

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

“ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ” (ТГАСУ)

На правах рукописи



**Черемных Владимир Алексеевич**

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

2.1.5 – Строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Волокитин Г.Г.

Томск 2025

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Введение.....</b>                                                                                                                                                  | <b>6</b>  |
| <b>ГЛАВА 1. СТРОИТЕЛЬНЫЕ ИЗДЕЛИЯ И КОНСТРУКЦИИ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ. ОСОБЕННОСТИ ДРЕВЕСИНЫ ХВОЙНЫХ ПОРОД. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ И МОДИФИКАЦИИ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ.....</b> | <b>14</b> |
| 1.1 Строительные изделия и конструкции из древесины.....                                                                                                              | 14        |
| 1.1.1 Преимущества древесины в строительстве.....                                                                                                                     | 16        |
| 1.1.2 Основные виды строительных изделий из древесины.....                                                                                                            | 18        |
| 1.1.3 Строительные конструкции из древесины.....                                                                                                                      | 19        |
| 1.2 Строение древесины, ее особенности и свойства .....                                                                                                               | 20        |
| 1.3 Методы и виды защиты древесины от воздействия микроорганизмов, возгорания, разрушения.....                                                                        | 23        |
| 1.3.1 Существующие методы защиты деревянных изделий.....                                                                                                              | 23        |
| 1.3.2 Виды защиты древесины.....                                                                                                                                      | 24        |
| 1.3.3 Пропитка древесины маслами.....                                                                                                                                 | 26        |
| 1.3.4 Термическая обработка древесины.....                                                                                                                            | 27        |
| 1.3.4.1 Поверхностная термическая обработка древесины.....                                                                                                            | 28        |
| 1.3.4.2 Глубокая и полная термическая обработка древесины.....                                                                                                        | 29        |
| 1.3.4.3 Термическая модификация древесины.....                                                                                                                        | 30        |
| 1.4 Возможность использования низкотемпературной плазмы для изменения свойств древесины, используемой в строительных конструкциях.....                                | 31        |
| Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования.....                                                                                                          | 34        |
| <b>ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ РАБОТЫ.....</b>                                                                     | <b>36</b> |
| 2.1 Свойства исследуемой древесины хвойных пород.....                                                                                                                 | 36        |
| 2.2 Особенности конструкции оборудования для плазменной обработки древесины.....                                                                                      | 38        |
| 2.3 Методы и методики исследований.....                                                                                                                               | 41        |
| 2.3.1 Оптическая микроскопия.....                                                                                                                                     | 41        |

|                                                                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.2 Сканирующая электронная микроскопия.....                                                                                            | 41        |
| 2.3.3 Определение цвета поверхности.....                                                                                                  | 42        |
| 2.3.4 Методы проведения механических испытаний.....                                                                                       | 42        |
| 2.3.4.1 Определение твердости.....                                                                                                        | 42        |
| 2.3.4.2 Определение износостойкости поверхности.....                                                                                      | 43        |
| 2.3.4.3 Определение предела прочности при сжатии.....                                                                                     | 44        |
| 2.3.4.4 Определение предела прочности при изгибе.....                                                                                     | 45        |
| 2.3.4.5 Определение прочности клеевого соединения.....                                                                                    | 46        |
| 2.3.5 Определение водо- и паропроницаемости поверхности древесины...                                                                      | 47        |
| 2.3.6 Определение биологической стойкости древесины.....                                                                                  | 47        |
| 2.3.7 Определение огнезащитной эффективности.....                                                                                         | 48        |
| 2.3.8 Комплексный термический анализ.....                                                                                                 | 48        |
| 2.4 Методология исследования.....                                                                                                         | 48        |
| <b>ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА<br/>ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ НА<br/>ПОВЕРХНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ .....</b> | <b>51</b> |
| 3.1 Модель термического разложения древесины.....                                                                                         | 51        |
| 3.2 Математическая модель теплового режима древесины при плазменной<br>обработке её поверхности и алгоритм численного решения задачи..... | 60        |
| 3.3 Результаты расчетов.....                                                                                                              | 62        |
| Выводы по главе 3.....                                                                                                                    | 68        |
| <b>ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБРАБОТКИ ПОТОКОМ<br/>НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ НА СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ...</b>                             | <b>70</b> |
| 4.1 Влияние плазменной обработки на структуру поверхности древесины.....                                                                  | 70        |
| 4.1.1 Определение структурных изменений поверхности древесины с<br>помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии.....          | 70        |
| 4.2 Влияние плазменной обработки на механические свойства древесины в<br>зависимости от режима плазменной обработки.....                  | 75        |
| 4.2.1 Влияние плазменной обработки на твердость древесины.....                                                                            | 75        |

|                                                                                                                                                                                                      |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.2 Влияние плазменной обработки на износостойкость поверхности древесины.....                                                                                                                     | 77         |
| 4.2.3 Влияние плазменной обработки на прочность древесины при сжатии.....                                                                                                                            | 81         |
| 4.2.4 Влияние плазменной обработки на прочность древесины при изгибе.....                                                                                                                            | 88         |
| 4.2.5 Влияние плазменной обработки на прочность клеевого соединения.....                                                                                                                             | 96         |
| 4.3 Влияние плазменной обработки на паро- и водопроницаемость поверхности древесины.....                                                                                                             | 103        |
| 4.4 Влияние плазменной обработки на биологическую стойкость древесины.....                                                                                                                           | 112        |
| 4.5 Огнезащитная характеристика древесины, обработанной потоком низкотемпературной плазмы.....                                                                                                       | 116        |
| Выводы по главе 4.....                                                                                                                                                                               | 120        |
| <b>ГЛАВА 5. АПРОБАЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ.....</b>                                                                                                                        | <b>122</b> |
| 5.1 Внедрение технологии обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы.....                                                                                                                  | 122        |
| 5.1.1 Разработка установок по обработке древесины потоком низкотемпературной плазмы.....                                                                                                             | 122        |
| 5.1.2 Техничко-экономическое обоснование эффективности обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы.....                                                                                    | 125        |
| 5.1.3 Технологическая схема производства работ по обработке изделий из древесины хвойных пород потоком низкотемпературной плазмы.....                                                                | 127        |
| 5.2 Использование побочного продукта – сажи, полученной при в результате воздействия плазменного потока с поверхностью древесины для модификации трибологических свойств смазывающих материалов..... | 129        |
| 5.2.1 Микроструктура и состав сажи.....                                                                                                                                                              | 129        |
| 5.2.2 Модификация трибологических свойств масел при использовании сажи.....                                                                                                                          | 131        |

|                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Выводы по главе 5.....                                                                                                                                       | 133 |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....                                                                                                                                      | 134 |
| <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....                                                                                                                               | 136 |
| <b>Приложение А</b> Справка о внедрении НИР в учебный процесс.....                                                                                           | 158 |
| <b>Приложение Б</b> Математическая модель теплового режима древесины при<br>плазменной обработке её поверхности и алгоритм численного решения<br>задачи..... | 159 |
| <b>Приложение В</b> Заключение БИ ТГУ .....                                                                                                                  | 178 |
| <b>Приложение Г</b> Акт использования результатов диссертационной работы от<br>ООО «Тарная база».....                                                        | 179 |
| <b>Приложение Д</b> Технологический регламент на производство работ по<br>обработке древесины хвойных пород потоком низкотемпературной плазмы..              | 180 |

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность работы**

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

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

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

### **Степень разработанности темы диссертационного исследования**

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

вопросов является разработка метода модификации, сохраняющего экологичность древесины и не ограничивающего области ее применения.

Решением обозначенного вопроса может стать модификация древесины потоком низкотемпературной плазмы. Значительный вклад в исследования, направленные на использование низкотемпературной плазмы для обработки различных материалов, внесли Н.Г. Корсак, А.С. Быков, В.С. Резник, Ю.А. Титов, Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, Т.Ф. Романюк, В.А. Власов, В.К. Козлова, Г.А. Куликова, В.В. Лопатин, G. Avramidis, P.P. Хасаншин, S. Gerullis, В.И. Онегин, Р.Р. Сафин, В.С. Бессмертный и др. Проведенные исследования показывают высокую эффективность применения потока низкотемпературной плазмы для обработки различных материалов. Однако работы, направленные на исследование влияния потока низкотемпературной плазмы на структуру и свойства древесины, в большинстве своем затрагивают высокочастотную низкотемпературную плазму. Такая обработка позволяет увеличить адгезию и смачиваемость древесины, что положительно отражается на склеивании древесных материалов при изготовлении различных плит. Исследования обработки древесины низкотемпературной плазмой с целью повышения ее стойкости к неблагоприятным внешним факторам в литературе практически не встречаются. **Объектом исследования** являются строительные изделия из древесины хвойных пород, а **предметом исследования** – структура и свойства изделий из древесины хвойных пород после обработки низкотемпературной плазмой.

### **Цель работы**

Разработка научно обоснованных технологических решений модификации строительных изделий из древесины хвойных пород низкотемпературной плазмой.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследование физико-химических процессов, протекающих в приповерхностном слое древесины при воздействии потоком низкотемпературной плазмы.

