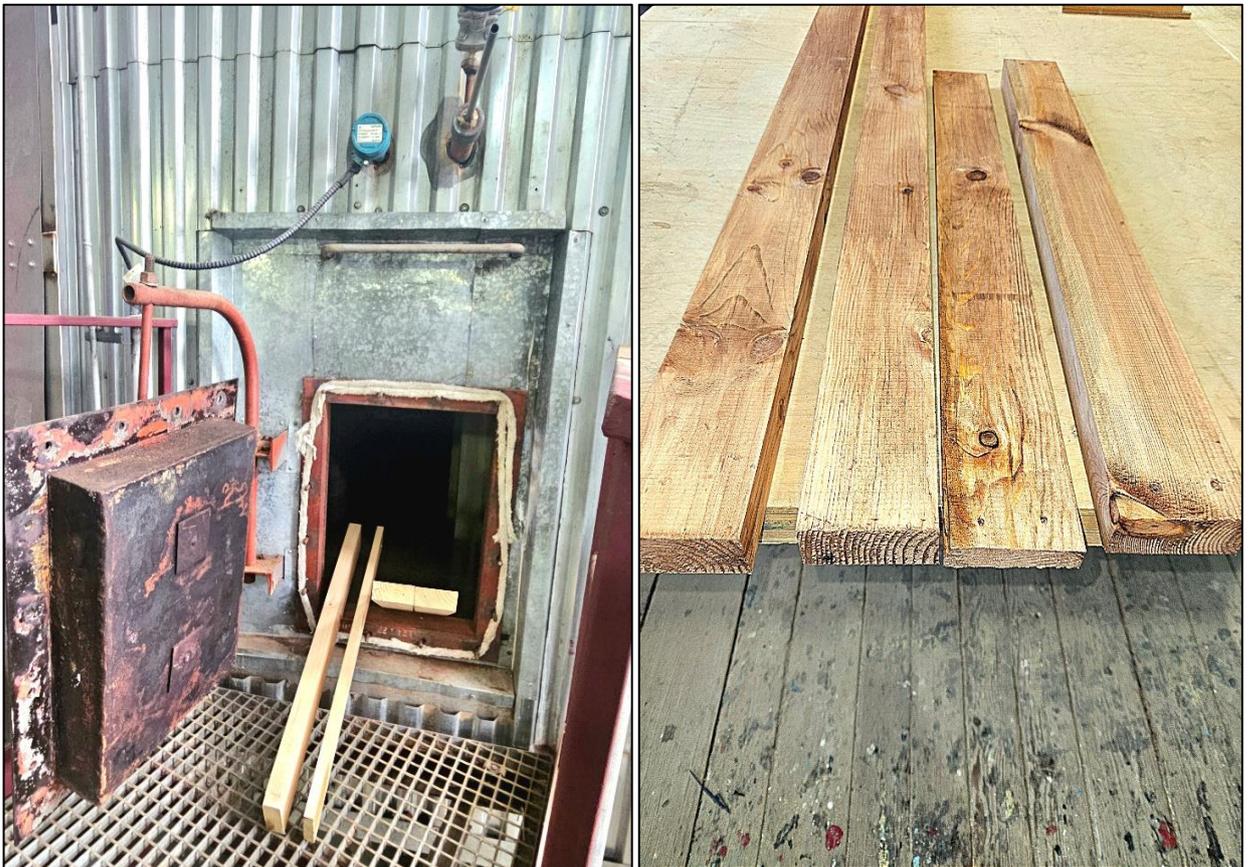


Рисунок 5.1 – Закладка древесины в котёл-утилизатор и результат ТМД

Таким образом, практическое применение термомодифицированной древесины представляет собой технологический способ в решении многолетних проблем кабельной инфраструктуры, совмещая экологичность материала с его улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Для практической реализации проекта была изготовлена специальная подпорная конструкция прямоугольной формы. Особое внимание уделялось подбору породы древесины – сосна была выбрана благодаря оптимальному сочетанию прочностных характеристик и обрабатываемости.

После завершения технологического цикла термической модификации и достижения расчётной плотности материала, была проведена УФ-обработка и пропитка огнезащитным составом. Готовое изделие было установлено в кабельный канал (рис.5.2).



Рисунок 5.2 – Установка подпорной рамы под кабели

Монтаж подпорной рамки для высоковольтных кабелей произведён в рамках этапа практической эксплуатации, во время которой будут оцениваться долговечность и надёжность разработанной конструкции.

Изменение размеров древесины вследствие поглощения или потери влаги, известное как разбухание и сжатие, является ключевым аспектом, который требует изучения.

В действующих кабельных каналах были проведены исследования на разбухание. Для сравнительного анализа были созданы подпорные рамки из сосны натуральной и сосны, прошедшей термообработку в среде «уходящих» газов котла утилизатора с последующим УФ-облучением. Все рамки были дополнительно обработаны огнезащитными составами. В течении 12 месяцев, десятого числа каждого месяца производились замеры относительной влажности ($W_{отн}$, %) и площадь вертикальной стойки подпорной рамки (S , m^2) с записью в журнал замеров исследования. Данные отражены на рисунке 5.3.

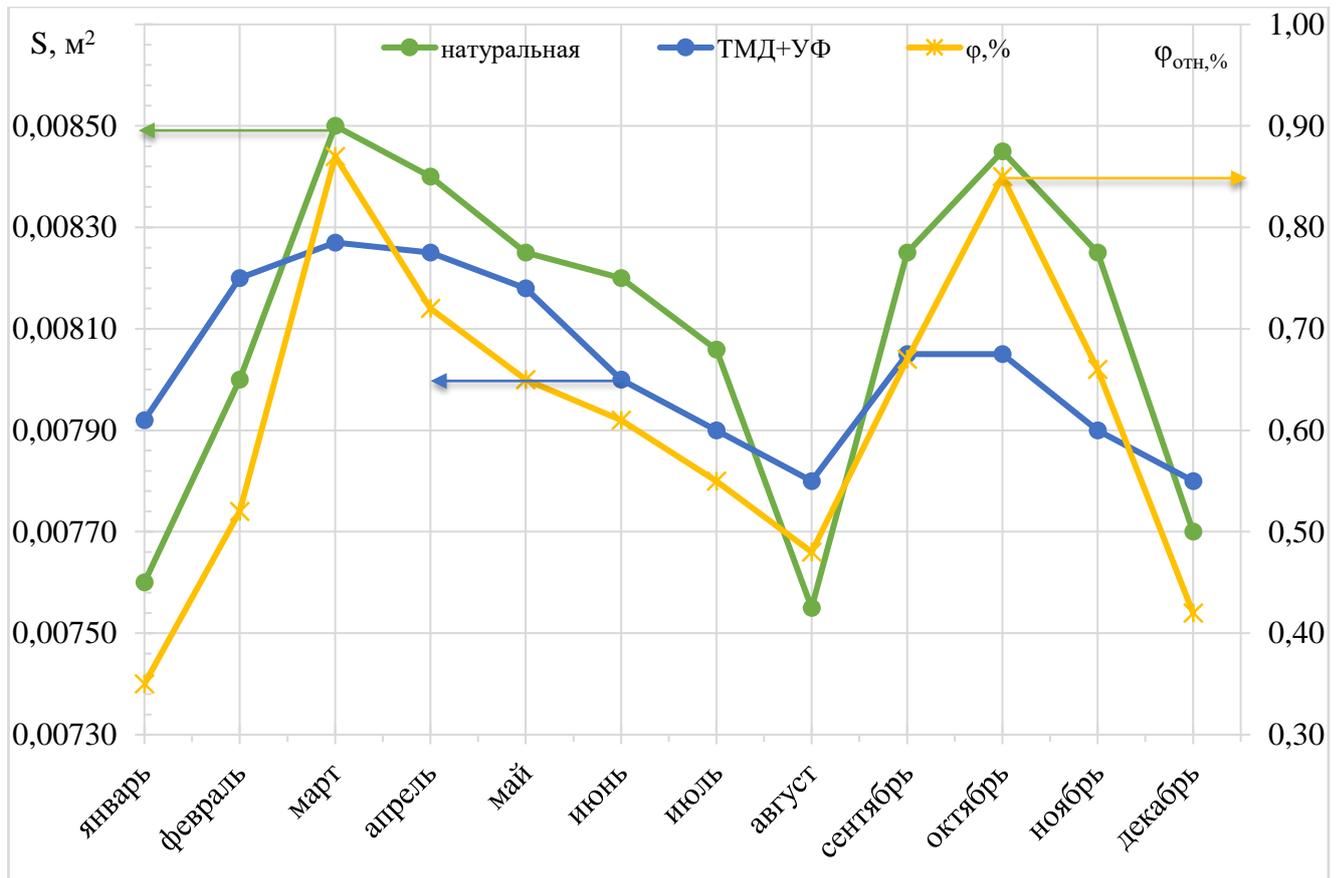


Рисунок 5.3 – График испытаний образцов сосны на разбухание

На рисунке 5.3 показано, что ТМД более стабильна по отношению к натуральной древесине при изменении относительной влажности в кабельном канале промышленного предприятия.

5.2. Анализ экономической эффективности внедрения устройства термомодифицирования в котле-утилизаторе

В главе 2 были проведены эксперименты по термомодифицированию образцов сосны в котле утилизаторе. 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 12X18Н10Т для термомодифицирования древесины. В данном отрезке котла-утилизатора есть возможность размещения установки. Принципиальная схема представлена на рисунке 5.4.

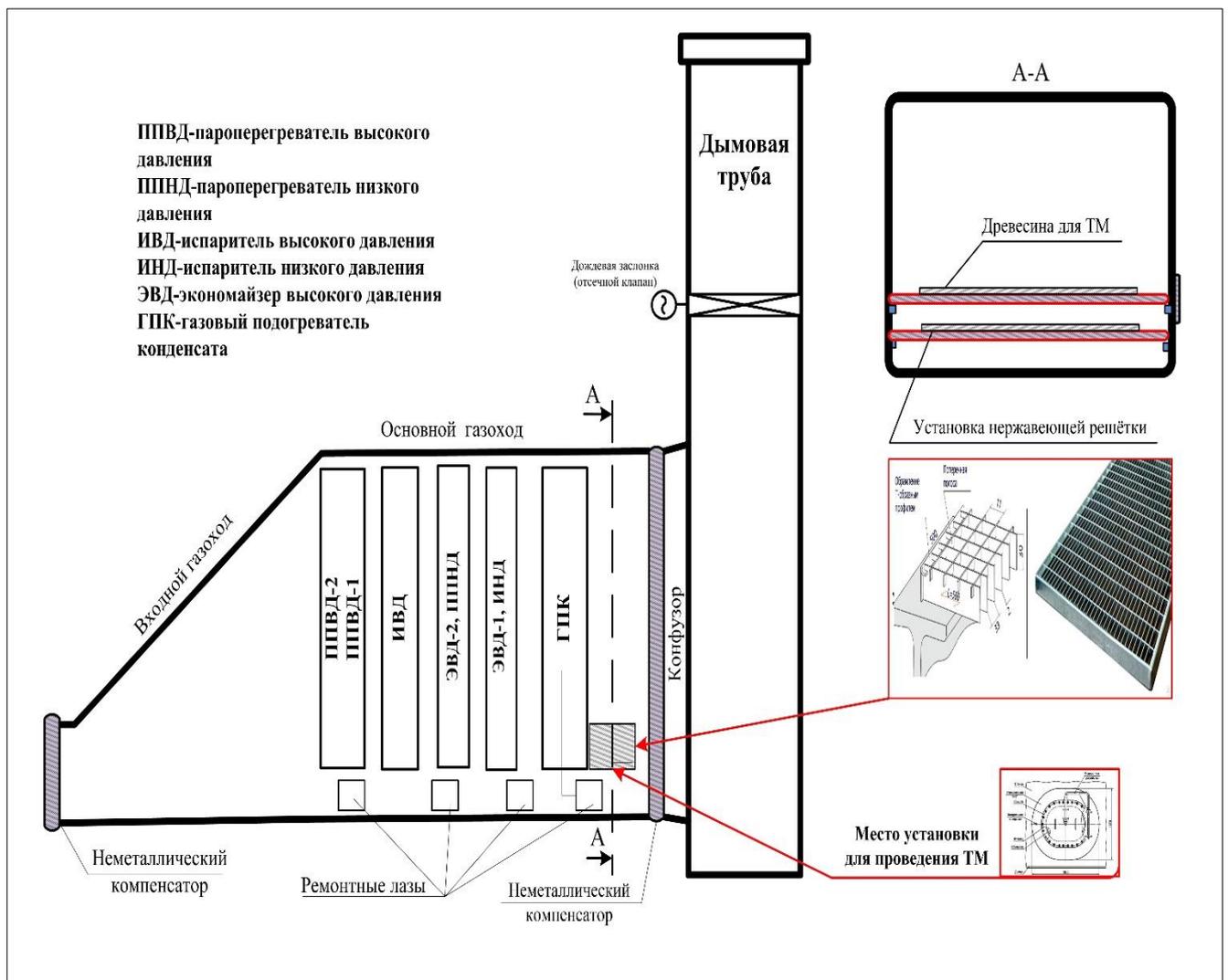


Рисунок 5.4 – Принципиальная схеме котла-утилизатора

Оценка экономической целесообразности технических решений указана в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сравнительный анализ технико-экономических показателей ТМД

Показатели	Единицы измерения	Значения	
		Затраты на изготовление ТМД из сосны обыкновенной	Покупная ТМД сосна
Стоимость 1м ³ Σ цена по РФ	Руб.	36381,6	95976
Потребность в год 10 м ³	Руб.	363816	959760
Стоимость работы по термомодифицированию 1м ³ , 2 слесаря 4 разряда за 8 часов, при зарплате 60200 руб./мес.	Руб.	5734	0
Стоимость работы по термомодифицированию 10м ³ .	Руб.	57340	0
Монтаж устройства (нерж.решетки) в котле-утилизаторе	Руб.	343241	0
Всего затраты	Руб.	764397	959760
Экономический эффект	Руб.	189363	–
Срок окупаемости затрат	Мес.	11	

В современной промышленности всё больше внимания уделяется эффективному использованию вторичных энергоресурсов. Проведённые исследования демонстрируют экономическую и технологическую целесообразность внедрения процесса термомодифицирования древесных материалов с использованием отходящих газовых потоков котла-утилизатора. Данный подход позволяет существенно оптимизировать энергопотребление предприятия.

Для конкретных производственных нужд компании такая технология

представляется особенно перспективной. Комплексный технико-экономический анализ подтверждает рациональность интеграции процесса термомодификации в существующий технологический цикл, что обеспечивает синергетический эффект при минимальных дополнительных затратах.

Важно отметить универсальность разработанной методологии. Методики и технические решения, подтвердившие свою эффективность в рамках данного исследования, могут быть успешно тиражированы на других электростанциях теплового типа, оснащённых сходными технологическими установками. Это открывает широкие перспективы для масштабирования данной технологии в энергетическом секторе, способствуя повышению общей ресурсоэффективности отрасли.

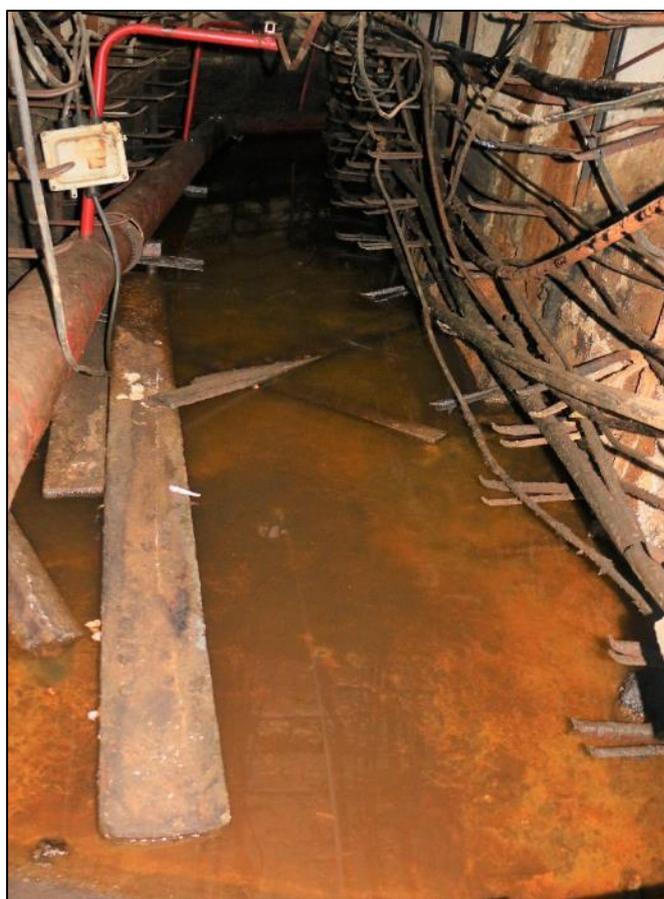
5.3. Исследования, произведённые в кабельных каналах тепловых электрических станций

При длительной эксплуатации кабельных каналов, туннелей и технологических проходов на промышленных предприятиях требуется поддерживать сооружения в исправном состоянии [46]. Данные сооружения имеют сложные комбинированные постройки из дерева, железобетона и металла и содержат множество технологических систем, таких как высоковольтные электрические кабели, сети освещения, сигнализации, пожаротушения, вентиляции и т.п. (рисунок 5.5). Для поддержания данных технологических конструкций необходимо проводить своевременную огнезащитную обработку кабельной продукции, металлоконструкций и деревянных ограждений от возгорания [42]. При этом для каждого вида поверхности предназначены определённые виды огнезащитных средств.

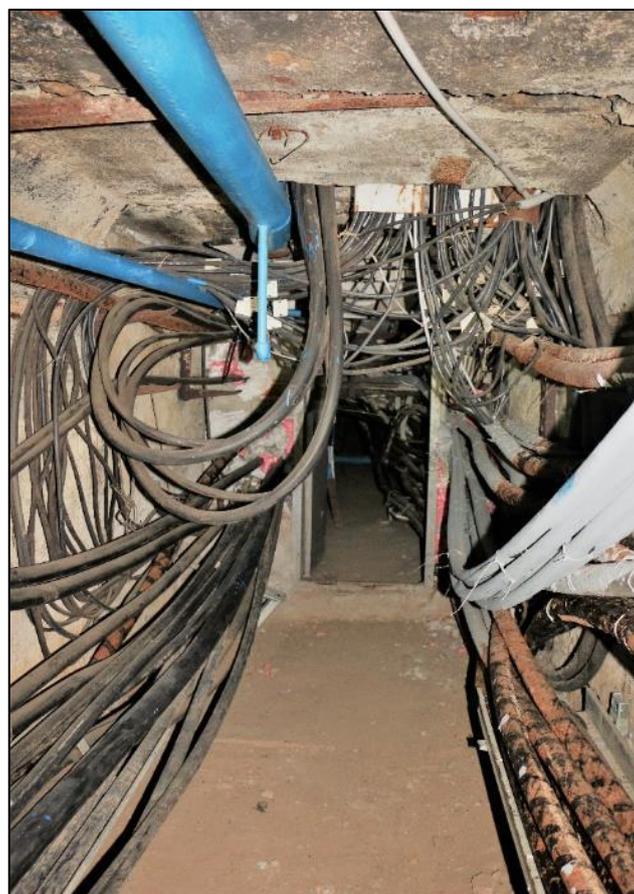
Влажность и температура в кабельном канале не постоянна и меняется в течении года от 30 до 85 %. В связи с этим опорные строительные конструкции, находящиеся в длительной эксплуатации от 30 до 60 лет, испытывают высокие нагрузки. Конструкции не могут быть демонтированы, так как они участвуют в эксплуатации канала. Для подготовки канала к нанесению огнебиозащитного

состава методом пневматического распыления использовано фотооблучение ультрафиолетовой лампой УФ-С с длиной волны 185 – 250 нм. Изоляция кабелей выполнена из пропитанной бумаги с бронированием металлической полосой или ПВХ, и не подвергается отрицательному воздействию и изменению свойств электрической кабельной продукции при воздействии ультрафиолетового света данной интенсивности.

В связи с тем, что указанные сооружения имеют компактные (полупроходные) строительные конструкции, создающие стеснённость для обслуживания и ремонта, предлагается осуществить комплексный подход в формировании огнезащитных покрытий технологических конструкций, представленных различными видами материалов.



а)



б)

Рисунок 5.5 – Фотографии действующего кабельного канала высокого напряжения, а) и б)

Целью данного подраздела диссертационной работы является исследование возможности предварительной модификации деревянных строительных

конструкций перед обработкой огнебиозащитными составами. Огнезащитная обработка усиливает «реакцию на огонь» древесины и материалов на её основе. Снижение воспламеняемости и, как следствие, распространения пламени замедляет развитие пожара и даёт значительно больше времени для эвакуации из здания и для тушения пожара [13].

Для исследования были подготовлены четыре группы образцов из древесины сосны с влажностью 7 % – 12 % путём распиловки и обработки на фуговальном станке в виде прямоугольных брусков с поперечным сечением 30х60 мм и длиной 150 мм с последующей УФ-обработкой с общей дозой облучения 7,4 кДж/м².

В качестве огнезащитных составов использованы:

1. Флаймер КЛ – огнезащитный вспучивающийся состав на водной основе для кабелей с оболочкой из поливинилхлорида, полиэтилена и резины, изготовленный в соответствии с ТУ 20.30.11-007-40693467-2019.
2. Стабитерм-221 – огнезащитный состав, представляющий собой смесь огнезащитных и термостойких компонентов, предназначенный для конструктивной огнезащиты металлических конструкций в промышленном и гражданском строительстве, соответствующий требованиям пожарной безопасности в соответствии с ГОСТ Р 53295-2009.

Часть образцов древесины была обработана вышеуказанными составами в соответствии с инструкцией по нанесению огнезащитного материала при температуре наружного воздуха 20 °С в один слой.

Другая часть образцов обработана повторно с выдержкой для полного высыхания первого слоя.

Таким образом, были сформированы 4 группы древесных образцов: I) образцы, обработанные составом Флаймер КЛ в 1 слой; II) образцы, обработанные составом Флаймер КЛ в 2 слоя; III) образцы, обработанные составом Стабитерм-221 в 1 слой и IV) образцы, обработанные составом Стабитерм-221 в 2 слоя.

Покрытие Флаймер КЛ было нанесено на образцы идентично требуемой огнезащитной эффективности электрических кабелей категории А и Б, а состав Стабитерм-221 соответственно категории металлических конструкции со степенью

огнестойкости категории зданий I (R120).

Далее образцы древесины были испытаны на огнезащитную эффективность нанесённых составов и определён класс их огнестойкости.

Испытания проведены согласно ГОСТ Р 53292-2009 [18]. Методика проведения эксперимента на лабораторной установке представлена в работе [34]. Внешний вид образцов древесины после проведения огневых испытаний представлен на рисунке 5.6.



а)

б)

Рисунок 5.6 – Образцы древесины до и после проведения огневых испытаний

Для оценки группы огнезащитной эффективности покрытий образцы древесины были взвешены до и после нанесения огнезащитного состава, а также после огневого испытания. Полученные результаты представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Оценка огнезащитной эффективности древесных образцов

№ образцов	I	II	III	IV
Огнезащитное средство	Флаймер КЛ		Стабиптерм-221	
Количество слоёв покрытия	1	2	1	2
Вес контрольного образца, г	108	105	109	106
Вес после нанесения покрытия, г	118	124	115	120
Вес после испытаний, г	110	120	106	115
Потеря массы образца, %	7	3	8	4
Группа огнезащитной эффективности	I	I	I	I

В соответствии с нормами пожарной безопасности [19] установлена группа огнезащитной эффективности средств обработки деревянных конструкций.

Как показывает анализ представленных данных, образцы древесины, покрытые составами для кабелей с оболочкой из ПВХ, полиэтилена и резины и для металлических поверхностей, соответствуют первой группе огнезащитной эффективности.

Таким образом огневые испытания показали, что исследуемые составы пригодны и для древесных конструкций в условиях стеснённого обслуживания. Возможно предположить, что при покрытии огнезащитными составами, предназначенными для защиты кабельной продукции или для защиты металлоконструкции, можно применять «сквозное» нанесение защиты также и на деревянные конструкции, несъёмную опалубку (рис.5.7).



Рисунок 5.7 – Фото кабельного канала после нанесения огнезащитного состава

Это позволит существенно упростить процесс обслуживания технологических сооружений, снизить трудозатраты на нанесение различных огнезащитных составов по группам материалов, что, с свою очередь, повысит эффективность огнезащитных мероприятий при обслуживании кабельных каналов, туннелей и технологических проходов на промышленных предприятиях.

5.4 Промышленная реализация результатов исследования древесины, облучённой УФ

В первой главе диссертации были рассмотрены установки для предварительной обработки материалов из древесины. Обзор используемых технологий показал, что наиболее перспективным методом биозащиты древесины является термическая обработка с различными режимными параметрами. По этой причине была предложена интегрированная технология термообработки в среде «уходящих» газов котла-утилизатора с последующей ультрафиолетовой обработкой и нанесением огнезащитного состава.

Во второй и третьих главах было определено изменение свойств древесины под воздействием температуры и ультрафиолетового излучения. В современном строительстве и деревообработке особое значение приобретают методы, повышающие эксплуатационные характеристики материалов. Анализируя результаты экспериментальных исследований можно выявить рациональные параметры предварительной обработки древесины.

Здания и сооружения, в состав которых входят деревянные строительные конструкции, необходимо защищать, покрывая огнезащитными составами. И для их предварительной подготовки предлагается проводить облучение строительных конструкций согласно приведённой ниже технологии.

Оптимизация процесса предварительной обработки деревянных конструкций ультрафиолетовым излучением требует тщательного соблюдения временных параметров. Необходимо подчеркнуть, что именно доза облучения $7,4 \text{ кДж/м}^2$ обеспечивает наилучшие показатели активации поверхности материала.

Электрические источники излучения, спектр которых содержит излучение диапазона длин волн 205 – 315 нм, предназначенные для целей обеззараживания, называют бактерицидными ультрафиолетовыми лампами. Наибольшее распространение благодаря высокоэффективному преобразованию электрической энергии получили разрядные ртутные лампы низкого давления, у которых в процессе электрического разряда в аргонортутной парогазовой смеси более 60 %

переходит в излучение линии 253,7 нм. Ртутные лампы высокого давления не рекомендуются для широкого применения из-за малой экономичности, т.к. у них доля излучения в указанном диапазоне составляет не более 10 %, а срок службы примерно в 10 раз меньше, чем у ртутных ламп низкого давления.

В таблице 5.3 приведены основные параметры современных бактерицидных ламп низкого давления и ПРА.

Таблица 5.3 – Основные технические параметры бактерицидных ртутных ламп

Значение параметров					Габаритные размеры		Материал колбы
тип лампы	мощность Р, Вт	напряжение на лампе, Ул, В	сила тока, Л,А	бактерицидный поток, Фл,бк, Вт	диаметр, мм	длина, мм	
ДБ 15	15	54	0,33	2,5	40	451,1	увиолевое стекло
ДБ 30-1	30	104	0,36	6,0	30	908,8	
ДБ 60	60	100	0,70	8,0	30	908,8	-
ДРБ 8-1	8	55	0,17	1,6	16	302,4	-
ДРБ 8	8	55	0,17	3,0	17	315	кварцевое стекло
ДРБ 40-1	40	70	0,45	10,1	20	540	
ДРБ 60	60	85	0,75	15,8	28	715	-
ДБ 15-3	15	46	0,31	2,5	30	451,1	увиолевое стекло
ДБ 30-3	30	86	0,36	6,0	30	908,8	
ДБ 60-3	60	80	0,7	8,0	30	908,8	-
ДРБ 15	15	60	0,35	4,5	25	542	кварцевое с покрытием
ДРБ 20	20	60	0,37	5,6	25	414	
ДРБ 40	40	80	0,45	9,0	25	634	-
ДРБ 60	60	85	0,75	15,8	28	715	
ДБ 18	18	60	0,38	5	16,5	480	-
ДБ 36-1	36	122	0,35	10,5	16,5	860	-
Светолит	300	150	0,95	100	16	140	-

Для промышленных объектов с большой площадью деревянных чердачных перекрытий, которые подвергаются первичной или периодической огнебиозащите методом воздушного, безвоздушного или комбинированного распыления была взята установка «Светолит-100» с характеристиками мощности 300 Вт, бактерицидным потоком 100 Дж/м² и сроком службы УФ лампы 12000 часов и многоразовый крепёжный потолочный кронштейн (рисунок 5.8).

Для определения количества перестановок ультрафиолетовой лампы необходимо определить площадь и объём призмы чердачного помещения и не

допускать уменьшение дозы облучения 7.4 кДж/м^2 . 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.

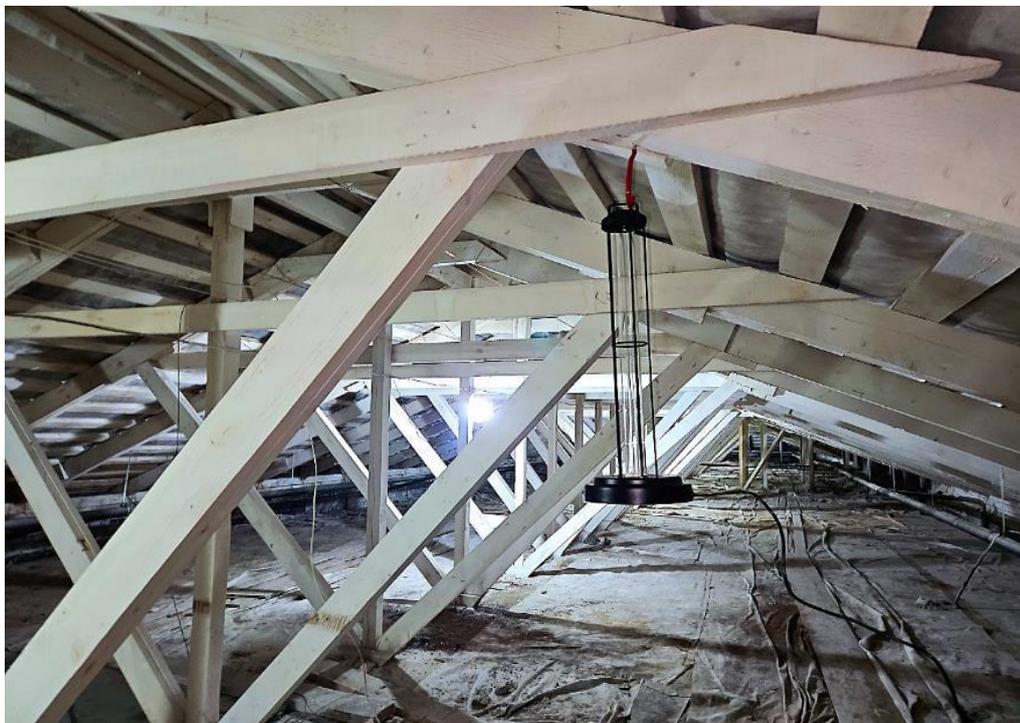


Рисунок 5.8а – Практическое применение ультрафиолетовой лампы для обработки поверхности



Рисунок 5.8б – Практическое применение ультрафиолетовой лампы для обработки поверхности

При использовании ультрафиолетовой лампы необходимо строго соблюдать все меры безопасности. Для работы с ультрафиолетовыми бактерицидными облучателями открытого типа требуется быть совершеннолетним, не иметь медицинских противопоказаний, пройти специальное обучение, ознакомиться с инструкцией по эксплуатации и изучить паспорт устройства.