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

### **Научная новизна**

- 1) Установлено, что при воздействии на древесину хвойных пород потоком низкотемпературной плазмы с количеством теплоты  $\sim 10 - \sim 30$  кДж в приповерхностной зоне происходит формирование модифицированного защитного слоя толщиной 0,2–2,0 мм.
- 2) Установлен механизм модификации поверхности древесины хвойных пород низкотемпературной плазмой, заключающийся в термодеструкции гемицеллюлоз и лигнина с одновременной миграцией природных смол на поверхность и формированием нового композиционного слоя. Параметрами, обеспечивающими протекание данного процесса, являются удельный тепловой поток  $1,0-3,0 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> и скорость обработки 0,03–0,12 м/с.
- 3) Установлен комплексный характер модификации приповерхностного слоя древесины, проявляющийся в синергетическом улучшении ключевых эксплуатационных свойств: гидрофобности (в 1,5–1,8 раза), биостойкости (в 1,5–2 раза), износостойкости (в 1,5–2 раза), стойкости к воспламенению (в 2–3 раза), а также к снижению водопроницаемости в 2–4 раза, при этом



паропроницаемость и объёмные механические характеристики материала сохраняются на исходном уровне.

### **Теоретическая значимость диссертационной работы**

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

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

### **Практическая значимость диссертационной работы**

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

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

Разработано оборудование для обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы.

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

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

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

### **Методология диссертационного исследования**

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

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

### **Методы диссертационного исследования**

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

### **Положения, выносимые на защиту**

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

2. Положение о зависимости свойств обработанных изделий из древесины от количества теплоты, подведенной к древесине в процессе обработки, а именно свойства материалов из древесины зависят от толщины обработанного слоя и степени термодеструкции древесины. Слой толщиной 0,2–2,0 мм снижает водопроницаемость поверхности древесины в 2–4 раза, повышает гидрофобность в 1,5–1,8 раза, биостойкость – в 1,5–2 раза и износостойкость поверхности – в 2 раза, при этом паропроницаемость и механические характеристики древесины не меняются.

### **Достоверность результатов исследования**

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

### **Апробация диссертационного исследования**

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на Российско-Казахстанской молодежной научно-технической конференции «Новые материалы и технологии» (г. Барнаул, 2021, 2022, 2024 ); 11-м Международном онлайн-симпозиуме «Материалы во внешних полях» (г. Новокузнецк, 2022); Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых (г. Томск, 2022, 2023, 2024); Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 40-летию создания Инженерно-строительного института (г. Красноярск, 2022); Международной

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

### **Внедрение результатов исследования**

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

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

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

### **Личный вклад автора**

Соискатель принимал непосредственное участие в постановке цели и задач научного исследования, разработке оборудования по плазменной обработке, проведении расчетных и экспериментальных исследований по определению характеристик древесины, обработке результатов исследований, разработке

технологических основ обработки изделий из древесины потоком низкотемпературной плазмы, анализе, интерпретации и подготовке полученных результатов к публикации. Анализ, интерпретация полученных результатов и формулирование выводов проводилось совместно с научным руководителем.

### **Публикации**

По материалам выполненных исследований опубликовано 26 научных работ, в том числе 4 статьи, рекомендованных ВАК. Техническая новизна защищена 3 патентами РФ.

### **Объем и структура диссертационной работы**

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

## **ГЛАВА 1. СТРОИТЕЛЬНЫЕ ИЗДЕЛИЯ И КОНСТРУКЦИИ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ. ОСОБЕННОСТИ ДРЕВЕСИНЫ ХВОЙНЫХ ПОРОД. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ И МОДИФИКАЦИИ СВОЙСТВ ДРЕВЕСИНЫ**

Древесина на протяжении веков остается одним из наиболее востребованных природных материалов, широко применяемым в строительстве, производстве мебели и отделочных работах. Ее популярность обусловлена уникальным сочетанием экологичности, технологичности обработки и высоких эксплуатационных характеристик [1, 2]. Однако природное происхождение древесины обуславливает и существенные недостатки, включая подверженность биологическому разрушению, горючесть и чувствительность к влажностным деформациям [3].

Особое место в промышленном использовании занимают хвойные породы древесины (сосна, ель, лиственница, кедр), которые отличаются оптимальным соотношением прочностных характеристик и доступности [4–6]. Их широкое применение в строительстве и производстве требует разработки эффективных методов защиты и модификации, позволяющих расширить сферу использования и повысить долговечность древесных материалов [7].

В данной главе рассматриваются:

- ключевые особенности строения и свойств древесины хвойных пород;
- основные факторы, ограничивающие ее применение;
- современные методы защиты и модификации, направленные на улучшение эксплуатационных характеристик.

Особое внимание уделяется анализу существующих технологий обработки древесины, их преимуществ и недостатков, что создает теоретическую основу для разработки новых эффективных методов модификации, в частности – плазменной обработки поверхности.

### **1.1 Строительные изделия и конструкции из древесины**

Древесина является одним из древнейших и наиболее широко используемых строительных материалов [1–3]. Уникальные физико-

механические свойства, экологическая чистота, высокая доступность и технологичность обработки делают древесину незаменимой в строительстве как жилых, так и промышленных объектов [8]. Особое место в строительстве занимают изделия из хвойных пород древесины – сосны, ели и лиственницы [9, 10]. Эти породы отличаются оптимальным сочетанием прочности, долговечности и доступности, что обеспечивает их популярность и широкое применение в различных конструкциях [11–13].

Хвойные породы древесины характеризуются рядом особенностей, которые делают их предпочтительными для строительства. В их составе преобладают целлюлоза, гемицеллюлозы и лигнин – основные компоненты, формирующие структуру древесины и определяющие её свойства. Целлюлоза обеспечивает прочность и жёсткость, гемицеллюлозы участвуют в связывании волокон, а лигнин придаёт твёрдость и устойчивость к биологическим воздействиям [12, 13].

Сосна, ель и лиственница занимают лидирующие позиции среди хвойных пород, используемых в строительстве, благодаря своим уникальным свойствам и широкому распространению.

Сосна – одна из самых распространённых пород в России и Европе. Её древесина характеризуется хорошей прочностью, средней плотностью и высокой технологичностью. Сосна широко применяется для изготовления несущих конструкций, оконных рам, дверей, а также в декоративных целях. Благодаря высокому содержанию смол сосна обладает естественной защитой от биопоражений. Кроме того, она отличается хорошей устойчивостью к перепадам температур и влажности, что позволяет использовать её в различных климатических условиях [11, 14].

Древесина ели легче и мягче сосны, что облегчает её обработку. Ель часто используется в каркасном домостроении, для изготовления строительных панелей и элементов интерьера. Ель обладает хорошими акустическими свойствами, что делает её востребованной в строительстве концертных залов и

студий. Кроме того, ель отличается однородной структурой и светлым цветом, что ценится в отделочных работах [11, 12].

Лиственница отличается высокой плотностью и исключительной стойкостью к влаге и гниению. Эти свойства делают лиственницу идеальным материалом для наружных конструкций, таких как фасады, террасы, мосты и гидротехнические сооружения. Лиственница также широко применяется в судостроении и производстве паркета. Высокое содержание смол обеспечивает ей долговечность и устойчивость к биологическим воздействиям, что особенно важно в условиях повышенной влажности и агрессивной среды [13, 14].

Сосна и ель обладают относительно низкой плотностью (около 400–550 кг/м<sup>3</sup> у сосны и 350–450 кг/м<sup>3</sup> у ели), что облегчает их обработку и монтаж. При этом древесина этих пород обладает высокой упругостью и прочностью на изгиб, что делает их пригодными для несущих конструкций. Лиственница, напротив, отличается более высокой плотностью (около 650–750 кг/м<sup>3</sup>), что связано с большим содержанием смол и плотной структурой клеточных стенок. Это обеспечивает ей высокую стойкость к влаге и биологическим повреждениям, что особенно важно для наружных конструкций и эксплуатации в агрессивных условиях [11, 14–16].

Кроме того, хвойная древесина содержит природные смолы и эфирные масла, обладающие антисептическими свойствами. Это снижает риск поражения грибами, плесенью и насекомыми, увеличивая срок службы изделий [3, 12, 13].

### **1.1.1 Преимущества древесины в строительстве**

Использование древесины обусловлено рядом ключевых преимуществ, которые делают эти материалы особенно востребованными в современном строительстве:

1. Древесина – природный и возобновляемый ресурс, не выделяющий вредных веществ в окружающую среду. В условиях растущего внимания к экологической безопасности и здоровью человека это становится важным фактором выбора строительных материалов, особенно для жилых и общественных зданий. Кроме того, древесина обладает способностью «дышать»,



регулируя влажность в помещении, что способствует созданию комфортного микроклимата [13].

2. Древесина отличается высокой прочностью при относительно низкой плотности. Это облегчает транспортировку и монтаж конструкций, снижая затраты на строительство и повышая мобильность строительных процессов. Лёгкость материала также уменьшает нагрузку на фундамент и несущие конструкции зданий [11, 17].