Предварительно выполняется расчёт площади (в зависимости от конструкции) облучаемой поверхности (рисунок 5.9) и подбор мощности по таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Подбор УФ ламп в зависимости от мощности

Эффективная мощность УФ лампы, Вт	Доза облучения, кДж/м ² (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

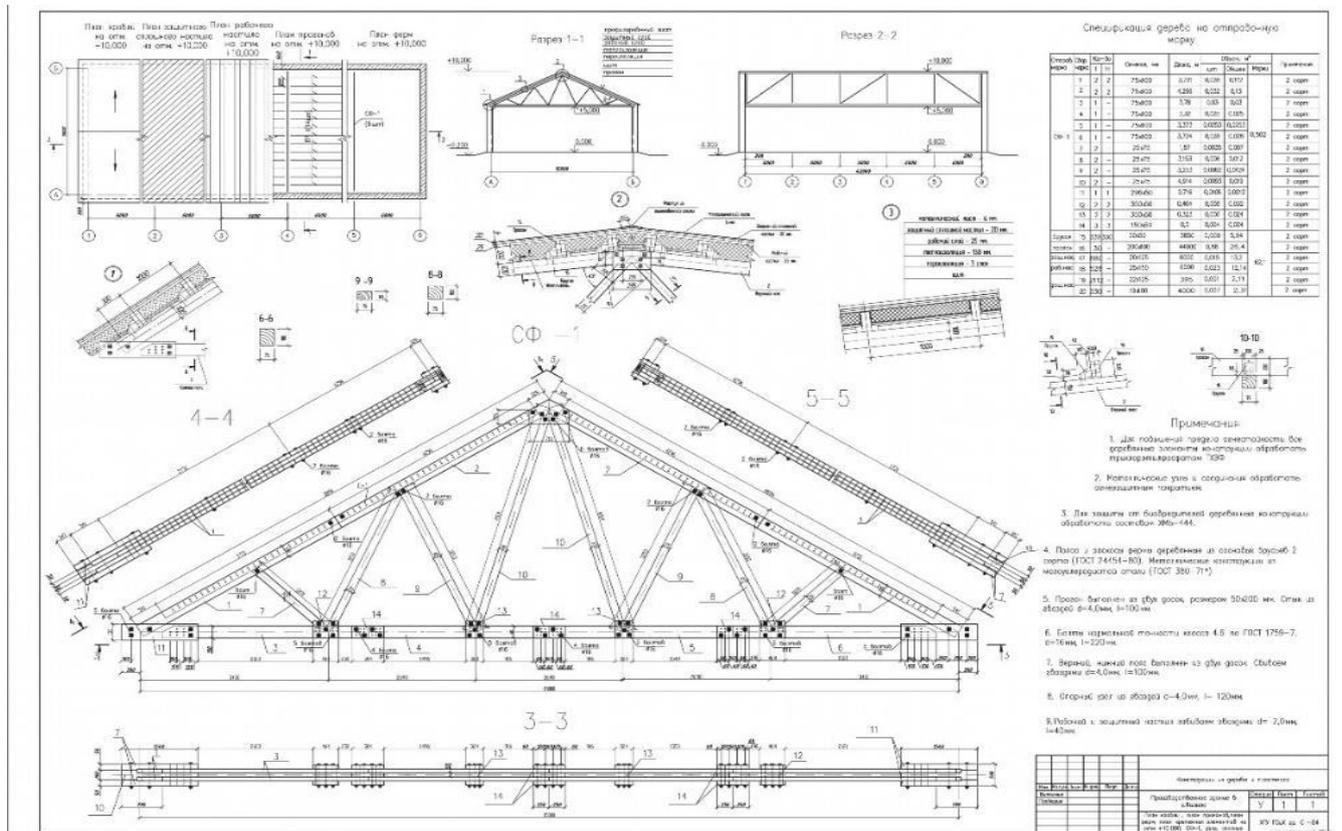


Рисунок 5.9 – Выполнение расчётов площади облучаемой поверхности

Далее необходимо проводить испытания на огнестойкость, с целью определения состояния древесины и качества нанесённого огнезащитного состава.

Исследование эффективности огнезащиты проводилось в соответствии с действующими нормативно-техническими документами [25]. Для экспериментальных исследований были подготовлены 3 группы образцов из древесины сосны строительной конструкции чердачного помещения действующего административного здания. Контрольные образцы древесины были подготовлены в виде прямоугольных брусков размером 30×60×7 мм. В каждой группе исследовалось по 10 образцов, выпиленных с противоположных концов деревянных конструкций – объектов огнезащиты.

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 брусьев, перекрытий, лаг. Методы нанесения состава: валиком, краскопультом, кистью.

Каждая группа образцов включала такие характеристики, как расстояние от ультрафиолетовой лампы до объекта обработки:

1-ая группа: древесина, находящаяся в эксплуатации; расстояние до источника УФ обработки 6 метров;

2-ая группа: древесина, находящаяся в эксплуатации; расстояние до источника УФ обработки 3 метра;

3-я группа: древесина, находящаяся в эксплуатации; расстояние до источника УФ обработки 1 метр.

В свою очередь каждая группа образцов подразделялась на подгруппы, соответствующие образцам, взятым из стропил производственного здания (подгруппа 1) и из обрешётки (подгруппа 2) крыши, качество фотодегradации и обработки которых вызывали сомнения.

Огнезащитная эффективность составов для обработки деревянных конструкций характеризуется потерей массы обработанного составом образца

древесины при огневом испытании. Для исследования огнестойкости объектов защиты разработана экспериментальная установка, принципиальная схема и внешний вид которой представлены на рисунке 5.10.

Установка состоит из полированной трубы (1) высотой 350 мм с опорной конструкцией (2), внутри которой расположено крепление (3) для образцов (4), источника тепла (5) – газовой горелки с баллоном сжиженного газа, двух преобразователей термоэлектрических НСХ (6) с пределом измерения от 0 °С до 400 °С и прибора для фиксации температур ТМ5104 (7).

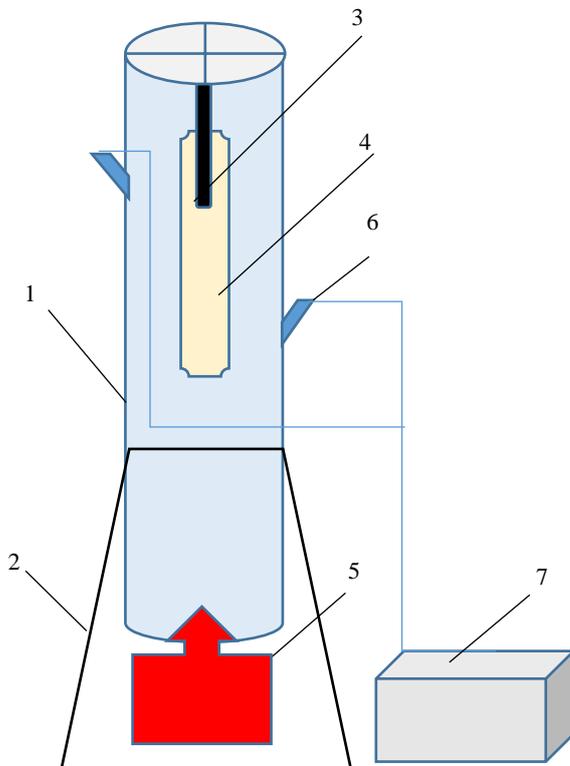


Рисунок 5.10 – Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования эффективности огнезащиты древесины

Методика проведения эксперимента заключалась в следующем. Контрольные образцы древесины, предварительно взвешенные, закрепляют и помещают в предварительно разогретую до 200 °С трубу. Температура внутри трубы стабилизируется при помощи подачи газа и контролируется при помощи двух термопар. Образец выдерживают в пламени в течение двух минут при стабильном расходе газа. Далее подача газа в горелку прекращается, образец древесины остывает в трубе. После извлечения из установки образец повторно взвешивается.

Процедура тестирования включала тщательный отбор образцов, который осуществлялся с различных участков обработанных поверхностей. Стоит отметить, что точки забора материала были идентичны использованному ранее при работе с основной экспериментальной установкой.

Испытательный процесс проводился по чётко структурированному алгоритму с соблюдением всех технологических этапов. Полученные результаты позволяют не только оценить текущее состояние огнезащиты, но и прогнозировать её долговечность в реальных условиях эксплуатации объекта.

Перед началом испытаний на огнестойкость была произведена тщательная калибровка испытательного оборудования для обеспечения достоверности получаемых результатов. Подготовленный для исследования образец с нанесённым антипиреном помещался в специальное зажимное устройство испытательной установки.

Ориентация образца в устройстве имеет принципиальное значение: сторона, предварительно обработанная огнезащитным составом, располагается непосредственно напротив источника открытого пламени – газовой горелки, как показано на рисунке 5.10. Такое расположение обеспечивает прямой контакт защищённой поверхности с пламенем.

После надёжной фиксации образца в испытательном положении производилась активация системы подачи газа, и горелка зажигалась согласно стандартному протоколу испытаний. Образец подвергался непрерывному воздействию пламени в течение строго регламентированного периода в 40 секунд, что позволяло оценить эффективность применённой огнезащитной обработки.

По истечении установленного времени подача газа прекращалась, горелка отключалась, но образцы не извлекались из установки немедленно. Для корректной оценки последствий теплового воздействия и исключения влияния резкого изменения температуры, испытываемые материалы оставались в приборе до полного остывания всей системы до температуры окружающей среды. Это позволяло также зафиксировать любые постпламенные процессы, важные для комплексной оценки огнестойкости материала. Результаты огневых испытаний образцов древесины,

представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Результаты испытаний огнестойкости объектов защиты

Показатели	Образцы древесины					
	Группа 1 L=6m		Группа 2 L=3m		Группа 3 L=1m	
	подгруппы					
	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 огнезащитной эффективности	II	II	I	I	I	I

Примечание: в таблице L – расстояние от ультрафиолетовой лампы до объекта (м).

В соответствие с нормами пожарной безопасности [19] устанавливаются следующие группы огнезащитной эффективности средств обработки деревянных конструкций:

I группа – состав обеспечивает трудно сгораемость древесины (потеря массы образца при огневом испытании составляет не более 9 %); предел огнестойкости – 150 минут. Такая огнезащита используется в многолюдных местах и на ответственных объектах.

II группа – состав обеспечивает получение трудно воспламеняемой древесины (потеря массы опытного образца при огневом испытании может быть более 9 %, но менее 25 %), предел огнестойкости 90 минут.

Для визуализации полученных данных представлена диаграмма потери массы исследуемых образцов (рис.5.11), на которой красными линиями отмечены границы соответствующих групп огнезащитной эффективности составов.

Анализ результатов, представленных в таблице 5.5 и на рисунке 5.11 показал, что образцы древесины 1.1 и 1.2, имеют II группу огнезащитной эффективности и представляют собой трудно воспламеняемую древесину с пределом огнестойкости до 90 минут, поскольку изменение массы после огневого испытания составило в

среднем 22 %. Это обусловлено тем, что расстояния от УФ-лампы до деревянных конструкций 6 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 огнезащитной эффективности с пределом огнестойкости до 150 минут, являются трудногоряемой древесиной и могут эксплуатироваться в производственных зданиях.

Согласно требованиям пожарной безопасности все деревянные конструкции промышленного назначения должны иметь огневую защиту посредством обработки огнезащитными составами только I и II групп огнезащитной эффективности [19].



Рисунок 5.11 – Диаграмма изменения массы объектов огнезащиты

Поверхностная огнезащитная обработка считается качественной при условии получения положительных результатов испытаний на всех отобранных образцах.

Оценка образцов осуществлялась на основе визуального наблюдения во время испытания и их осмотра после извлечения из прибора.

Ниже представлены результаты экспресс-оценки эффективности

огнезащитных составов и проверки адекватности полученных результатов испытаний (рис. 5.12).

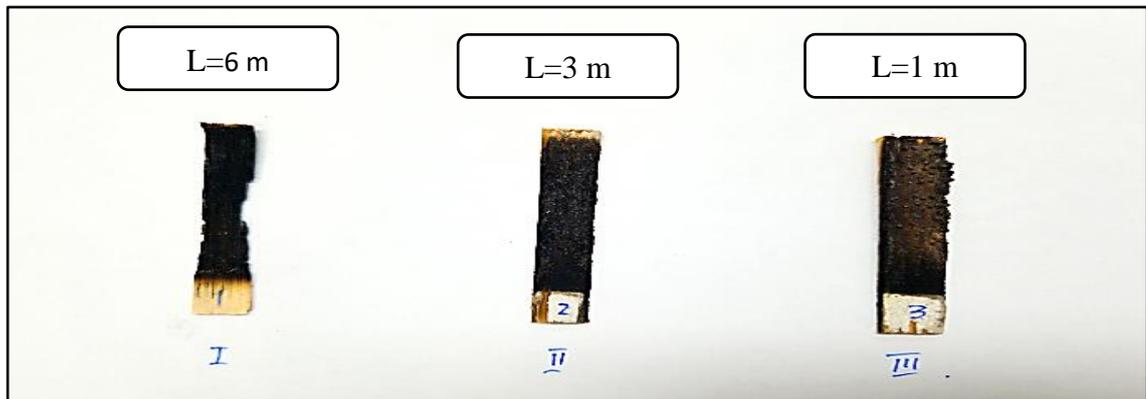


Рисунок 5.12 – Внешний вид древесных образцов после испытаний на установке ПМП-1

По результатам проведённых испытаний согласно рисунку 5.12 можно сделать следующие выводы:

1. Образец №1: произошло изменение цвета образца, вспучивание защитного состава и незначительное коробление. Самостоятельное горение образца после отключения источника горения отсутствовало и прогорание образца не установлено, образец испытания выдержал.

2. Образцы №2 и №3: произошло изменение цвета, вспучивание огнезащитного состава. Самостоятельное горение образца после отключения источника горения и прогорание образца не установлено, огнестойкость объекта защиты высокая.

Способность деревянной строительной конструкции сохранять несущие или ограждающие функции в условиях пожара во многом зависит от эффективности применяемых средств огневой защиты. Материалы, входящие в защитный состав, предотвращают критический нагрев защищаемой конструкции и обеспечивают её сохранность во время пожара за заданное время. Требования по обеспечению огнестойкости деревянных конструкций предусматривают своевременный контроль за состоянием покрытий, технологией нанесения защитных средств и качеством огнезащиты.

Разработанная установка адекватно отражает результаты испытания на

эффективность огнезащитного покрытия для древесины деревянных конструкций, находящихся в эксплуатации различное время. Проведённая экспресс-оценка эффективности огневой стойкости объекта на приборе, рекомендованном ГОСТ 53292-2009, подтвердила полученные результаты.

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 может выполнять функции перекрытий и несущей конструкции промышленного здания. При этом требуется проведение работ по скорейшему обновлению огнезащитных покрытий.