3. Благодаря пористой структуре древесина обладает низкой теплопроводностью, что позволяет использовать её как естественный теплоизолятор. Это способствует снижению энергозатрат на отопление и кондиционирование зданий, повышая их энергоэффективность. Особенно важно это в регионах с холодным климатом, где древесина широко применяется для строительства жилых домов и общественных зданий [13].

4. Особенности химического состава хвойной древесины, в частности высокое содержание смол и эфирных масел, обеспечивают естественную защиту от влаги, грибков, плесени и насекомых. Лиственница, благодаря высокой плотности и смолистости, особенно устойчива к воздействию влаги и биопоражений, что делает её идеальным материалом для наружных конструкций и объектов с повышенной влажностью [12, 14].

5. Древесина легко поддаётся механической обработке: распиловке, строганию, шлифовке, фрезеровке. Это позволяет создавать изделия сложной формы с высокой точностью, что важно для современных архитектурных и инженерных решений. Кроме того, древесина хорошо воспринимает различные виды отделки: окраску, лакирование, пропитку защитными составами [7, 13].

6. Доступность. Древесные, а особенно хвойные породы, широко распространены в России, Европе и Северной Америке, что обеспечивает стабильные поставки качественного сырья по относительно низкой цене. Это делает древесину конкурентоспособным материалом по сравнению с металлом, бетоном и другими современными строительными материалами [11, 15, 16].

### 1.1.2 Основные виды строительных изделий из древесины

В строительстве древесина используется для изготовления широкого спектра изделий, которые находят применение в различных конструктивных и декоративных элементах зданий.

**Кругляк и брус.** Кругляк – это цельное бревно, используемое преимущественно в срубном домостроении. Он сохраняет естественную форму и структуру древесины, что придаёт зданиям особую прочность и эстетическую привлекательность. Брус – это пиломатериал прямоугольного сечения, который может быть цельным или клееным. Клееный брус отличается повышенной стабильностью размеров и прочностью, что позволяет использовать его в несущих конструкциях жилых и общественных зданий. Брус широко применяется в каркасном строительстве, а также для изготовления балок, стоек и перекрытий [13, 15, 16].

**Пиломатериалы.** Доски, рейки, бруски и шпунтованные панели из хвойной древесины используются для обшивки стен, полов, потолков, изготовления дверных и оконных рам, плинтусов и декоративных элементов. Благодаря хорошей обработке и отделке такие изделия обеспечивают высокое качество внутренней отделки помещений, а также долговечность и эстетическую привлекательность конструкций [7, 13].

**Клееные изделия.** Клееный брус и панели из нескольких слоёв древесины, склеенных под прессом, обладают улучшенными прочностными характеристиками и устойчивостью к деформациям. Это позволяет создавать крупномасштабные несущие конструкции, включая балки перекрытий, колонны и арки, которые выдерживают значительные нагрузки и имеют длительный срок службы [11, 14].

**Фанера и древесноволокнистые плиты (ДВП, ДСП).** Эти материалы изготавливаются из древесных волокон и используются в строительстве для внутренней отделки, изготовления мебели, а также в качестве конструктивных элементов. Они обладают стабильными размерами, высокой прочностью и хорошей адгезией к отделочным материалам [13].

**Строительные панели и блоки.** Комбинированные изделия с утеплителем применяются для энергоэффективного строительства. Панели на основе хвойной древесины обеспечивают хорошую теплоизоляцию, звукоизоляцию и устойчивость к механическим воздействиям [13].

**Специальные изделия.** Хвойная древесина используется для изготовления лестниц, перил, декоративных элементов фасадов, а также в производстве оконных и дверных блоков с повышенными требованиями к прочности и эстетике [7, 13].

### 1.1.3 Строительные конструкции из древесины

Древесина хвойных пород широко применяется для изготовления различных строительных конструкций, которые можно классифицировать по функциональному назначению и способу изготовления.

**Несущие конструкции.** Хвойная древесина используется для создания несущих элементов зданий – каркасов, балок, колонн, стропил и перекрытий. Благодаря высокому отношению прочности к массе, древесина позволяет создавать лёгкие, но при этом прочные конструкции. Каркасные дома, построенные из сосны или ели, обеспечивают хорошую теплоизоляцию и устойчивость к нагрузкам [17–19].

Клееный брус и клееные балки из хвойной древесины обладают повышенной прочностью и стабильностью размеров, что позволяет использовать их в сложных инженерных решениях – мостах, спортивных сооружениях, многоэтажных деревянных зданиях. Лиственница благодаря высокой плотности и влагостойкости часто применяется в конструкциях, эксплуатируемых в условиях повышенной влажности. Это фасады, террасы, пирсы [20, 21].

**Оболочечные и панельные конструкции.** Панели из древесноволокнистых плит, фанеры и шпунтованных досок из хвойной древесины используются для ограждающих конструкций – стен, перекрытий, кровель. Они обеспечивают необходимую жёсткость и теплоизоляцию, а также снижают вес здания.

В каркасно-панельном домостроении панели из сосны и ели являются основой для быстрого возведения зданий с минимальными затратами времени и ресурсов [19].

**Специальные и временные конструкции.** Также хвойная древесина востребована в изготовлении временных и специальных конструкций – опалубки, лесов, транспортных подмостей, что связано с её доступностью и удобством в работе [11, 22].

## **1.2 Строение древесины, ее особенности и свойства**

Древесина является одним из важнейших природных материалов, широко используемых в строительстве и других отраслях благодаря своим уникальным свойствам, возобновляемости и экологической чистоте [23, 24]. Хвойная древесина отличается однородной структурой, высокой механической прочностью, хорошей технологичностью обработки и способностью к длительной эксплуатации в различных климатических условиях [25].

Основу химического состава древесины наиболее популярных в строительстве пород: сосны, ели и лиственницы – составляют целлюлоза (40–45 %), лигнин (27–32 %), гемицеллюлозы (15–25 %), а также экстрактивные и минеральные вещества [26, 27]. Процентное соотношение компонентов для рассматриваемых в работе пород древесины представлено в таблице 1.1. В отличие от лиственных пород, хвойная древесина содержит больше лигнина и гексозанов, что обеспечивает ей большую прочность и устойчивость к биологическим воздействиям. Для лиственницы характерно особенно высокое содержание арабиногалактана среди гемицеллюлоз, а для сосны – большое количество смолистых веществ, придающих древесине специфический запах и дополнительную защиту от гниения [28].

Органическая часть абсолютно сухой древесины содержит в среднем 49–50 % углерода, 43–44 % кислорода, около 6 % водорода и 0,1–0,3 % азота. Минеральные вещества составляют 0,1–1 % массы, среди которых преобладают кальций, калий, магний, а также натрий, фосфор и сера. В составе золы

преобладают нерастворимые соли кальция, а также растворимые соли калия и натрия [3].

Строение хвойной древесины определяется преобладанием трахеид – вытянутых клеток, отвечающих за механическую прочность и транспорт воды. В отличие от лиственных пород, в которых присутствуют сосуды, хвойные породы имеют более однородную анатомическую структуру, что положительно сказывается на технологичности обработки и прочности вдоль волокон. Кроме трахеид, в древесине встречаются лучевые клетки, участвующие в радиальном транспорте питательных веществ.

Таблица 1.1 – Химический состав хвойных пород древесины

| Компоненты                                                                                          | Содержание компонента в различных породах древесины, % |         |             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------|-------------|
|                                                                                                     | Сосна                                                  | Ель     | Лиственница |
| Целлюлоза                                                                                           | 40–49                                                  | 42–51   | 34–36       |
| Пентозаны                                                                                           | 5,9–11                                                 | 5,1–11  | 5,2–8,8     |
| Гексозаны*                                                                                          | 22,8–23                                                | 12–12,5 | 19,2–22,6   |
| Уроновые кислоты                                                                                    | 2,6–4,0                                                | 2,1–4,1 | 2,9–3,9     |
| Лигнин**                                                                                            | 25–29                                                  | 26–29   | 25–27       |
| Вещества, экстрагируемые:<br>а) диэтиловым эфиром                                                   | 1,8–4,6                                                | 0,9–2,5 | 1,1         |
| б) горячей водой                                                                                    | 2,1–4,6                                                | 1,5–2,8 | 12–23       |
| Зола                                                                                                | 0,2–0,4                                                | 0,2–0,4 | 0,1–0,3     |
| *Ориентировочные данные                                                                             |                                                        |         |             |
| **Кислотонерастворимый (растворимый составляет у хвойных пород 0,5–1,0 %, у лиственных – 2,5–7,0 %) |                                                        |         |             |

Целлюлоза – главный структурный компонент клеточных стенок, представляющий собой линейный полисахарид, состоящий из глюкозных остатков. Макромолекула целлюлозы может достигать длины 3–5 мкм и степени полимеризации 5000–10000. Благодаря высокой степени кристалличности (до 60 % у заболонной древесины), целлюлоза придаёт древесине высокую прочность и устойчивость к химическим воздействиям [32].

Гемицеллюлозы – группа полисахаридов с меньшей молекулярной массой, чем у целлюлозы, и большей растворимостью в щелочах и кислотах [33]. В

хвойных породах преобладают гексозаны, а в лиственнице – арабиногалактан. Гемицеллюлозы обеспечивают эластичность клеточных стенок и участвуют в формировании водного баланса древесины.

Лигнин – высокомолекулярный полимер ароматической природы, обладающий нерегулярным строением. В хвойных породах лигнин отличается более высокой полидисперсностью и молекулярной массой, чем у лиственных. Лигнин придаёт древесине жёсткость, устойчивость к гниению и химическим воздействиям, а также играет важную роль в связывании целлюлозных и гемицеллюлозных компонентов [34].

Экстрактивные вещества хвойных пород включают смолы, жирные кислоты, эфирные масла, дубильные вещества и красящие соединения. Сосна и лиственница особенно богаты смолами и терпенами, что придаёт древесине характерный запах, а также повышает её стойкость к биологическим разрушителям.

Далее рассмотрим особенности древесины, которые необходимо учитывать при ее использовании в качестве строительного материала.

Древесина хвойных пород обладает выраженной анизотропией: её свойства различаются в продольном, радиальном и тангенциальном направлениях [29]. Прочность на изгиб и сжатие максимальна вдоль волокон, что особенно важно для строительных конструкций. Плотность древесины варьируется: у сосны – 500–550 кг/м<sup>3</sup>, у ели – 400–450 кг/м<sup>3</sup>, у лиственницы – до 700 кг/м<sup>3</sup>. Лиственница отличается самой высокой плотностью и твёрдостью среди отечественных хвойных пород, что делает её незаменимой для наружных и ответственных конструкций [35].

Механические свойства древесины зависят от влажности: при увеличении влажности прочность снижается, особенно при влажности выше предела гигроскопичности (около 30 %). При повышенной влажности древесина становится более подверженной гниению и поражению грибами, особенно у сосны и ели. Лиственница, благодаря высокому содержанию смол, более устойчива к биологическим воздействиям [36].

Древесина – материал горючий, что требует применения специальных мер защиты (антипирены, огнезащитные пропитки) при использовании в строительстве. При сжигании древесины остаётся зола, в составе которой преобладают кальций, калий, магний и другие минеральные элементы [30, 31].

Древесина хвойных пород подвержена воздействию плесени и дереворазрушающих грибов при высокой влажности (выше 18 %) и температуре от 5 до 45 °С. Наиболее опасны дереворазрушающие грибы, вызывающие гниение и снижение прочности материала. Плесень чаще поражает заболонь и проявляется в виде пятен различного цвета, но обычно не разрушает клеточные стенки [28].

Наличие сучков, косослоя, свилеватости и других пороков снижает прочность древесины, однако при использовании в отделке такие дефекты могут придавать материалу декоративность. Неоднородность строения по высоте и радиусу ствола, а также анизотропия и способность к загниванию требуют применения комплексных мер защиты и правильного подбора древесины для конкретных строительных задач.

### **1.3 Методы и виды защиты древесины от воздействия микроорганизмов, возгорания, разрушения**

#### **1.3.1 Существующие методы защиты деревянных изделий**

Под защитой древесины следует понимать совокупность мероприятий по сохранению и улучшению ее эксплуатационных свойств (прежде всего, биоогнестойкости, гидрофобности, формоизменчивости, стабилизации эксплуатационных показателей и т. п.) [37–41].

Для защиты деревянных конструкций применяют конструктивные мероприятия и химические методы. Главный источник увлажнения деревянных конструкций – конденсация влаги, поэтому конструктивные мероприятия направлены на исключение увлажнения деревянных конструкций при эксплуатации зданий [42]. Как правило, в области конструкционной защиты древесины ищут простые и доступные меры по устройству либо тепло-, пароизоляции, либо вентиляции, а также обеспечению надежных стыков, защите

от атмосферных воздействий и т. п., направленных на поддержание «сухого» режима.

Химические меры защиты от гниения древесины и поражения ее дереворазрушающими насекомыми – антисептирование и консервирование.

Антисептирование – это поверхностная (на глубину до 1 мм по заболони и 0,5 мм по труднопропитываемой зоне) обработка древесины с целью предохранения ее от поражения биологическими агентами в условиях, исключающих растрескивание древесины и вымывание защитного средства.

Консервирование – это глубокая (более 1 мм по заболони и 0,5 мм по труднопропитываемой зоне) пропитка древесины с целью защиты материала от разрушения на длительное время в условиях возможного вымывания антисептика.

### **1.3.2 Виды защиты древесины**

**Защита от микроорганизмов.** Средства биозащиты (антисептики) помогают избежать разрушений, производимых микроорганизмами: гниения, грибка, плесени. Также эти средства защищают древесину от насекомых-вредителей.

Применение специальных средств поможет сохранить древесину в первоначальном состоянии или как минимум серьезно ограничить распространение грибка и плесени.

**Защита от огня.** Наиболее популярными пропитками, которые помогают предотвращать возгорание, являются антипирены – средства, выполненные на основе соляных растворов (солей кремниевой или борной кислот) с добавками поверхностно-активных веществ. Антипиренами можно покрывать поверхности на различных этапах использования и хранения материалов, а также по нескольким технологиям.

**Защита от влаги.** Немаловажной является защита древесины от влаги. Древесина как материал очень гигроскопична, поэтому во влажных условиях дерево будет набирать влагу извне, что может оказать влияние на механические характеристики, а также стать причиной образования грибов. Чтобы снизить



гигроскопичные показатели, рекомендуется использовать защитные лаки и краски, которые позволят снизить количество поглощаемой влаги.

Также существуют декоративные пропитки, надолго сохраняющие привлекательную и естественную фактуру древесины и придающие ей желаемый оттенок.

В таблице 1.2 представлено сравнение наиболее распространенных методов защиты древесины. К сожалению, покрытия на основе различных лакокрасочных составов не являются долговечными. Наличие напряжений от естественной гигроскопичности древесины, которая проявляется в ее набухании и усыхании в среде с переменной влажностью, является причиной возникновения поверхностных трещин, которые могут привести к разрушению защитного лакокрасочного покрытия, а следовательно, и к снижению гидрофобных свойств и прочности [43]. Использование химической защиты в некоторых случаях может сопровождаться вымыванием защитных веществ, понижает эффективность защиты в целом и оказывает негативное влияние на окружающую среду.

Таблица 1.2 – Наиболее распространенные методы защиты древесины

| Наименование            | Срок службы, лет | Достоинства                                                                                                                                                           | Недостатки                                                                                                                                                   |
|-------------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Лакокрасочные материалы | 2–10             | 1. Эстетика: лаки и краски улучшают внешний вид древесины<br>2. Гидрофобность поверхности<br>3. Простота нанесения                                                    | 1. Только внешняя поверхностная защита<br>2. Покрытие растрескивается и требует частого обновления<br>3. Срок службы зависит от качества покрываемых изделий |
| Масла                   | 2–5              | 1. Декоративные свойства: улучшают цвет и текстуру древесины<br>2. Гидрофобность поверхности<br>3. Проникают глубже лакокрасочных материалов<br>4. Простота нанесения | 1. Требуют частого обновления<br>2. Возможно потемнение древесины, для исправления – только удаление пропитанного слоя                                       |

Продолжение таблицы 1.2

| Наименование                            | Срок службы, лет | Достоинства                                                                                                                   | Недостатки                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Пропитки (антисептики и/или антипирены) | 3–20             | 1. Возможна как поверхностная, так и глубокая пропитка<br>2. Защита от биоразрушения и/или возгорания<br>3. Простота пропитки | 1. При глубокой пропитке требуется специальное оборудование<br>2. Временные затраты<br>3. Возможна токсичность составов (особенно составов с длительной защитой) |
| Термическая модификация                 | До 50            | 1. Улучшение стабильности древесины (снижает коробление)<br>2. Повышение биостойкости<br>3. Экологичность конечного материала | 1. Сравнительно высокая стоимость<br>2. Временные затраты<br>3. Возможно снижение механических свойств                                                           |
| Термическая обработка поверхности       | До 50            | 1. Повышение биостойкости<br>2. Уникальный внешний вид (цветовой градиент)                                                    | 1. Специфичность и небезопасность процесса<br>2. Возможно снижение механических свойств<br>3. Как правило, применяется только для декоративных целей             |

### 1.3.3 Пропитка древесины маслами

Одним из способов защиты древесины является ее обработка маслом. Пропитка может осуществляться как нанесением масла на поверхность, так и выдерживанием древесины в емкости с маслом.

Из масел, наиболее часто применяемых для самостоятельной пропитки дерева, можно отметить: тунговое, тиковое, дегтярное и льняное.

Масла проникают вглубь древесины на 5–7 мм, но при этом не закупоривают поры. Кроме того, подобные пропитки удачно маскируют небольшие дефекты, заполняя их. Они придают дереву водоотталкивающие и износостойкие свойства [44].