Своевременное проведение обработки деревянных конструкций соответствующими средствами, как показали эксперименты, обеспечивает высокую эффективность огнезащитных составов и высокую степень огнестойкости объектов.

Данная работа прошла апробацию на ООО «Инженерно-техническая фирма «АММ» (г. Казань), принята к внедрению технология глубокой пропитки деревянных конструкций, находящихся в эксплуатации. Применяется предварительная подготовка поверхности с использованием ламп ультрафиолетового излучения, что повышает качество огнебиозащитной обработки деревянных конструкций (мауэрлатов, стропил, брусьев, прогонов и т.п.) вследствие увеличения глубины пропитки и введённого объёма пропитывающих составов путём повышения смачиваемости поверхности древесины (Приложение Д). 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении литературного анализа технологий в области модификации древесного материала было установлено, что в последние годы распространение получили процессы термомодифицирования древесины, поскольку они позволяют значительно повысить биостойкость материала без использования химических средств защиты. Одна из наиболее эффективных технологий реализуется с использованием топочных газов, полученных от сгорания древесины. Однако информации о результатах использования «уходящих» газов от котлов - утилизаторов на ТЭС и последующей подготовке термодревесины перед пропиткой огнебиозащитными составами найдено не было. В связи с этим в работе были проведены исследования, результаты которых заключаются в следующем:

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 значительно 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 течение 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, срок окупаемости проекта составляет 11 месяцев. Предложена технология предварительной УФ-обработки деревянных конструкций, находящихся в эксплуатации, перед процессами пропитки огнезащитными составами. Определены допустимые расстояния от источника излучения ультрафиолета до обрабатываемых строительных конструкций промышленных зданий и сооружений. 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

f – частота переменного тока, Гц;

G – расход газа, м³/с;

$I_{л}$ – ток лампы, А;

m – масса, кг;

S – толщина, мм;

UVC – ультрафиолетовое излучение тип C;

$U_{л}$ – напряжение на лампе, В;

$U_{с}$ – номинальное напряжение сети, В;

V – объём, м³;

W – рабочая влажность, кг/кг;

$W_{отн}$ – влажность относительная, %;

ρ – плотность, кг/м³;

τ – время, сек;

$\Gamma_{кал}$ – тепловая мощность;

$E_{бк}$ – бактерицидный поток;

ПГУ – парогазовая установка;

ПРА – пускорегулирующая аппаратура;

M – модификация;

$R_{л}$ – мощность лампы, Вт;

T – температура, °С;

ТЭС – тепловая электрическая станция;

ТМД – термомодифицированные древесные материалы;

УФ (UF) – ультрафиолетовое облучение.

ИДЕНТИФИКАТОРЫ

max – максимальный;

min – минимальный;

воз – воздух;

Г – газ;

гр. – группа;

дин – динамичный;

к.у. – котёл-утилизатор;

мат – материал;

отн.– относительно;

пов – поверхность;

ср – среда;

Ст. – сталь;

цел – целлюлоза;

эксп.– эксплуатационный.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 11022-95 (ИСО 1171-97). Топливо твёрдое минеральное. Методы определения зольности. – М.: Стандартиформ, 2006. – 6 с.
2. ГОСТ 16363-98. Средства огнезащитные для древесины. Методы определения огнезащитных свойств. - М.: Изд-во стандартов, 1998. – 10 с.
3. ГОСТ 16483.0-89. Древесина. Общие требования к физико-механическим испытаниям. – М.: Издательство стандартов, 1999. – 8 с.
4. ГОСТ 16483.14-72. Древесина. Методы определения на разбухание. - М.: Изд-во стандартов, 1985. – 7 с.
5. ГОСТ 16483.15-72. Древесина. Методы определения водопроницаемости. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 4с.
6. ГОСТ 16483.19-72. Древесина. Метод определения влагопоглощения. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 11 с.
7. ГОСТ 16483.7-71. Древесина. Методы определения влажности. – М.: Издательство стандартов, 2001. – 6 с.
8. ГОСТ 17177.4-81. Материалы строительные теплоизоляционные. Метод определения влажности. М.: Изд-во стандартов, 1981. – 20 с.
9. ГОСТ 23790-79. Покрытие по древесине фосфатное огнезащитное. Технические требования. М.: Изд-во стандартов, 1985. – 9 с.
10. ГОСТ 24617-81. Средства защитные для древесины. Метод испытания огнезащитных свойств на моделях. М.: Изд-во стандартов, 1981. –9 с.
11. ГОСТ 25130-82. Покрытие по древесине вспучивающееся огнезащитное ВПД. Технические требования. М.:Изд-во стандартов, 1987. –10 с.
12. ГОСТ 27014-2021. Межгосударственный стандарт. Средства защитные для древесины. Метод определения проникающей способности в древесину: утверждён и введён в действие Приказом Росстандарта от 19.05.2021 N399-ст. М: Стандартиформ. – 8 с.
13. ГОСТ 30028.3-93. Средства защитные для древесины. Экспресс-метод испытания огнезащищающей способности. М.: Издательство стандартов,

1993.1. – 10 с.

14. ГОСТ 30244-94. Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть. М.: Изд-во стандартов, 1994. – 25 с.

15. ГОСТ 33120-2014 Конструкции деревянные клеёные. Методы определения прочности клеевых соединений – М.: Издательство стандартов, 2015. – 20 с.

16. ГОСТ 53292-2009 «Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на её основе». Общие требования. Методы испытания.

17. ГОСТ 9620-94 «Древесина. Метод определения плотности» – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 7с.

18. ГОСТ Р 53292-2009. Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на её основе. Общие требования. Методы испытания. М: Стандартинформ, 2009. – 17с.

19. НПБ 251-98. Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на её основе. Общие требования. Методы испытаний. М: ВНИИПО МВД России. 1998. – 18 с.

20. Свод правил 3.13130.2009. «Системы противопожарной защиты. Система оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре. Требования пожарной безопасности».

21. Свод правил 5.13130.2009. «Системы противопожарной защиты. Установки пожарной сигнализации и пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования».

22. Свод правил 6.13130.2009. «Системы противопожарной защиты. Электрооборудование. Требования пожарной безопасности».

23. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – Москва: Наука, 1976. – С. 138.

24. Ахметова Д.А. Термомодификация древесины при кондуктивном подводе тепла в герметичных условиях / Д.А. Ахметова, Н.Ф. Тимербаев, Д.Ф.Зиатдинова // Известия ВУЗов сер. «Химия и химическая технология». – 2008. – Т. 51. – Вып. 7. – С. 76-78.

25. Балакин, В.М. Огнезащитные составы и покрытия на основе аминокальдегидных олигомеров / В. М. Балакин, Е. Ю. Полищук, А. В. Рукавишников // Пожаровзрывобезопасность. 2010. – Т. 19, № 4. С. 22-27.
26. Биологическая и термохимическая переработка органосодержащих материалов: учебное пособие / А.Ф. Куфтов, А.В. Лихачева. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 65 с.
27. Боголицын К.Г., Лунин В.В. Физическая химия лигнина. М.: Академкнига, 2010. – 492 с.
28. Вознесенский В.А. Численные методы решения строительнотехнологических задач на ЭВМ. – Киев: Высш. школа, 1989. – 324 с.
29. Войтович В.А., Спирин Г.В. Биоциды и биоцидные материалы для защиты изделий из древесины // Строительные материалы. 2006. – № 12. – С. 35 -38.
30. Галяветдинов Н.Р., Разумов Е.Ю., Сафин Р.Р. Осциллирующая сушка-пропитка крупномерной древесины в жидкостях Монография. Казань. 2011. 110 с.
31. Гелетуха Г.Г. Обзор технологий газификации биомассы / Г. Гелетуха, Т.А. Железная // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1998. – № 2. – С. 21-29.
32. 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" АО "КНИАТ", 2022. – С.168-170.
33. Гирфанов А.А., Кайнов Пётр А. Предварительная обработка древесины ультрафиолетом для интенсификации пропитки. // Актуальные проблемы лесного комплекса БГИТУ– 66/2024. – С.298-308.
34. Гирфанов А.А., Сафин Р.Р. Требования к огнезащите строительных деревянных конструкций Актуальные проблемы лесного комплекса. Выпуск 62 БГИТУ, 2022. С. – 284-287.
35. Гирфанов А.А., Сафин Р.Р., Саерова К.В., Сафина А.В. Влияние

методов предварительной обработки поверхности древесины на проникающую способность огнезащитного средства, *Деревообрабатывающая промышленность* №4. – 2023г. – С. 11-16.

36. Гирфанов А.А., Сафин Р.Р., Сафина А.В. Интенсификация процессов пропитки термомодифицированной древесины посредством предварительной ультрафиолетовой обработки. Современные энергосберегающие тепловые и массообменные технологии (сушка, тепловые и массообменные процессы): сборник научных трудов Восьмой Международной научно-практической конференции (17–19 октября 2023 года). – М.: ООО «Мегаполис», 2023. – 340 с.

37. Головков, С.И. Энергетическое использование древесных отходов / С.И. Головков, И.Ф. Коперин, В.И. Найденов. – М.: Лесная промышленность, 1987. – 224 с.

38. Горовых О.Г. Механизмы процессов, реализующихся при защите древесины огнезащитными составами // *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*. – 2017. № 1 (41). – С. 47-57.

39. Ерин А.А., Арушонок Ю.Ю. Способы защиты древесины от горения и гниения /в сборнике: Потенциал интеллектуально одарённой молодёжи - развитию науки и образования. Материалы VI Международного научного форума молодых учёных, студентов и школьников. Под общей редакцией Д. П. Ануфриева. – 2017. С. 505-508.

40. Зиатдинов, Р.Р. Эффект воздействия ультрафиолетового излучения на смачивающие свойства древесины / Р.Р. Зиатдинов, В.Е. Пузаков, А.Ф. Гараева // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2017. – №. 1. – С. 23-30.

41. Илесхаджиев Р.И., Панёв Н.М., Никифоров А.Л., Циркина О.Г. Применение метода оценки наличия огнезащитной обработки древесины на действующих объектах защиты // *Молодые учёные – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК)*. – 2018. – № 1. – С. 49-51.

42. Кайнов Пётр А. Энергосберегающая технология термического модифицирования древесины в среде топочных газов: дисс. канд. техн. наук /

П.А. Кайнов. – Казань, КНИТУ, 2012. – 171 с.

43. Комаров А.В., Царёв Г.И. Термохимическая защита древесины // Химия растительного сырья. – 2013. – № 1. – С. 73-76.

44. Котлярова И.А. ИК-спектроскопия древесины сосны, берёзы и дуба модифицированной моноэтаноламин(п→b)тригидроксидборатом. Химия растительного сырья. – 2019.– №2. – С.43-49.

45. Ломакин А.Д. Глубокая пропитка древесины средствами защиты от биоразрушения и возгорания // Строит. материалы. – 2012. – № 6. – С. 72-74.

46. Макишев Ж.К., Сивенков А.Б. Огнестойкость деревянных конструкций с длительным сроком эксплуатации// Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, №3. – С. 34-44.

47. Меркушев, И.М. Технология деревообработки / И.М. Меркушев. – М.: МГУЛ, 2004. – 535 с.

48. Нигматуллина Д.М., Полищук Е.Ю., Сивенков А.Б., Стенина Е.И. Повышение пожарной безопасности деревянных конструкций методом глубокой пропитки огнезащитными составами /в сборнике: Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики. Материалы XI Международной научно-технической конференции. – 2017. – С. 132-133.

49. Нигматуллина Д.М., Стенина Е.И., Полищук Е.Ю., Сивенков А.Б. Антипирирование деревянных конструкций способом глубокой пропитки // Технологии техносферной безопасности. – 2016. – № 5 (69). – С. 56-61.

50. Нуштаева А.В. Химия древесины: учеб. пособие / А.В. Нуштаева. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 100 с.

51. Петрова, Е. А. Снижение горючести строительных материалов на основе древесины: дис.канд. техн. наук: 05.26.03 / Петрова Елена Александровна. – М., 2003. – 158 с.

52. Пижурин А.А., Пижурин А.А. Основы научных исследований в деревообработке. М. Издательство Московского государственного университета леса. – 2005г. – С.304.

53. Пожидаев В.М., Ретивов В.М., Панарина Е.И., Сергеева Я.Э., Жданович О.А., Яцишина Е.Б. Разработка метода идентификации породы древесины в археологических материалах методом ИК-спектроскопии. / Журнал аналитической химии. – 2019. Том 74, №12. – С.911-921.

54. Полищук, Е. Ю., Сивенков А. Б., Бирюков Е. П. Нормативные требования к огнезащите древесины и экспертная оценка её качества // Пожары и ЧС: предотвращение, ликвидация. – 2016. – № 2. С. 77-80.

55. Просвирников Д.Б., Сафин Р.Р., Козлов Р.Р. Математическое моделирование процесса непрерывной паровзрывной обработки древесины с предварительной пропиткой в присутствии катализатора // Деревообрабатывающая промышленность. – 2020. – № 2. – С. 70-86.

56. Пустынная М.А., Гусакова М.А., Боголицын К.Г. Региональные и возрастные изменения химического состава лигноуглеводной матрицы лиственной древесины (на примере осины *Populus Tremula*) // Лесной журнал. – 2015. – № 1. – С. 133–143.

57. Разумов Е.Ю., Белякова Е.А., Сафин Р.Р. Математическая модель процесса термомодифицирования древесины труднопропитываемых пород в жидкости // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 16.– С. 233-239.

58. Разумов, Е.Ю. Разработка технологий и оборудования термического модифицирования пиломатериалов: дисс. докт. техн. наук / Е.Ю. Разумов. – Казань, КНИТУ, 2013. – 426 с.

59. Романков П.Г., Фролов В.Ф. Теплообменные процессы химической технологии. – Л.: Химия, 1982. – 288 с.

60. Сафин Р.Г., Ахметова Д.А., Сафина А.В., Степанова Т.О. Термомодификация древесных материалов // Вестник технологического университета. – 2015. – Т18. №22. – С. 112-118.

61. Сафин Р.Р., Белякова Е.А. Экспериментальные исследования термомодифицирования древесины в гидрофобных жидкостях / Р.Р. Сафин, Е.А. Белякова // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – Выпуск 12. – С.241-245.

62. Сафин Р.Р., Разумов Е.Ю. Исследование термомодифицирования древесины в среде топочных газов / Р.Р. Сафин, Е.Ю. Разумов // Деревообрабатывающая промышленность. – 2012. – №3. – С.15-18.

63. Сафин Р.Р., Сафин Р.Г., Галяветдинов Н.Р., Иманаев Р.М. Исследование совмещённой сушки-пропитки массивных капиллярно-пористых коллоидных материалов // Вестник Казанского технологического университета. – 2006. – № 6. – С. 73-78.

64. Сафин Р.Р., Хасаншина Р.Т., Сабирова Г.А., Илалова А.Ф. Исследование изменения свойств поверхности древесины после ультрафиолетовой обработки // Деревообрабатывающая промышленность. – 2019. – № 3. – С. 47-53.

65. Сафин, Р.Р. Исследование физических и энергетических свойств топливных гранул на основе термомодифицированного древесного сырья / Р.Р. Сафин, А.Л. Тимербаева, Р.Р. Хасаншин, А.В. Сафина // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 18. №. 4. – С. 925-928.

66. Сафин Р.Р., Саерова К.В., Тимошина Ю.А. Влияние высокочастотный низкотемпературной плазменной обработки на химический состав термически модифицированной древесного наполнителя. / Системы. Методы. Технологии. – 2024. – 3(63). – С.173-179.