Масляные пропитки обладают следующими достоинствами:

- экологичность;

- отличные водоотталкивающие свойства;
- устойчивость к изменению влажности и температуры;
- способность сохранять и подчеркивать естественную текстуру дерева;
- воздухопроницаемость;
- простое нанесение;
- ремонтпригодность.

Однако у пропитки маслом есть и минусы: поверхности достаточно требовательны в уходе. Это касается как мебели, так и полов, потолков, стен. Их нужно пропитывать каждые 3–4 месяца, а затем тщательно полировать. Промасленные поверхности уязвимы перед жиром. Пятна от него хорошо заметны. Повторная обработка их убирает [45].

#### 1.3.4 Термическая обработка древесины

Термическая обработка может вызывать снижение показателей прочности и других физико-механических свойств древесины. При сравнительно непродолжительных воздействиях температуры до 100 °С эти изменения в основном обратимы, т. е. они исчезают при возвращении к начальной температуре древесины. Влияние температуры при разной влажности древесины сосны на ее прочность при сжатии характеризуют данные Н.Л. Леонтьева [46], приведенные в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Влияние термовлажностной среды на прочность древесины сосны при сжатии вдоль и поперек волокон

| Показатели свойств                                      | Температура,<br>°С | Влажность древесины |      |      |      |      |
|---------------------------------------------------------|--------------------|---------------------|------|------|------|------|
|                                                         |                    | 0                   | 15   | 30   | 50   | 100  |
| Предел прочности при сжатии<br>вдоль волокон, МПа       | 20                 | 74,0                | 35,4 | 20,1 | 20,0 | 20,0 |
|                                                         | 50                 | 73,2                | 23,9 | 12,5 | 12,7 | 12,0 |
|                                                         | 100                | 64,4                | 11,4 | 6,3  | 6,0  | 7,3  |
| Предел прочности при сжатии<br>поперек волокон*,<br>МПа | 20                 | 3,7                 | 2,3  | 1,5  | 1,3  | 1,2  |
|                                                         |                    | 7,7                 | 4,1  | 2,2  | 2,1  | 2,0  |
|                                                         | 50                 | 2,5                 | 1,7  | 1,2  | 1,3  | 1,1  |
|                                                         |                    | 5,4                 | 2,8  | 1,3  | 1,4  | 1,4  |
|                                                         | 100                | 2,3                 | 1,5  | 0,8  | 0,6  | 0,6  |
|                                                         |                    | 5,0                 | 1,7  | 0,8  | 0,7  | 0,7  |

\*В числителе приведены данные для радиального сжатия, в знаменателе – для тангенциального

Эти данные показывают, что прочность при сжатии вдоль и поперек волокон понижается как с увеличением температуры, так и с повышением влажности древесины. Одновременное повышение температуры и влажности усиливает снижение прочности древесины.

При достаточно длительном воздействии повышенной температуры (более 50 °C), например при сушке древесины [47, 48], в ней происходят необратимые остаточные изменения, которые зависят не только от уровня температуры, но и от влажности.

Первые исследования Н.Н. Чулицкого [49], проведенные на древесине сосны, ясеня и дуба в абсолютно сухом состоянии, показали, что под действием температуры 80–100 °C в течение 16 сут предел прочности при сжатии вдоль волокон снижается на 5–10 %, а ударная вязкость – на 15–30 % (наибольшее снижение обнаружилось для дуба, наименьшее – для сосны). Снижение происходит главным образом в течение первых 2–4 сут.

Позднее исследования К.Ф. Дьяконова [50] последствий воздействия высоких температур в диапазоне 80–140 °C на механические свойства древесины сосны, лиственницы, березы показали, что механические свойства снижаются с увеличением температуры, продолжительности ее воздействия и влажности древесины.

Таким образом, приведенные выше данные о влиянии термического воздействия на характеристики древесины необходимо учитывать при разработке технологии плазменной обработки древесины.

#### **1.3.4.1 Поверхностная термическая обработка древесины**

Поверхностная термическая обработка проводится с помощью газоздушной горелки или паяльной лампы. Максимальная глубина термического воздействия при этом составляет около 1 мм.

Под воздействием высокой температуры в процессе пиролиза в наружном слое древесины происходит сужение волоконных каналов, закупорка их смолами и продуктами горения, что значительно упрочняет верхний слой древесины и

увеличивает срок её службы. К тому же под воздействием высоких температур погибают все возможные источники гниения.

Разлагается древесный сахар, что делает древесину неаппетитной для жуков-древоточцев и различных вредоносных микроорганизмов. Расплавленная смола закрывает поры материала, благодаря чему он становится менее гигроскопичным.

Более того, обожжённое дерево становится огнеупорным. Под воздействием высоких температур в древесине разрушаются целлюлозные образования, которые при горении образуют легко воспламеняющиеся пиролизные газы.

Соответственно, после температурной обработки дерево становится устойчивым к возгоранию. Поджечь повторно уже обгоревшую доску становится сложнее – слой золы практически невосприимчив к воздействию огня [51].

Промышленным выпуском древесины, обрабатываемой газовыми горелками, занимается, к примеру, компания Leforest OÜ, расположенная в Эстонии г. Таллин [52]. Производитель отмечает невысокую скорость обработки изделий – порядка 6 мин на 4 пог. м. Также, помимо скорости производственного процесса, к недостаткам данной технологии можно отнести относительно низкую температуру, а соответственно – небольшую глубину обработки древесины.

#### **1.3.4.2 Глубокая и полная термическая обработка древесины**

Глубокая термическая обработка выполняется в открытых печах при температуре не более 200–250 °С. Данный способ применяют для обработки материала, бывшего в употреблении. В данном случае глубина обработки не должна превышать 20 мм. После обработки деревянная поверхность приобретает уникальный внешний вид. Конечный цвет материала зависит от времени воздействия открытого пламени. Этот способ позволяет получить угольно-черную или графитовую древесину. Уникальный внешний вид является не

только преимуществом данного способа, но и недостатком, поскольку спрос на такую древесину крайне мал.

Полная термическая обработка осуществляется при температурах не менее 400 °С. Достичь таких показателей можно только в специальных вакуумных печах. Дерево после такой обработки часто используют для изготовления мебели и очень редко в строительстве. Это обусловлено тем, что даже самая прочная древесная порода меняет свойства и значительно уменьшается в размерах от такой температуры [53].

#### **1.3.4.3 Термическая модификация древесины**

Одним из методов модификации свойств древесины является ее термическая обработка. Начало изучения метода термической обработки древесины было положено в 30–40-е гг. XX в. учеными из Германии и США [41]. Основоположником промышленного выпуска термомодифицированной древесины считается Финляндия. В результате проведенных исследований выяснилось, что воздействие на древесину высокой температуры приводит к необратимым изменениям её биологического состава на молекулярном уровне, что существенно улучшает ее свойства и эксплуатационные характеристики [54].

Все известные сегодня способы производства термомодифицированной древесины можно разделить на четыре группы:

1. Одноступенчатая обработка водяным паром. При этом методе используются агрегаты наподобие сушильных камер, в которые после загрузки материала подается пар. При этом содержание кислорода в воздухе этих установок уменьшается до 3,5 %, что при температурах 150–200 °С замедляет оксидацию (горение) древесины. При обработке предварительно высушенной древесины общая продолжительность процесса составляет около трех дней. Также возможна обработка и сырого материала, но в этом случае продолжительность процесса будет больше с учетом времени собственно сушки.

2. Многоступенчатая обработка. Влажная древесина в течение 4–5 ч подвергается обработке насыщенным паром или водой (процесс варки) при температуре 150–200 °С. Сам процесс происходит в герметичной емкости под

давлением до 1,6 МПа. После этого древесина высушивается в камере в течение 3–4 дней до конечной влажности (около 10 %). Во время фазы твердения древесину еще раз нагревают до температуры 170–190 °С в течение 14–16 ч.

3. Обработка в горячем масле. Сухая древесина погружается в растительное масло и медленно нагревается до температуры 180–220 °С. При этом дополнительно происходит поглощение масла древесиной, которое зависит от размеров материала и может регулироваться. Длительность процесса составляет примерно сутки.

4. Обработка в среде инертных газов. Этот процесс известен как ретификация. В этом случае вместо водяного пара или масла древесину обрабатывают в среде азота с содержанием кислорода до 2 % при повышенном давлении.

В процессе термомодифицирования происходят изменения химического состава древесины, которые в результате положительно влияют на показатели равновесной влажности, твердости древесины при незначительном уменьшении прочности, существенно снижается объем материала, чувствительного к грибку, что приводит к повышению показателей биостойкости. С разложением гемицеллюлозы также снижается концентрация водопоглощающих гидроксильных групп, что приводит к улучшению показателей формоустойчивости обработанной древесины [55–58].

#### **1.4 Возможность использования низкотемпературной плазмы для изменения свойств древесины, применяемой в строительных конструкциях**

Плазма представляет собой полностью или частично ионизированный газ, суммарный заряд которого равен или стремится к нулю. В настоящее время плазма активно используется практически во всех отраслях промышленности и народного хозяйства: в медицине, машиностроении, приборостроении, строительстве, науке и т. д. [59].

Первые технические применения плазмы датируются серединой XIX века [60], но большого развития для модификации поверхности изделий получили только с середины XX века. Впервые плазменные технологии стали

использоваться в приборостроении. Промышленная плазменная обработка началась с применения свойств ионизированного газа для распыления всевозможных материалов и нанесения их на подкладки, а также для травления каналов с целью получения микросхем [61]. В зависимости от некоторых особенностей устройства технологических установок различают плазмохимическое травление, ионно-химическое, а также ионно-лучевое. С течением времени область применения ионов газа расширялась. И сегодня плазменная обработка (в том или ином виде) применяется для создания материалов с особыми свойствами (жаростойкость, твердость поверхности, коррозионная стойкость и т. д.), для эффективной резки по металлу, для сваривания, для полирования поверхностей и устранения микронеровностей [62, 63].

Работы по исследованию энергии плазмы в области строительных материалов проводятся как отечественными, так и зарубежными специалистами.

Первые опыты по созданию покрытий на строительных изделиях с помощью плазматрона путем оплавления были предприняты в 1963 г. Н.Г. Корсаком [64]. Установлено, что скорость процесса оплавления поверхностей с помощью плазматрона в 2,5–3 раза выше по сравнению с газопламенной обработкой бетона, пенобетона и кирпича.

А.С. Быковым и др. [65] разработан способ отделки облицовочных изделий с использованием низкотемпературной плазмы.

Г. Г. Волокитиным и др. [66] предложен способ получения защитно-декоративного покрытия на силикатных изделиях с помощью оплавления плазмой. А в работах [67, 68] рассмотрены перспективы применения плазменной обработки для строительных материалов.

В работах В.К. Козловой и Г.А. Куликовой [69, 70] описана технология создания защитно-декоративного покрытия бетона с помощью энергии плазмы.

Энергия плазмы также применяется и для обработки древесины. В исследованиях [71–74] рассмотрено влияние высокочастотной плазмы на свойства поверхности древесных материалов. Выявлено, что при плазменной



обработке смачиваемость поверхности образцов увеличилась, улучшилась адгезия поверхности. Полученные результаты актуальны в области производства клееных деревянных конструкций, а также в области создания защитных покрытий на поверхности древесины.

В работах [75, 76] авторами проведено исследование методов и предложено изобретение, позволяющее производить обработку древесины, используемой для производства музыкальных инструментов (верхние и нижние деки корпуса скрипки, альты, гитары и т. п.). В предлагаемом способе деревянная заготовка детали музыкального инструмента проходит стадии вакуумирования с последующей обработкой мономером и его полимеризации, причем обработку проводят в плазме тлеющего разряда. Способ позволяет улучшить резонансные характеристики древесины и придать ей водоотталкивающие свойства.

В работах [77–80] авторами предложено использовать плазменную обработку для создания защитно-декоративного покрытия на поверхности деревянных образцов.

Изучив результаты проведенных исследований, можно сделать вывод, что применение среды низкотемпературной плазмы может способствовать изменению свойств поверхности древесины. Влияние воздействия энергии плазмы на свойства древесины на данный момент изучено слабо. Учитывая значительное термическое воздействие на обрабатываемые изделия, можно модифицировать механические свойства древесины, как при создании термомодифицированной древесины. Также стоит отметить основные преимущества потока плазмы для обработки материалов по сравнению с электронно-импульсным пучком и лазерным пучком, а именно ширина плазменного потока в сочетании с удельным тепловым потоком позволяет равномерно обрабатывать изделия со скоростью порядка 40–50 м<sup>2</sup>/ч; плазменная обработка не требует вакуумных камер и сложных систем фокусировки, проста при эксплуатации и при обслуживании/ремонте.

## **Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования.**

1. Одним из строительных материалов, представляющим интерес ввиду его характеристик и доступности сырья, является древесина, главным образом хвойных пород.

2. Растительная природа древесины определяет необходимость ее защиты от неблагоприятных факторов. Одним из путей решения этой задачи, с целью повышения долговечности и надежности материалов из древесины при сохранении их экологичности, является термическая обработка. Определено повышение срока службы древесных материалов после термической обработки, однако механизм протекающих в древесине изменений до настоящего времени полностью не изучен.

3. Основными недостатками применения известных методов термической обработки древесины являются значительная себестоимость и длительность процесса. Решение изложенных проблем позволило бы получить доступный и привлекательный с точки зрения эксплуатационных характеристик для конечного потребителя продукт.

4. Современные исследования показывают, что одним из перспективных термических методов обработки материалов является воздействие на поверхность потоком низкотемпературной плазмы. Учитывая эффект повышения стойкости к неблагоприятным факторам у керамических материалов и бетонов, а также эстетический эффект, такой способ обработки может быть эффективен и для повышения стойкости изделий из древесины.

5. Влияние воздействия потоком низкотемпературной плазмы на свойства древесины изучено слабо, поэтому актуальным является проведение комплексных исследований влияния плазменной обработки на свойства древесины, в том числе и с целью ее дальнейшего использования в качестве строительного материала.

Целью диссертационной работы является обеспечение стойкости изделий из древесины хвойных пород путем модификации приповерхностного слоя древесины посредством обработки потоком низкотемпературной плазмы.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

1. Исследование физико-химических процессов, протекающих в приповерхностном слое древесины при воздействии потоком низкотемпературной плазмы и их влияния на структурные и физико-механические свойства поверхности древесины;
2. Численный расчет распределения температурных полей в древесине при воздействии потоком низкотемпературной плазмы и валидация полученных данных с экспериментальными результатами;
3. Разработка экспериментального стенда для обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы;
4. Разработка технологии обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы и установление критериев качества получаемого на древесине покрытия

## ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ РАБОТЫ

Современные исследования в области модификации древесины требуют комплексного подхода, включающего детальную характеристику исходных материалов, обоснованный выбор методов исследования и строгую методологию экспериментальной работы. Качество и воспроизводимость результатов напрямую зависят от точности описания свойств исследуемых образцов и применяемых методик анализа.

### 2.1 Свойства исследуемой древесины хвойных пород

Древесина хвойных пород широко применяется в строительстве благодаря доступности, хорошим механическим характеристикам и относительной простоте обработки. Однако ее природные свойства не всегда соответствуют требованиям эксплуатации в агрессивных условиях, что обуславливает необходимость модификации и защиты. Основными объектами исследования в данной работе являются сосна (*Pinus sylvestris*), ель (*Picea abies*) и лиственница (*Larix*), как наиболее распространенные хвойные породы, используемые в строительных конструкциях. Образцы отбирались из зрелой части ствола (возраст деревьев – 80–100 лет, зона заготовки – Томская область). Образцы были вырезаны в соответствии с требованиями ГОСТ 16483.0–89 «Древесина. Общие требования к физико-механическим испытаниям». В таблицах 2.1, 2.2 представлены характеристики исследуемой древесины.

Таблица 2.1 – Сравнительная таблица характеристик исследуемой древесины

| Параметр                                           | Сосна   | Ель     | Лиственница | Метод определения |
|----------------------------------------------------|---------|---------|-------------|-------------------|
| Плотность (при 12%-й влажности), кг/м <sup>3</sup> | 480–520 | 410–450 | 550–650     | ГОСТ 16483.1–84   |
| Влажность (начальная), %                           | 8–10    | 8–10    | 8–12        | ГОСТ 16588–91     |
| Прочность при сжатии вдоль волокон, МПа            | 40–45   | 35–40   | 48–55       | ГОСТ 16483.10–73  |

Продолжение таблицы 2.1

| Параметр                              | Сосна   | Ель     | Лиственница | Метод определения      |
|---------------------------------------|---------|---------|-------------|------------------------|
| Прочность при статическом изгибе, МПа | 70–80   | 60–70   | 85–100      | ГОСТ 16483.3–84        |
| Модуль упругости при изгибе, ГПа      | 9–11    | 8–10    | 11–14       | ГОСТ 16483.2–84        |
| Твердость по Бринеллю (торцовая), МПа | 25–30   | 20–25   | 30–35       | ГОСТ 16483.17–81       |
| Содержание смолы, %                   | 3,5–5,0 | 0,5–1,5 | 1,5–3,0     | Экстракция по Сокслету |
| Водопоглощение за 24 ч, %             | 25–30   | 30–35   | 20–25       | ГОСТ 16483.20–72       |
| Размер пор (средний), мкм             | 50–100  | 40–80   | 30–60       | СЭМ                    |

Таблица 2.2 – Био- и огнестойкость исследуемой древесины

| Параметр                      | Сосна   | Ель     | Лиственница |
|-------------------------------|---------|---------|-------------|
| Класс стойкости к грибам      | IV      | IV      | III–IV      |
| Температура воспламенения, °C | 270–300 | 270–300 | 280–310     |
| Скорость обугливания, мм/мин  | 0,7–0,9 | 0,7–0,9 | 0,6–0,8     |

Проведя анализ свойств исследуемой древесины хвойных пород, можно сформулировать ключевые выводы:

1. Сосна занимает промежуточное положение, но выделяется высоким содержанием смолы.
2. Ель – наименее плотная и наиболее гигроскопичная, но с однородной структурой.
3. Лиственница превосходит сосну и ель по прочности, плотности и устойчивости к влаге.