67. Севастьянов, К.Ф. Интенсификация процесса склеивания древесины/ Севастьянов. К.Ф. – М.: Лесная промышленность, 1976. – 144 с.

68. Смирнов Г.Б., Томашевич В.Г. Решение задач оптимизации в технологических системах методом планирования эксперимента. Уральский Федеральный университет методическое пособие, 1998. – С.92

69. Терентьева Э.П., Удовенко Н.К., Павлова Е.А. Химия древесины, целлюлозы и синтетических полимеров: учебное пособие. Ч. 2. СПб: СПбГТУРП, 2015. – 83 с.

70. Хабаров Ю.Г., Песьякова Л.А. Аналитическая химия лигнина. Архангельск: АГТУ, 2008.– 172 с.

71. Хасаншин Р.Р. Математическое описание процесса

термомодифицирования шпона / Р.Р. Хасаншин, Р.Р. Сафин, Д.Р. Хазиева // Вестник Казанского технологического университета. – № 23. – 2013. – С. 79-82.

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

73. Хвиюзов С.С., Боголицын К.Г., Гусакова М.А., Зубов И.Н. Оценка содержания лигнина в древесине методом ИК-Фурье спектроскопии // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 9. – С. 87-90.

74. Шум Н.М. Оценка экономического развития лесного комплекса// *России Вектор экономики*. – 2020. – № 12 (54). – С. 112.

75. Яковлева Р.А., Попов Ю.В., Саенко Н.В., Шевцова Е.Ю. Огнебиостойкие эпоксидные композиции для защиты древесины// *Успехи в химии и химической технологии*. – 2007. – Т. 21, № 6 (74). – С. 23-28.

76. Abe, Z. (1994). The color change of sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) heartwood from reddish brown to black. I. The color changes and its causes. *Mokuzai Gakkaishi* 40: 1119-1125.

77. Östman B. A-L. Fire performance of wood products and timber structures, *International Wood Products Journal*. 2017. 8:2, 74-79, DOI: 10.1080/20426445.2017.1320851

78. Baishya P, Maji TK. Functionalization of MWCNT and their application in properties development of green wood nanocomposite. *Carbohydr Polym*. 2016;149:332–9.

79. Banks W.B., Owen N.L. FTIR studies of hydrophobic layers on wood // *Spectrochim. Acta A*. 1987. V. 43. №12. P. 1527.

80. Barta, E., Papp, G., Preklet, E., Tolvaj, L., Berkesi, O., Nagy, T., and Szatmari, S. “Changes of absorption in infrared spectra of softwood materials irradiated by UV-laser as a function of energy,” *Acta Silv. Lign. Hungarica* 1 (1), 2005. P.83-91.

81. Barta, E., Tolvaj, L., Papp, G., Nagy, T., Szatmari, S., and Berkesi, O.

“Wood degradation caused by UV-laser of 248 nm wavelength, “Holz Roh Werkst. 56, 1998. P.318.

82. BEH G.,BOLLMUS S.,GELLERICH A.,MILITZ H. 2018. Improvement of mechanical properties of thermally modified hardwood through melamine treatment. In Wood Material Science and Engineering, 2018, Vol. 13. Issue 5.

83. Bekhta P., Niemz P. Effect of high temperature on the change in color, dimensional stability and mechanical properties of spruce wood. *Holzforschung*, 57(5), 2003. P.539-546.

84. Biao Zhou, Kai Wang, Yanyi Liuchen, Yuhang Li, Xukun Sun, Feng Zhu, Wei Ke, Xuan Wang, Bo Qiu, Yajun Han. (2022) Experimental Study of Upward Flame Spread over Discrete Weathered Wood Chips. *International Journal of Architectural Heritage*16:12, pp. 1797-1808.

85. Birgit Östman. 2020. Weathering Effects on Fire Retardant Wood Treatments. *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*, pp. 1055-1062.

86. Blanchard V. and Blanchet P. (2011). Color stability of wood products in the process of use: the influence of inorganic nanoparticles,”*Bioresources* 6 (2), pp.1219-1229.

87. Bond, B.H.; Espinoza, O. A Decade of Improved Lumber Drying Technology. *Curr. For. Rep.* 2016, 2, pp.106-118.

88. Bueno ABF, Bañón MVN, De Morentín LM, García JM. Treatment of natural wood veneers with nano-oxides to improve their fire behavior. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 2014.

89. Callum Hill, Maija Kymäläinen, Lauri Rautkari. (2022) Review of the use of solid wood as an external cladding material in the built environment. *Journal of Materials Science*57:20, pp. 9031-9076.

90. Charmaine Mullins-Jaime, Todd D. Smith. (2022) Nanotechnology in Residential Building Materials for Better Fire Protection and Life Safety Outcomes.*Fire*5:6, pages 174.

91. Chen H., Ferrari C., Angiuli M., Yao J., Raspi C., Bramanti E. Qualitative and quantitative analysis of wood samples by Fourier transform infrared spectroscopy and multivariate analysis // *Carbohydr. Polym.* 2010.V. 82. № 3. P. 772.
92. Clausen, C.; Glass, S.V. *Build Green. Your Wood Can Last for Centuries*; General Technical Report FPL-GTR-215; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA, 2012.
93. Cristiana Radulescu, Radu Lucian Olteanu, Claudia Stihl, Monica Florescu, Dumitru Lazurca, Ioana Daniela Dulama, Raluca Maria Stirbescu & Sofia Teodorescu (2019) Chemometric Assessment of Spectroscopic Techniques and Antioxidant Activity for *Hippophae rhamnoides* L. Extracts Obtained by Different Isolation Methods, *Analytical Letters*, 52:15, 2393-2415.
94. Davidson, R.S. (1996). The photodegradation of some naturally occurring polymers. *J. Photochem. Photobiol. B Biol.* 33: pp.3-25,
95. Deka M., Petrič M. Photo-Degradation of Water Borne Acrylic Coated Modified and Non-Modified Wood during Artificial Light Exposure. *BioResources*. 2008;3 pp.346-362.
96. Desch HE, Dinwoodie JM. *Timber structure, properties, conversion and use*. London: Macmillan Education; 1996.
97. Dietenberger M. Update for combustion properties of wood components. *Fire Mater.* 2002. 26(6) pp.255–67.
98. Doroudiani S, Doroudiani B, Doroudiani Z. Materials that release toxic fumes during fire. In: *Toxicity of Building Materials*, Elsevier; 2012, pp.241-282.
99. Eli Kerzic, Miha Human. Studies on the material resistance and moisture dynamics of wood after artificial and natural weathering. *Wood material science&engineering*, Vol. 17, №6, 2022. Pp.551-557.
100. Esteves B., Marques A.V., Domingos I., Pereira H. Chemical changes of heat treated pine and eucalypt wood monitored by FTIR // *Maderas. Cienc. Tecnol.* 2013. V. 15. № 2. P. 245.
101. Evans P., Haase J., Seman A., Kiguchi M. The Search for Durable Exterior Clear Coatings for Wood. *Coatings*. 2015;5:830–864. doi: 10.3390/coatings5040830.

102. Evans P.D., Michell A.J., Schmalzl K.J. Studies of the Degradation and Protection of Wood Surfaces. *Wood Sci. Technol.* 1992;26 doi: 10.1007/BF00194471.
103. Evans Philip D. Review of the weathering and photostability of modified wood. *Wood Material Science & Engineering*. Volume 4, 2009, pp.2-13.
104. Feist W.C. Protection of Wood Surfaces with Chromium Trioxide. Forest Products Laboratory; Madison, WI, USA: 1979.
105. Fu F, Lin L, Xu E, Functional pretreatments of natural raw materials. In: *Advanced High Strength Natural Fibre Composites in Construction*, Elsevier; 2017, pp.87–114.
106. Gujar J.G., Wagh S.J., Gaikar V.G. Experimental and modeling studies on microwave-assisted extraction of thymol from seeds of *Trachyspermum ammi* (TA). *Sep. Purif. Technol.* – 2010. – No. 70 (3). – pp. 257-264.
107. Hon, D.N.S., and Shiraishi, N. *Wood and cellulosic chemistry*. CRC Press, New York, USA. Vol. 113, №4, 2000, pp.754-757.
108. Imken, A.A.P.; Brischke, C.; Kögel, S.; Krause, K.C.; Mai, C. Resistance of different wood-based materials against mould fungi: A comparison of methods. *Eur. J. Wood Prod.* 2020, 78, pp. 661-671.
109. Jiang J., Lu J., Huang R., Li X. Effects of time and temperature on the viscoelastic properties of Chinese fir wood. *Drying Technology*, 27 (11), 2009, pp.1229–1234.
110. Kalnins M.A., Steelink C., Tarkow H. *Light-Induced Free Radicals in Wood*. Forest Products Laboratory; Madison, WI, USA: 1966, 12, pp. 132-143.
111. Khasanshin R, Safin R, Kainov P, Safina A, Valeev I 2019 Effect of process pressure on the yield of products and the duration of the process of thermochemical processing of wood waste *Int. Multidisciplinary Sci. GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM 19 th)*, pp. 145-153.
112. Khasanshin, Ruslan & Safin, Ruslan & Mukhametzyanov, Shamil. (2021). Studying the Performance of Composites Based on Thermally Modified and UV-Treated Wood. *Solid State Phenomena*. 316, pp. 121-126. 10.4028 / www.scientific.net/SSP.316.121.

113. Krivorotova, A & Orlov, A & Korchuk, Yu & Popov, A. (2021). Research of physical and mechanical properties of plywood based on thermally modified veneer. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 1181. 012005. 10.1088/1757-899X/1181/1/012005.
114. Kutz, M. (2018). Handbook of environmental degradation of materials. William Andrew, Norwich, New York, USA, pp. 343-367.
115. Law Angus, Kotsovinos Panagiotis and Butterworth Neal. Structural fire resilience for tall or unusual structures. Proceedings of the Second International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering (PLSE 2015). 2015. <https://doi.org/10.14264/uql.2016.420>.
116. Mihulja G., Bogner A. Strength and Durability of Glued Wood Part One: Factors of Glued Joint Strength. *Drv. Ind.* 2005, 56, pp.69-78.
117. Miklečić J. Ph.D. Thesis. Faculty of Forestry, University of Zagreb; Durability of Polyacrylate Nanocoatings on Thermally Modified Wood Zagreb, Croatia: 2013, pp.43-52.
118. Miklečić J., Turkulin H., Jirouš-Rajković V. Weathering Performance of Surface of Thermally Modified Wood Finished with Nanoparticles-Modified Waterborne Polyacrylate Coatings. *Appl. Surf. Sci.* 2017;408:103-109. doi: 10.1016/j.apsusc.2017.03.011.
119. Mishra P.K., Giagli K., Tsalagkas D., Mishra H., Talegaonkar S., Gryc V., Wimmer R. Changing Face of Wood Science in Modern Era: Contribution of Nanotechnology. *NANOTEC.* 2018; 12:13–21. doi: 10.2174/18722/10511666170808111512.
120. Monnier G., Frahm E., Luo B., Missal K. Developing FTIR microspectroscopy for analysis of plant residues on stone tools // *J. Arch. Sci.* 2017. V. 78. P. 158.
121. Morrell, J.J. Protection of wood-based materials. In *Handbook of Environmental Degradation of Materials*; Kutz, M., Ed.; William Andrew Publishing: Norwich, NY, USA, 2005, pp. 299-317.
122. Nussbaum R. Surface investigation of wood with adhesives and coatings/

R. Nussbaum // PhD Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm. – (2001), – pp. 233-242.

123. Pandey K.K., Khali D.P. Accelerated Weathering of Wood Surfaces Modified by Chromium Trioxide. *Holzforschung*. 1998; 52:467-471. doi: 10.1515/hfsg.1998.52.5.467.

124. Pandey K.K., Pitman A.J. Weathering Characteristics of Modified Rubberwood (*Hevea Brasiliensis*) *J. Appl. Polym. Sci.* 2002;85:622–631. doi: 10.1002/app.10667.

125. Pospíšil J., Nešpurek S. Photostabilization of Coatings. Mechanisms and Performance. *Prog. Polym. Sci.* 2000;25:1261–1335. doi: 10.1016/S0079-6700(00)00029-0.

126. René Herrera-Díaz, Víctor Sepúlveda-Villaruel, Natalia Pérez-Peña, Linette Salvo-Sepúlveda, Carlos Salinas-Lira, Rodrigo Llano-Ponte, Rubén A. Ananías. Effect of wood drying and heat modification on some physical and mechanical properties of radiata pine. *Drying Technology*, Volume 36, 2018. Issue 5.

127. Rowell R.M. Acetylation of Wood—Journey from Analytical Technique to Commercial Reality. *For. Prod. J.* 2006;56:4–12.

128. Safin, R & Khakimzyanov, I & Galyavetdinov, N & Mukhametzyanov, Shamil. (2017). Gasification of torrefied fuel at power generation for decentralized consumers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 87. 032035. 10.1088/1755-1315/87/3/032035.

129. Saha S., Kocaefe D., Boluk Y., Pichette A. Enhancing Exterior Durability of Jack Pine by Photo-Stabilization of Acrylic Polyurethane Coating Using Bark Extract. Part 1: Effect of UV on Color Change and ATR–FT-IR Analysis. *Prog. Org. Coat.* 2011;70:376–382. doi: 10.1016/j.porgcoat.2010.09.034.

130. Schmalzl K.J., Evans P.D. Wood Surface Protection with Some Titanium, Zirconium and Manganese Compounds. *Polym. Degrad. Stab.* 2003;82: 409-419. doi: 10.1016/S0141-3910(03)00193-9.

131. Schmalzl K.J., Forsyth C.M., Evans P.D. Evidence for the Formation of Chromium (III) Diphenanthroquinone Complexes during Oxidation of Guaiacol and 2,6-

Dimethoxyphenol with Chromic Acid. *Polym. Degrad. Stab.* 2003; 82:399-407. doi: 10.1016/S0141-3910(03)00192-7.

132. Teacă C.A., Roșu D., Bodîrlău R., Roșu L. Structural Changes in Wood under Artificial UV Light Irradiation Determined by FTIR Spectroscopy and Color Measurements-A Brief Review. *BioResources.* 2013; 8:1478-1507. doi: 10.15376/biores.8.1.1478-1507.

133. Vančo, Marek & Mazáň, Andrej & Barčík, Štefan & Rajko, Lubomír & Koleda, Peter & Vyhnáliková, Zuzana & Safin, Ruslan. (2017). Impact of Selected Technological, Technical, and Material Factors on the Quality of Machined Surface at Face Milling of Thermally Modified Pine Wood. *BioResources.* 12. 5140-5154. 10.15376/biores.12.3.5140-5154.

134. Wålinder M., Omidvar A., Seltman J., Segerholm K. Micromorphological studies of modified wood using a surface preparation technique based on ultraviolet laser ablation. *Wood Material Science & Engineering.* Volume 4, 2009. 46-51.

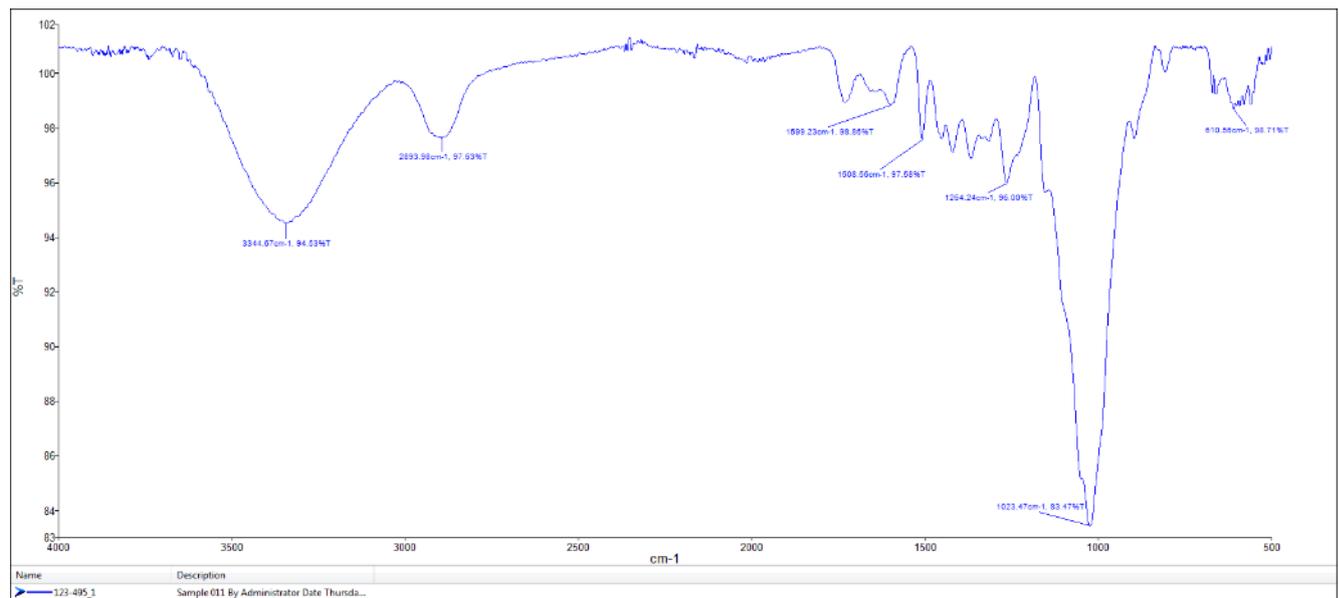
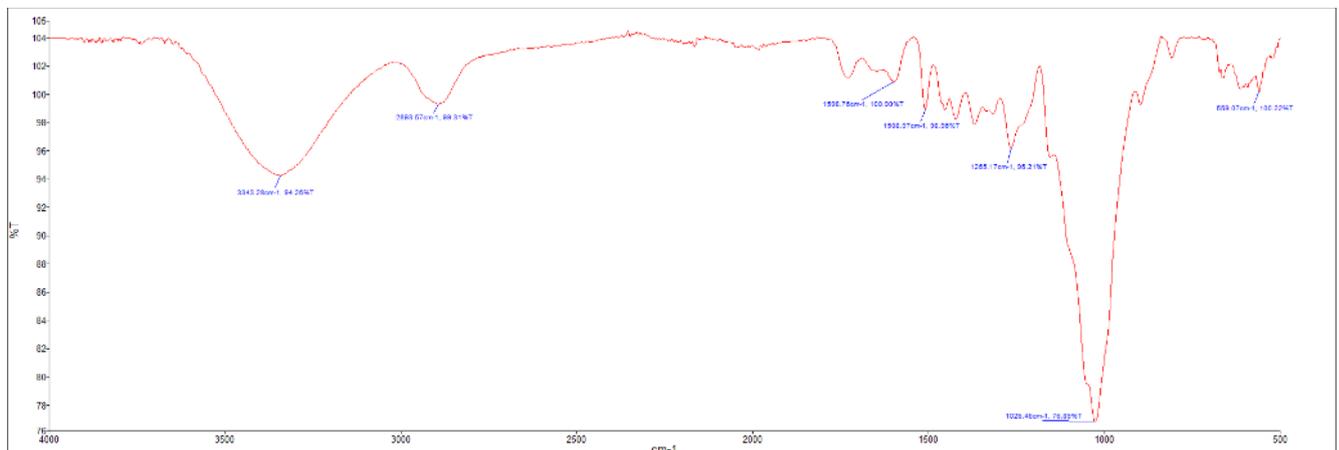
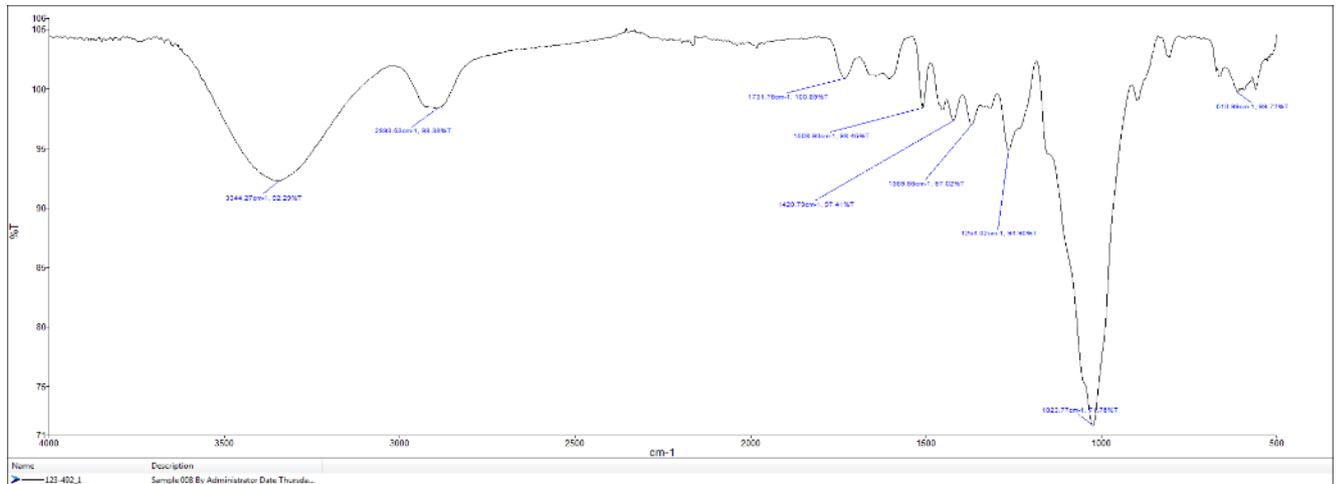
135. Williams R.S., Feist W.C. Wood Modified by Inorganic Salts: Mechanism and Properties. I. Weathering Rate, Water Repellency, and Dimensional Stability of Wood Modified with Chromium (III) Nitrate versus Chromic Acid. *Wood Fiber Sci.* 1985;17, pp.184-198.

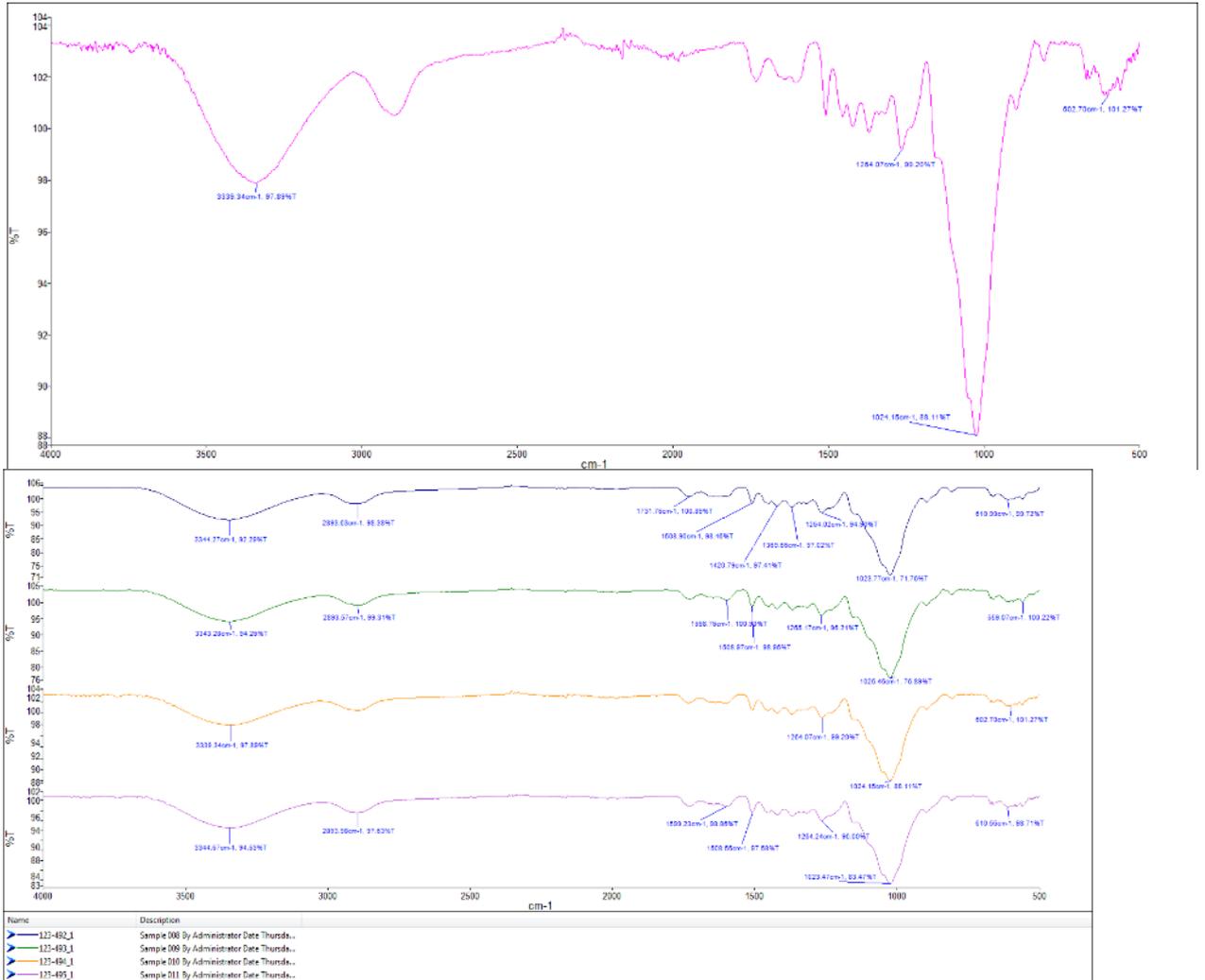
136. Zhao J., Xiuwen W., Hu J., Liu Q., Shen D., Xiao R. Thermal degradation of wood lignin and hardwood lignin by TG-FTIR and Py-GC/MS // *Polym. Degrad. Stab.* 2014. V. 108. P. 133.

137. Zoja Bednarek & Agnieszka Kaliszuk-Wietecha (2007) Analysis of the fire-protection impregnation influence on wood strength, *Journal of Civil Engineering and Management*, 13:2, 79-85, DOI: 10.1080/13923730.2007.9636423.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Результаты аналитических исследований модифицированной древесины методом преобразования ИК-Фурье





Протоколы испытаний на прочность клеевого шва

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЯ

Общие параметры испытания:

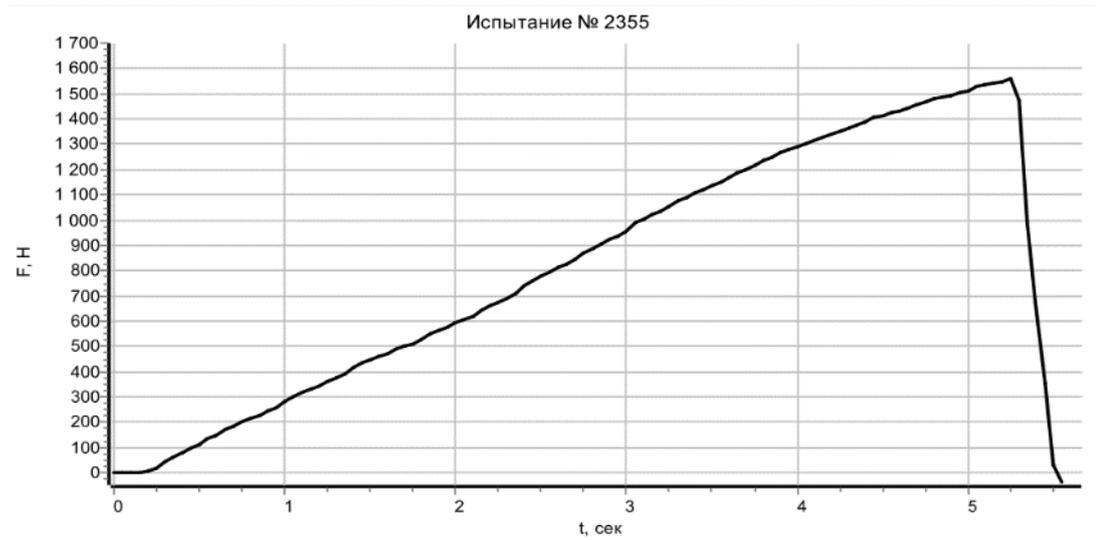
Тип испытания	Растяжение
Название группы	Испытание № 2355
Количество образцов	10
Материал	
Тип сечения	Прямоугольник
Примечание	обр 1

Параметры образца №1

Маркировка	
Расчетная длина, мм	0
Толщина, мм	15
Ширина, мм	20
Площадь сечения, мм ²	300,000

Результаты испытания:

Дата и время испытания	09.03.2023 14:05:53
Длительность испытания	00:00:05
Максимальная нагрузка, Н	1557,000
Максимальная деформация, мм	0,918
Предел прочности, Н/мм ²	5,190
Относительное удлинение, %	Нет данных



Параметры образца №2

Маркировка	
Расчетная длина, мм	0
Толщина, мм	15
Ширина, мм	20

Площадь сечения, мм² 300,000

Результаты испытания:

Дата и время испытания	09.03.2023 14:08:24
Длительность испытания	00:00:09
Максимальная нагрузка, Н	1588,000
Максимальная деформация, мм	1,608
Предел прочности, Н/мм ²	5,293
Относительное удлинение, %	Нет данных



Параметры образца №3

Маркировка	
Расчетная длина, мм	0
Толщина, мм	15
Ширина, мм	20

Площадь сечения, мм² 300,000

Результаты испытания:

Дата и время испытания	09.03.2023 14:10:49
Длительность испытания	00:00:14
Максимальная нагрузка, Н	2335,000
Максимальная деформация, мм	2,349
Предел прочности, Н/мм ²	7,783
Относительное удлинение, %	Нет данных



Параметры образца №4

Маркировка	
Расчетная длина, мм	0
Толщина, мм	15
Ширина, мм	20

Площадь сечения, мм² 300,000

Результаты испытания:

Дата и время испытания	09.03.2023 14:13:18
Длительность испытания	00:00:09
Максимальная нагрузка, Н	1831,000
Максимальная деформация, мм	1,446
Предел прочности, Н/мм ²	6,103
Относительное удлинение, %	Нет данных