Представленные данные актуальны для стандартных условий (влажность 12 %, температура +20 °C).

Данные параметры служат базой для оценки влияния низкотемпературной плазменной обработки на структуру и свойства древесины в последующих главах. Контрольные образцы без обработки использовались для сравнительного анализа в ходе механических, биологических и огневых испытаний.

## **2.2 Особенности конструкции стенда для плазменной обработки древесины**

Возможность применения плазменных генераторов различного типа в промышленности уже много лет исследуется отечественными и зарубежными научными коллективами. Основные требования к оборудованию для промышленного использования: большой ресурс, стабильность, простота управления процессом и ремонтпригодность.

С учетом предъявляемых к оборудованию требований разработано устройство, предназначенное для обработки поверхности изделий из древесины потоком низкотемпературной плазмы [81]. На рисунке 2.1 представлена схема электроплазменного устройства. Устройство включает в себя основные узлы: источник питания 1, катодный узел 2, анодный узел 3, камеру концентрации тепловых потоков 4 и направляющие для подачи обрабатываемых изделий 5.

При запуске источника питания 1 и возбуждения рабочей дуги из катодного узла 2 с привязкой дуги на внутреннюю поверхность анодного узла 3 происходит формирование плазменного потока 7. Подача обрабатываемых изделий 6 осуществляется по направляющим 5 с помощью вращающихся роликов. Скорость подачи 6 обрабатываемых изделий возможно регулировать за счет изменения скорости вращения роликов. В процессе прохождения поверхности обрабатываемых изделий 6 в непосредственной близости к плазменному потоку 7 происходит нагрев древесины, сопровождающийся физико-химическими реакциями, изменяющими свойства поверхности древесины. Производительность, а также параметры обработанной поверхности

регулируются расходом плазмообразующего газа, тепловой мощностью плазменной дуги, а также скоростью подачи обрабатываемых изделий.

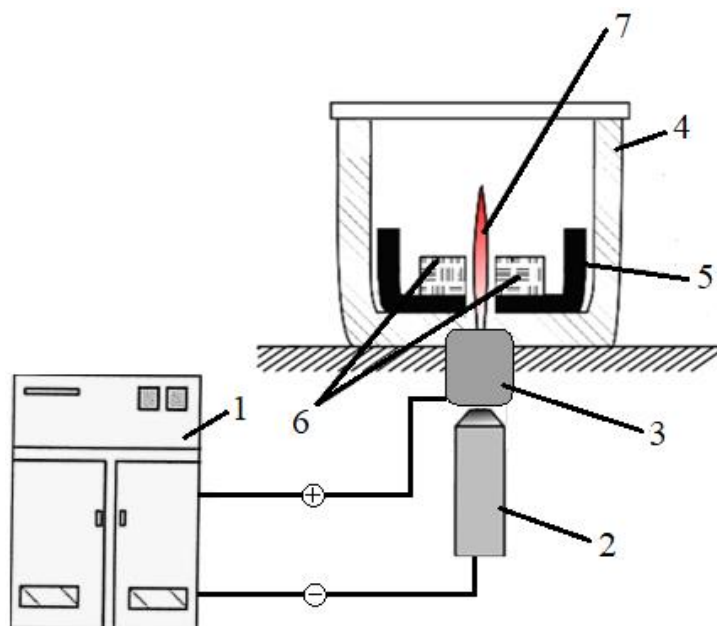


Рисунок 2.1 – Схема стенда для обработки поверхности изделий из древесины потоком низкотемпературной плазмы: 1 – источник питания; 2 – плазмотрон; 3 – анодный узел; 4 – камера концентрации тепловых потоков; 5 – направляющие для подачи обрабатываемых изделий; 6 – обрабатываемые изделия; 7 – плазменный поток

В качестве катодного узла в представленном устройстве для обработки поверхности изделий из древесины используется плазменный генератор типа ВПР-410 [82] производства НПП «Плазматехкомплект» (г. Екатеринбург). На рисунке 2.2 представлена схема плазмотрона ВПР-410, состоящего из двух основных блоков: распределителя I и катодного блока II. Принцип работы плазменного генератора заключается в преобразовании электрической энергии в тепловую с помощью сжатия электрической дуги постоянного тока.

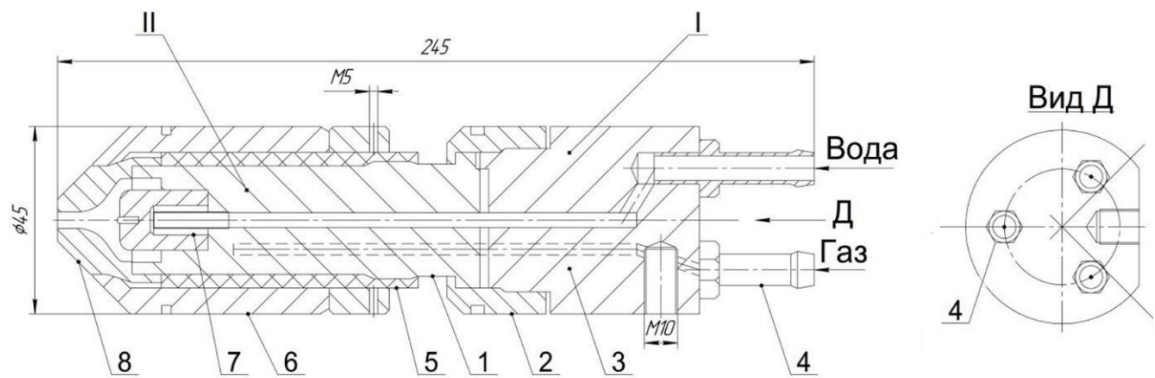


Рисунок 2.2 – Схема плазменного генератора ВПР-410: 1 – электрододержатель; 2 – соединительная гайка; 3 – переходник; 4 – штуцер; 5 – изолятор; 6 – корпус; 7 – сопловая втулка; 8 – сопло

Анодный узел состоит из графитового цилиндра, плотно установленного в медный корпус. Такая конструкция позволяет реализовать жидкостное охлаждение анодного узла, тем самым снизив его износ. Схема сопряжения катодного и анодного узла представлена на рисунке 2.3.

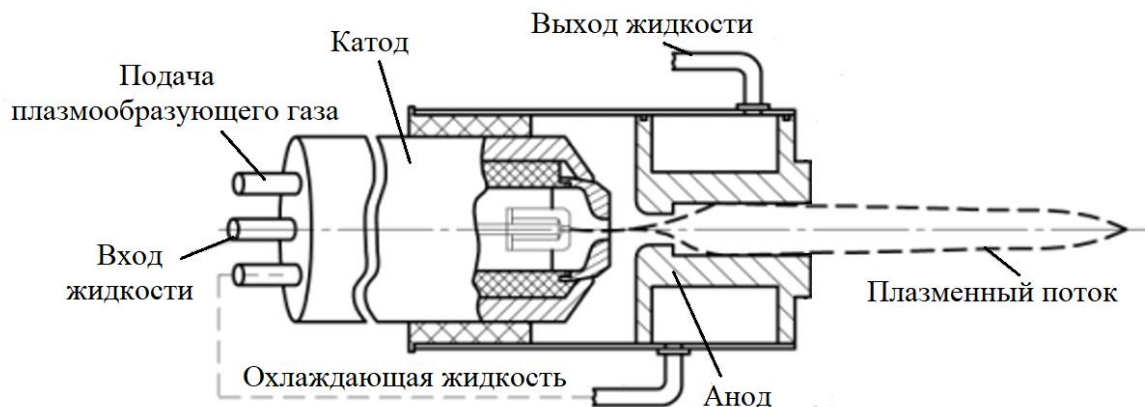


Рисунок 2.3 – Схема сопряжения катодного и анодного узла

Для повышения коэффициента полезного действия устройство снабжено камерой концентрации тепловых потоков. Для защиты от перегрева стенки камеры имеют водяное охлаждение. А для снижения тепловых потерь внутренняя поверхность стенок камеры покрыта теплоизолирующим материалом.

Представленная схема устройства конструктивно проста и позволяет проводить обработку поверхности изделий из древесины различного размера и пород.



## **2.3 Методы и методики исследований**

Для комплексного изучения влияния низкотемпературной плазмы на свойства древесины хвойных пород использовались современные физико-химические, механические и микроструктурные методы анализа. Выбор методик обусловлен необходимостью оценки изменений на макро-, микро- и наноуровнях, а также определения функциональных характеристик модифицированного материала.