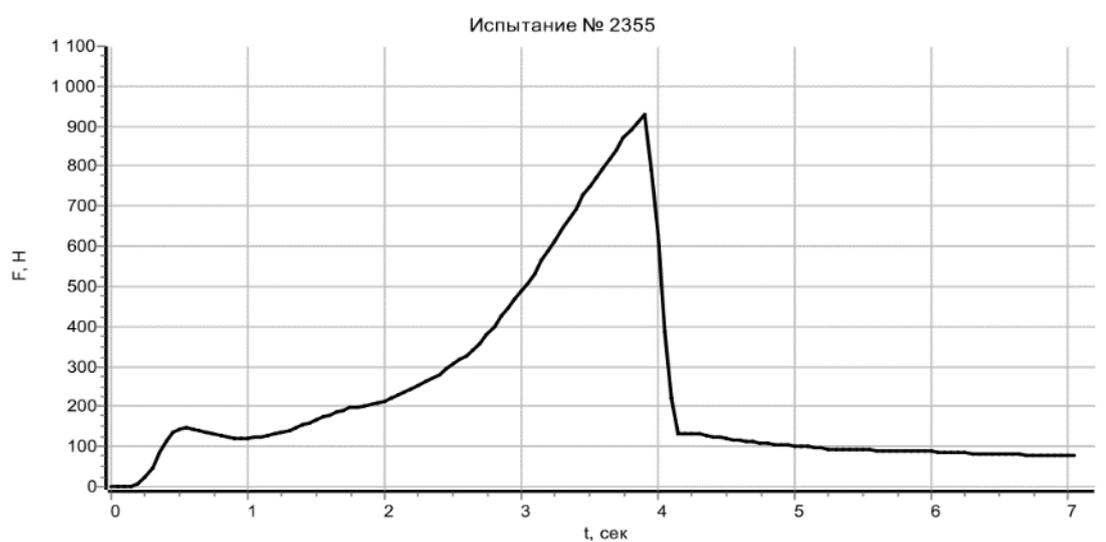
Параметры образца №5

Маркировка	
Расчетная длина, мм	0
Толщина, мм	15
Ширина, мм	20

Площадь сечения, мм² 300,000

Результаты испытания:

Дата и время испытания	09.03.2023 14:14:51
Длительность испытания	00:00:07
Максимальная нагрузка, Н	931,000
Максимальная деформация, мм	1,177
Предел прочности, Н/мм ²	3,103
Относительное удлинение, %	Нет данных



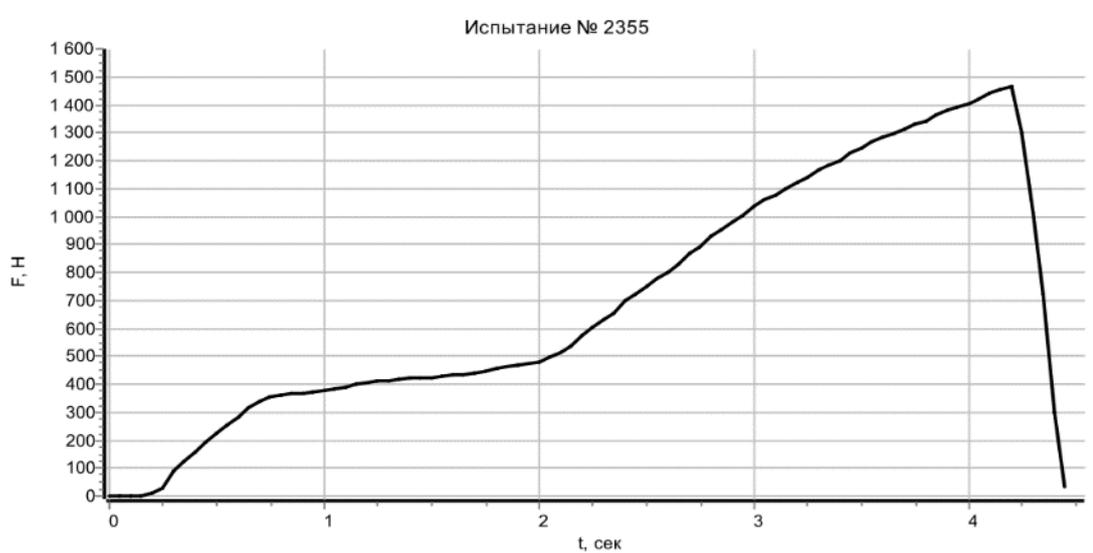
Параметры образца №6

Маркировка	
Расчетная длина, мм	0
Толщина, мм	15
Ширина, мм	20

Площадь сечения, мм² 300,000

Результаты испытания:

Дата и время испытания	09.03.2023 14:16:54
Длительность испытания	00:00:04
Максимальная нагрузка, Н	1463,000
Максимальная деформация, мм	0,740
Предел прочности, Н/мм ²	4,877
Относительное удлинение, %	Нет данных



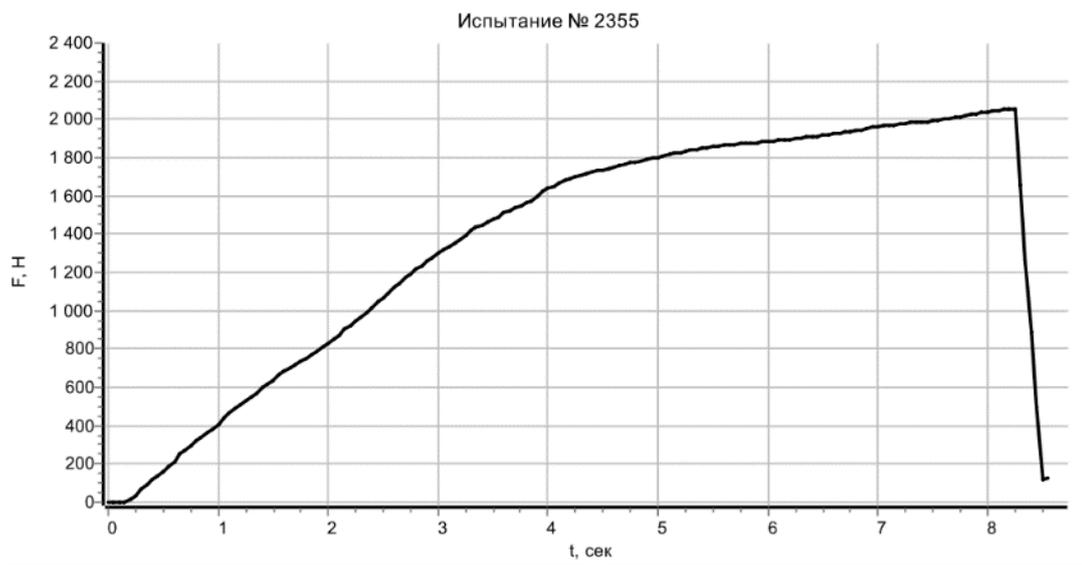
Параметры образца №7

Маркировка	
Расчетная длина, мм	0
Толщина, мм	15
Ширина, мм	20

Площадь сечения, мм² 300,000

Результаты испытания:

Дата и время испытания	09.03.2023 14:18:17
Длительность испытания	00:00:08
Максимальная нагрузка, Н	2054,000
Максимальная деформация, мм	1,430
Предел прочности, Н/мм ²	6,847
Относительное удлинение, %	Нет данных



Параметры образца №8

Маркировка	
Расчетная длина, мм	0
Толщина, мм	15
Ширина, мм	20

Площадь сечения, мм ²	300,000
----------------------------------	---------

Результаты испытания:

Дата и время испытания	09.03.2023 14:19:39
Длительность испытания	00:00:08
Максимальная нагрузка, Н	1566,000
Максимальная деформация, мм	1,308
Предел прочности, Н/мм ²	5,220
Относительное удлинение, %	Нет данных



Параметры образца №9

Маркировка	
Расчетная длина, мм	0
Толщина, мм	15
Ширина, мм	20

Площадь сечения, мм ²	300,000
----------------------------------	---------

Результаты испытания:

Дата и время испытания	09.03.2023 14:20:45
Длительность испытания	00:00:12
Максимальная нагрузка, Н	1677,000
Максимальная деформация, мм	1,971
Предел прочности, Н/мм ²	5,590
Относительное удлинение, %	Нет данных



Параметры образца №10

Маркировка	
Расчетная длина, мм	0
Толщина, мм	15
Ширина, мм	20

Площадь сечения, мм² 300,000

Результаты испытания:

Дата и время испытания	09.03.2023 14:22:02
Длительность испытания	00:00:13
Максимальная нагрузка, Н	2552,000
Максимальная деформация, мм	2,257
Предел прочности, Н/мм ²	8,507
Относительное удлинение, %	Нет данных



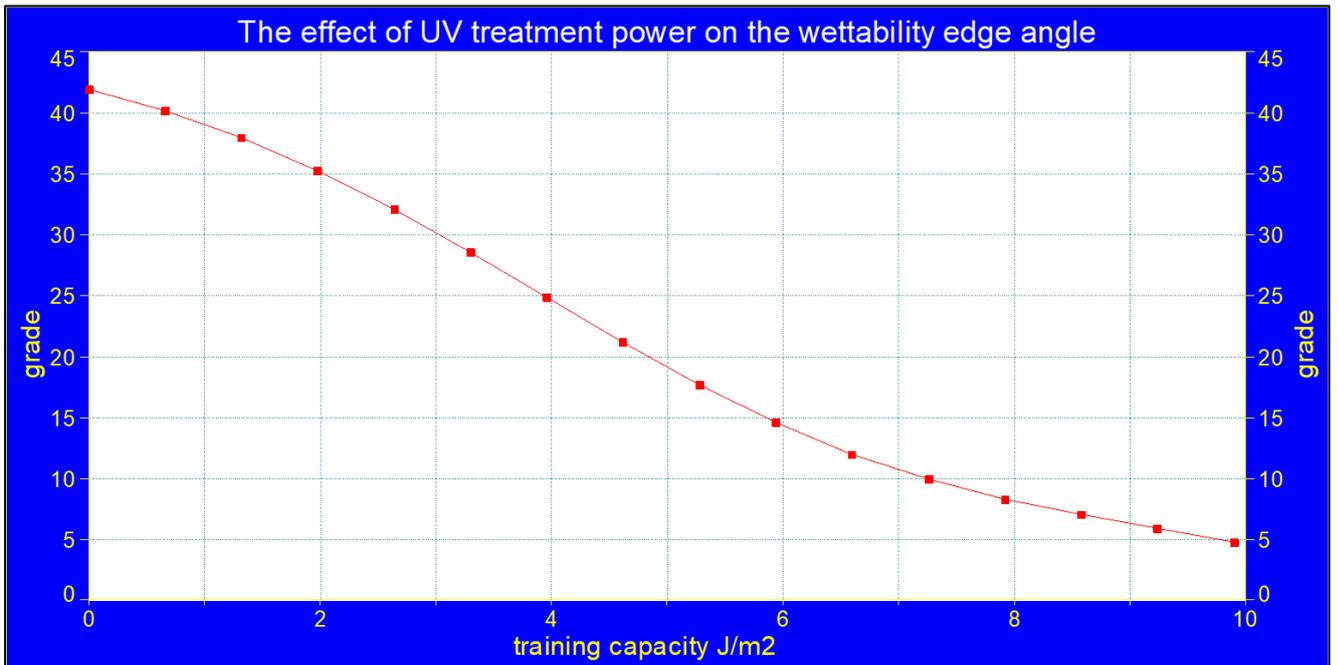
Расчёты математической модели термомодифицированной древесины

E16		= \$B\$12+\$B\$3*(B16-40)/10+\$B\$4*(C16-217,5)/22,5-																			
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	
			b0	x1	x2	x3	x1*x2	x2*x3	x1*x3	x1*x1	x2*x2	x3*x3	Y								
2	(XГ*Y)-1 * XГ*Y			30	195	2															
3	b	6,833333333	458,78	-6,8333333	3,944444444	4,1111	1,47	-1,30435	1,0833	-0,8333	1,12	0,67	462,2								
4	1	-3,944444444																			
5	2	-4,111111111		(F8-40)/10	(G8-217,5)/22,5	(H8-3)/1	(F8-40)	(G8-217,5)	(F8-40)/	(F8-40)/1	(G8-21	(H8-3)/1*(H8-3)/1									
6	3	1,5																			
7	4	-1,333333333																			
8	5	1,083333333																			
9	6	-0,833333333																			
10	7	1,166666667																			
11	8	0,666666667																			
12	9	458,7777778	b0	x1	x2	x3	x1*x2	x2*x3	x1*x3	x1*x1	x2*x2	x3*x3	Y								
13	0	Y=b0+b1*x1+b2*x2+b3*x3-b12*x1*x2+b23*x2*x3+b13*x1*x3+b11*x1*x1+b22*x2*x2+b33*x3*x3																			
14																					
15	S	T	t	Y		S	T	t	Y		S	T	t	Y		S	T	t	Y		
16	30	195	2	462,2		1	50	240	4	459,8		45	240	4	455,7		40	240	4	451,2	
17	31	198	2,1	461,5		2	50	230	4	460,7		45	230	4	456,9		40	230	4	452,8	
18	32	200	2,2	461,1		3	50	240	3,5	461,5		45	240	3,5	457,7		40	240	3,5	453,4	
19	33	202	2,3	460,7		4	50	220	4	462,0		45	230	3,5	458,6		40	230	3,5	454,7	
20	34	205	2,4	460,1		5	50	230	3,5	462,1		45	220	4	458,6		40	220	4	454,8	
21	35	208	2,5	459,6		6	50	220	3,5	463,1		45	220	3,5	460,0		40	240	3	456,0	
22	36	210	2,6	459,3		7	50	240	3	463,5		45	240	3	460,0		40	220	3,5	456,4	
23	37	212	2,7	459,1		8	50	230	3	463,8		45	230	3	460,6		40	230	3	456,9	
24	38	215	2,8	458,7		9	50	210	4	463,8		45	210	4	460,7		40	210	4	457,2	
25	39	217	2,9	458,6		10	50	220	3	464,5		45	220	3	461,6		40	220	3	458,4	
26	40	220	3	458,4		11	50	210	3,5	464,6		45	210	3,5	461,8		40	210	3,5	458,6	
27	41	222	3,1	458,3		12	50	210	3	465,7		45	240	2,5	462,6		40	240	2,5	458,9	
28	42	224	3,2	458,3		13	50	230	2,5	465,8		45	240	2,5	462,6		40	240	2,5	458,9	
29	43	226	3,3	458,4		14	50	230	2,5	465,8		45	230	2,5	462,9		40	230	2,5	459,5	
30	44	228	3,4	458,5		15	50	240	2,5	465,8		45	230	2,5	462,9		40	230	2,5	459,5	
31	45	230	3,5	458,6		16	50	240	2,5	465,8		45	210	3	463,2		40	200	4	460,1	
32	46	232	3,6	458,7		17	50	200	4	466,1		45	200	4	463,3		40	210	3	460,2	
33	47	234	3,7	459,0		18	50	220	2,5	466,3		45	220	2,5	463,7		40	220	2,5	460,7	
34	48	236	3,8	459,2		19	50	220	2,5	466,3		45	220	2,5	463,7		40	220	2,5	460,7	
35	49	238	3,9	459,5		20	50	200	3,5	466,6		45	200	3,5	464,1		40	200	3,5	461,2	
36	50	240	4	459,8		21	50	210	2,5	467,2		45	195	4	464,8		40	195	4	461,8	
37	30	195	2	462,3		22	50	210	2,5	467,2		45	210	2,5	464,9		40	240	2	462,1	
38	30	215	2	457,4		23	50	195	4	467,4		45	210	2,5	464,9		40	210	2,5	462,2	
39	30	240	2	454,0		24	50	200	3	467,4		45	200	3	465,2		40	210	2,5	462,2	
40	30	195	3	457,7		25	50	195	3,5	467,7		45	195	3,5	465,4		40	230	2	462,5	
41	30	215	3	451,7		26	50	230	2	468,2		45	240	2	465,5		40	200	3	462,6	
42	30	240	3	446,8		27	50	220	2	468,4		45	230	2	465,5		40	195	3,5	462,7	
43	30	195	4	454,5		28	50	195	3	468,4		45	220	2	466,0		40	220	2	463,3	
44	30	215	4	447,4		29	50	240	2	468,5		45	195	3	466,3		40	195	3	463,9	
45	30	240	4	441,0		30	50	200	2,5	468,5		45	200	2,5	466,6		40	200	2,5	464,3	
46	40	215	2	463,9		31	50	200	2,5	468,5		45	200	2,5	466,6		40	200	2,5	464,3	
47	40	240	2	462,1		32	50	210	2	469,0		45	210	2	467,0		40	210	2	464,6	
48	40	195	3	463,9		33	50	195	2,5	469,4		45	195	2,5	467,6		40	195	2,5	465,4	
49	40	215	3	459,2		34	50	195	2,5	469,4		45	195	2,5	467,6		40	195	2,5	465,4	
50	40	240	3	456,0		35	50	200	2	470,0		45	200	2	468,4		40	200	2	466,3	
51	40	195	4	461,8		36	50	195	2	470,8		45	195	2	469,3		40	195	2	467,3	
52	40	215	4	455,9																	
53	40	240	4	451,2																	
54	50	195	2	470,8																	
55	50	215	2	468,6		S	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	
56	50	240	2	468,5		T	240	230	240	220	230	220	240	230	210	220	210	230	230	240	
57	50	195	3	468,4		t	4	4	3,5	4	3,5	3,5	3	3	4	3	3,5	3	2,5	2,5	

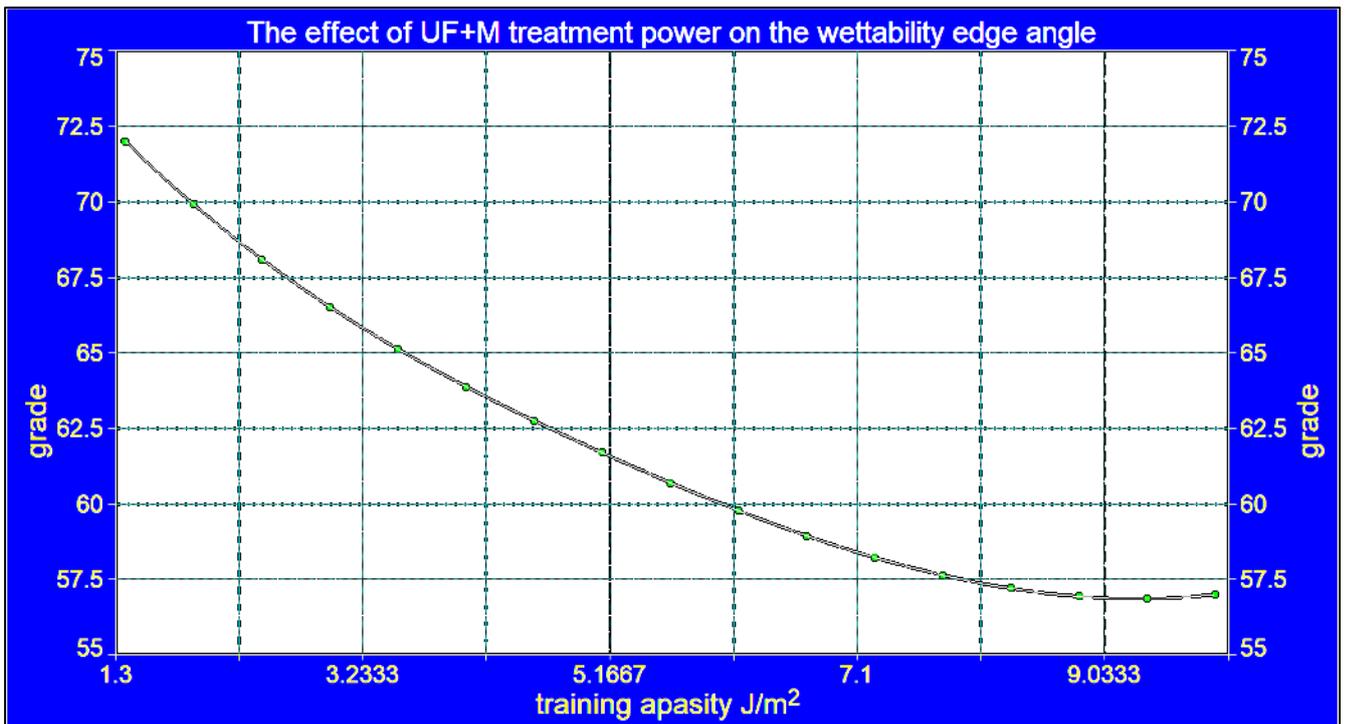
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	x													
2	№ опыта	x1 толщина	x2 температура	x3 время	x1x2	x2x3	x1x3	x1 ²	x2 ²	x3 ²	у плотность нормализованная			у плотность натуральная
3	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1,5560	2,4211360	461
4	2	-1	-1	0	1	0	0	1	1	0	1	-0,4440	0,1971360	459
5	3	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-2,4440	5,9731360	457
6	4	-1	0	-1	0	0	1	1	0	1	1	-0,4440	0,1971360	459
7	5	-1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	-10,4440	109,0771360	449
8	6	-1	0	1	0	0	-1	1	0	1	1	-14,4440	208,6291360	445
9	7	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	-2,4440	5,9731360	457
10	8	-1	1	0	-1	0	0	1	1	0	1	-14,4440	208,6291360	445
11	9	-1	1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	-20,4440	417,9571360	439
12	10	0	-1	-1	0	1	0	0	1	1	1	5,5560	30,8691360	465
13	11	0	-1	0	0	0	0	0	1	0	1	3,5560	12,6451360	463
14	12	0	-1	1	0	-1	0	0	1	1	1	1,5560	2,4211360	461
15	13	0	0	-1	0	0	0	0	0	1	1	2,5560	6,5331360	462
16	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,5560	0,3091360	460
17	15	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	-2,4440	5,9731360	457
18	16	0	1	-1	0	-1	0	0	1	1	1	0,5560	0,3091360	460
19	17	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	-1,4440	2,0851360	458
20	18	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	-5,4440	29,6371360	454
21	19	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	13,5560	183,7651360	473
22	20	1	-1	0	-1	0	0	1	1	0	1	9,5560	91,3171360	469
23	21	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	6,5560	42,9811360	466
24	22	1	0	-1	0	0	-1	1	0	1	1	10,5560	111,4291360	470
25	23	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	5,5560	30,8691360	465
26	24	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	1,5560	2,4211360	461
27	25	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	7,5560	57,0931360	467
28	26	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	3,5560	12,6451360	463
29	27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5560	0,3091360	460
30											459,444		1582,6666720	58,61728415
31											среднее ариф.	отклонения от среднего	квадраты отклонения от среднего	дисперсия

Коэффициенты в уравнении регрессии

Поверх. доза облучения кДж/м ²	θ , краевой угол смачивания, градусы
0	41.964514143894
0,66	40.247151744926
1.32	38.046198974503
1,98	35.330447674701
2,64	32.147063097035
3,3	28.614403420467
3.96	24.904000791579
4,62	21.214447110202
5,28	17.741160212905
5,94	14.646633278841
6,60	12.035696716231
7,26	9.9395586829998
7,92	8.3110539276332
8,58	7.0318242711692
9,24	5.9303375670243
9,9	4.8080019153684



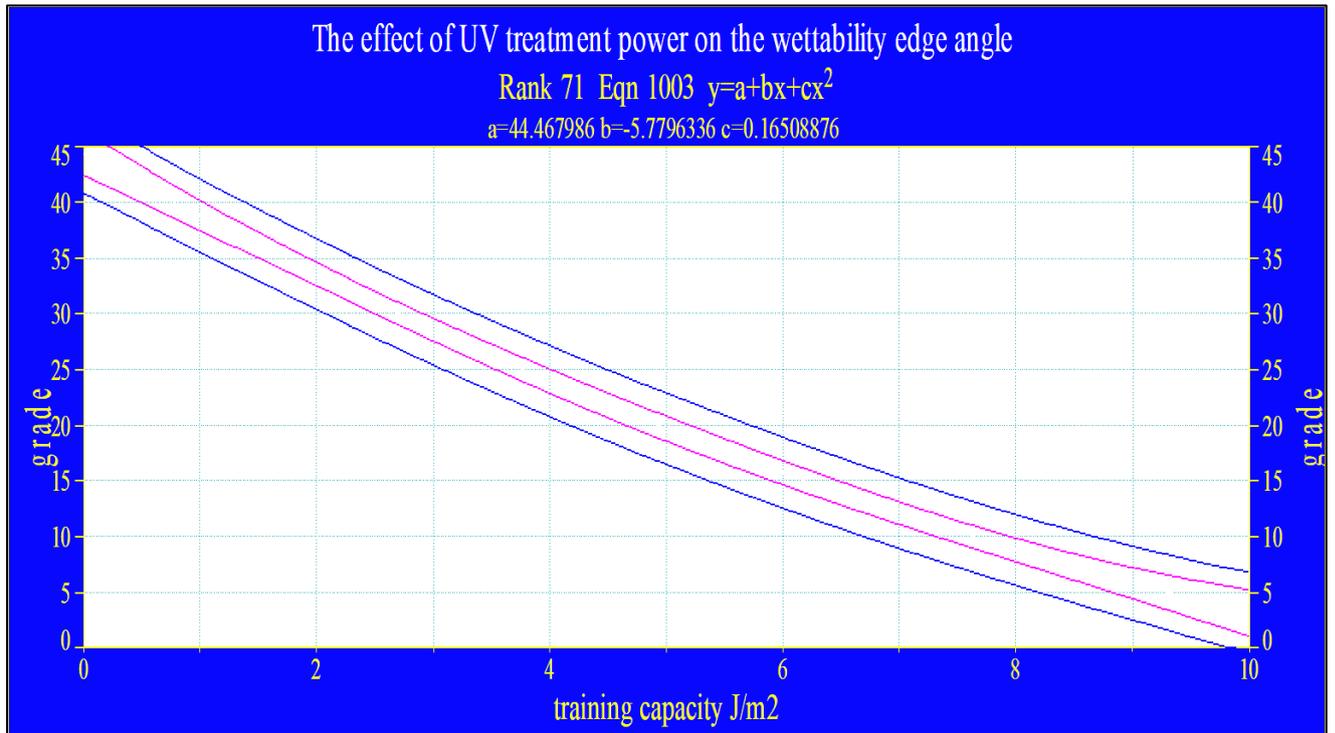
a)



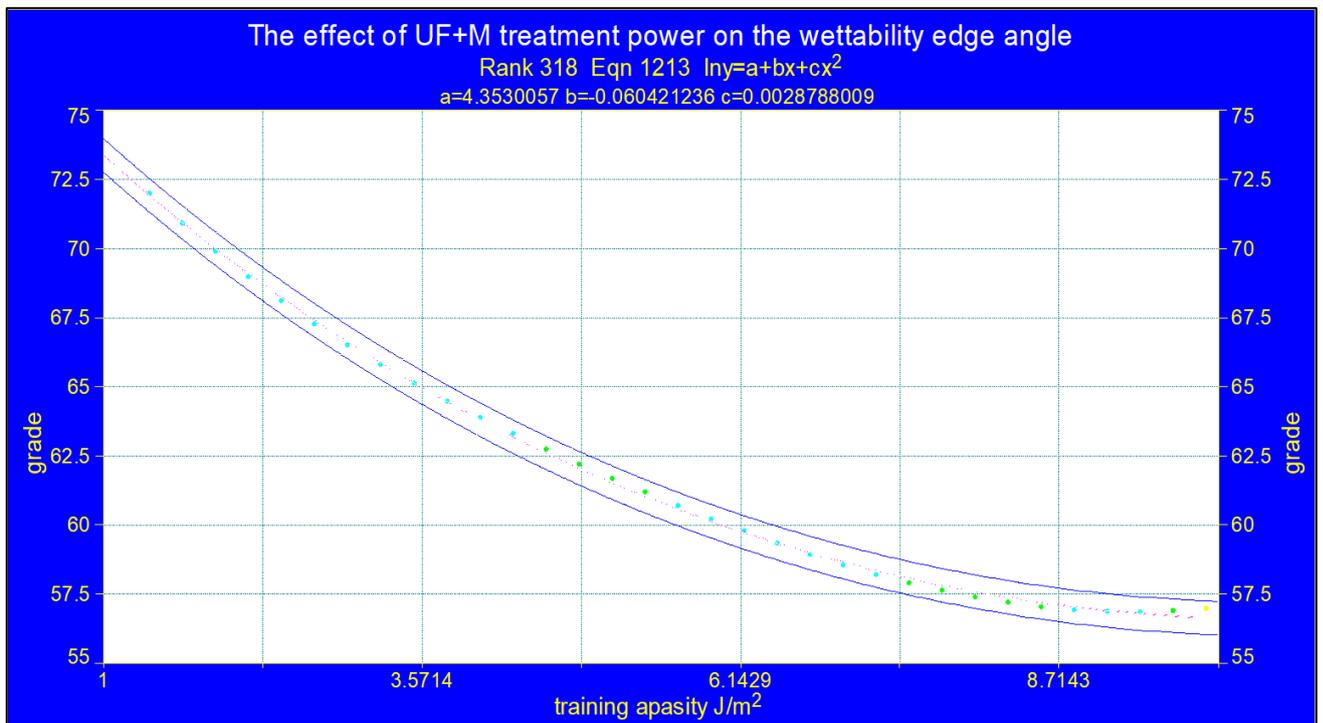
б)

Влияние дозы облучения от краевого угла смачивания образца, а) и б)

Влияние дозы облучения от краевого угла смачивания образца получены с помощью полинома второй степени, а) и б).



а)



б)

Акт внедрения



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИРМА «АММ»

420051, г. Казань, ул. Химическая, д.3, офис №3, тел.8 (843)207-27-09; e-mail: itfamm@mail.ru
 ИНН 1657002817 КПП 165801001 Р/С 40702810062000045408 в ОТДЕЛЕНИИ "БАНК
 ТАТАРСТАН" №8610 ПАО СБЕРБАНК ОГРН 1021603149480; Свидетельство СРО №СП-1-17-0383

«Утверждаю»



Директор ООО «ИТФ «АММ»


 Магданов Т.Р.

«01» 03 2025г.

АКТ

внедрения в производство технологии глубокой пропитки
 деревянных конструкций

Научная группа в составе представителей ФГБОУ ВО «КНИТУ» доцента Сафиной А.В. аспиранта Гирфанова А.А., профессора Сафина Р.Р. и представителей Общества с ограниченной ответственностью «Инженерно-техническая фирма «АММ» директора Магданова Т.Р., начальника производства Щербакова С.А., составила настоящий акт о том, что на ООО «ИТФ «АММ» принята к внедрению технология глубокой пропитки деревянных конструкций, находящихся в эксплуатации, методом предварительной подготовки поверхности с использованием ламп ультрафиолетового излучения, повышающая качество био-огнезащитной обработки деревянных конструкций (мауэрлатов, стропил, брусьев, прогонов и т.п.) вследствие увеличения глубины пропитки и введенного объема пропитывающих составов путём повышения смачиваемости поверхности древесины.

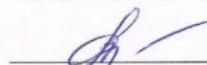
Предложенное усовершенствование позволяет увеличить сроки био-огнезащитной обработки деревянных строительных конструкций, межремонтный период их эксплуатации и снизить затраты на содержание и обслуживание деревянных конструкций, требующих соблюдения сроков контроля качества защитной обработки.

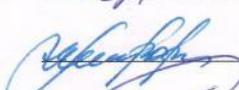
Представители ООО «ИТФ «АММ»


 Магданов Т.Р.


 Щербаков С.А.

Представители ФГБОУ ВО «КНИТУ»


 Сафина А.В.


 Гирфанов А.А.


 Сафин Р.Р.