### **2.3.1 Оптическая микроскопия**

Оптическая микроскопия [83] применялась для визуализации изменений поверхности древесины после плазменной обработки. Исследования проводились с использованием микроскопа МБС-100Т Биолаб. Анализировались:

- топография поверхности – выявлялись неровности, микродефекты и зоны термического воздействия;
- микроструктура годичных слоев – оценивались изменения в расположении трахеид, смоляных ходов и паренхимных клеток;
- состояние клеточных стенок – фиксировались утолщения, растрескивания или разрыхление структуры;
- наличие микротрещин – определялась их длина, ширина и ориентация относительно волокон.

### **2.3.2 Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)**

Для детального изучения морфологии поверхности и микроструктуры древесины применялся сканирующий электронный микроскоп Quanta 200 3D с энергодисперсионным спектрометром (EDS) [84]. Метод позволил определить:

- изменение морфологии поверхности – появление пор, канав, обгорелых участков;
- состояние клеточных стенок – степень деструкции целлюлозы и лигнина;
- распределение смолистых веществ – их миграция под воздействием плазмы;

- химический состав поверхности методом энергодисперсионного (EDS) анализа.

### **2.3.3 Определение цвета поверхности**

Цвет поверхности строительного и/или отделочного материала является важным показателем для оценки актуальности его применения с точки зрения дизайна. Самая известная и популярная палитра цветов – RAL [85]. Для определения цвета поверхности изделий из древесины хвойных пород, обработанных потоком низкотемпературной плазмы, и согласования с палитрой RAL использовался колориметр RAL ColorReader [86].

### **2.3.4 Методы механических испытаний**

Для оценки влияния плазменной обработки на прочностные характеристики древесины проводились стандартные механические испытания в соответствии с государственными стандартами. Определение прочности при сжатии вдоль волокон проводилось в соответствии с ГОСТ 16483.10–73 [87]; прочности при изгибе – по ГОСТ 16483.3–84 [88]; прочность при скалывании клеевого соединения оценивалась по ГОСТ 33120–2014 [89].

#### **2.3.4.1 Определение твердости**

Твердость древесины определялась по методу Бринелля, описанному в ГОСТ 9012–59 [90]. Для проведения испытания использовался стальной шарик заданного диаметра, который под действием нагрузки, направленной перпендикулярно поверхности образца, вдавливают в испытуемый материал на протяжении установленного времени (рисунок 2.4). Затем проводят замеры диаметра отпечатка, сформированного на поверхности образца. Зная диаметр отпечатка шарика, можно рассчитать твердость по Бринеллю по методике, описанной в [90].

Для испытаний использовались образцы размером 20×90 мм и длиной 40 мм. Диаметр шарика составлял 5 мм, величина нагрузки и время нагружения принимались согласно нормативному документу и составляли  $F = 245,2$  Н и  $t = 180$  с соответственно. Испытания проводились на машине Instron 3382 [91].

Выбор диаметра шарика и величины нагрузки определялся характером материала, подлежащего исследованию [90].

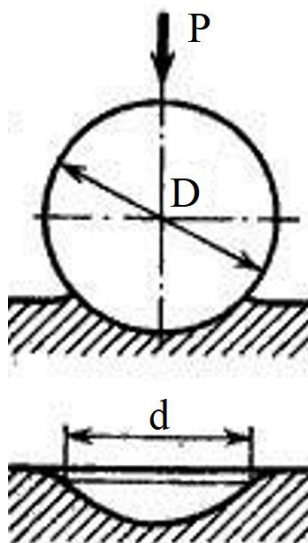


Рисунок 2.4 – Схема определения твердости по Бринеллю

#### 2.3.4.2 Определение износостойкости

Износостойкость определялась посредством измерения профиля следа износа, образованного штифтом испытательного прибора. Ключевые параметры, по которым определялась величина износа, – глубина следа и площадь области износа от штифта. Испытания проводились на приборе CSEM TRIBOMETER [92] с опциональным оборудованием «Измерение глубины следа износа» и «Профилометр». Скорость вращения образца составляла 5 см/с; количество оборотов образца – 1000; нагрузка штифта на образец – 2,0 Н.

Схема проведения испытания представлена на рисунке 2.5. Испытание проводится следующим образом: образец помещается на вращающуюся площадку и закрепляется. Сверху на образец монтируется штифт с грузом на упругом рычаге, соединенном с датчиком силы трения. При вращении дискового образца между штифтом и образцом возникает сила трения, под действием которой происходит износ образца. Износ образца вычисляется из объема изношенного материала при трении со штифтом за определенное время.

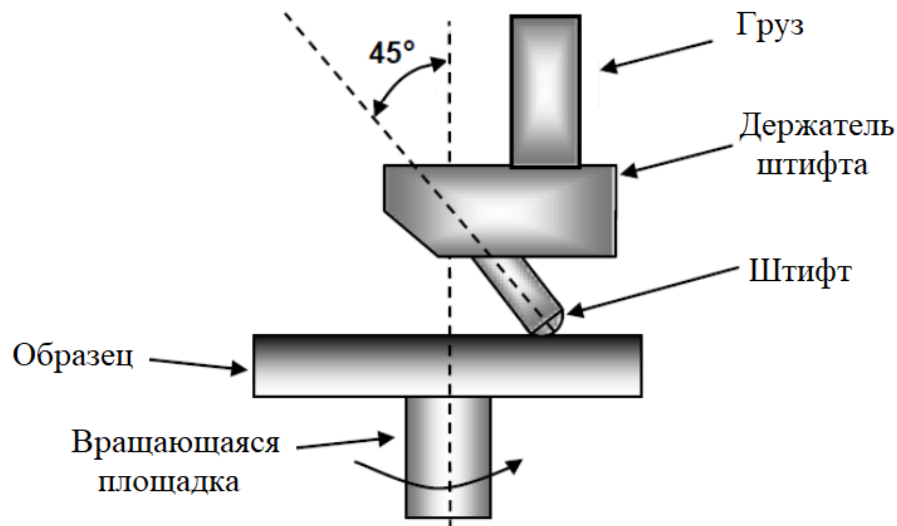


Рисунок 2.5 – Схема проведения испытания на износ (CSEM TRIBOMETR)

По результатам испытаний прибор строил профиль изношенной поверхности и проводил анализ максимальной глубины следа износа и площади следа износа от штифта. Пример профиля поверхности после трибологического испытания с анализом кросс-секции следа износа, полученный по результатам испытаний на приборе CSEM TRIBOMETR, представлен на рисунке 2.6.

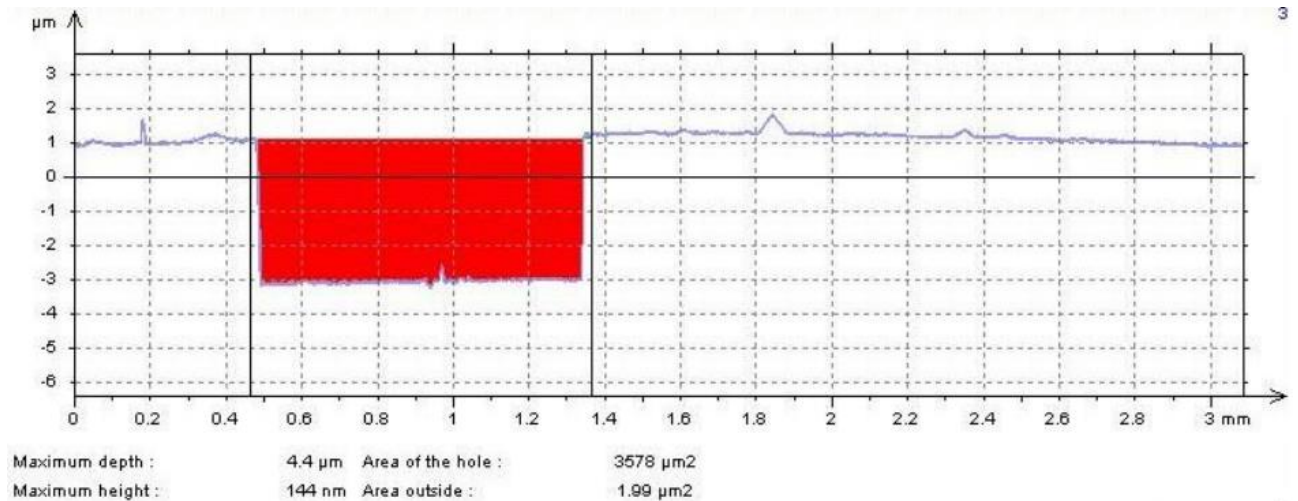


Рисунок 2.6 – Пример профиля поверхности после трибологического испытания с анализом кросс-секции следа износа (CSEM TRIBOMETR).

### 2.3.4.3 Определение предела прочности при сжатии

Испытания выполнялись в соответствии с ГОСТ 16483.10–73 [87] на универсальной испытательной машине Instron 3382. Образцы, изготовленные в форме прямоугольной призмы с основанием 20×20 мм и длиной 30 мм, подвергали сжатию вдоль волокон. Схема нагружения образцов при испытании

на сжатие представлена на рисунке 2.7. Нагрузка осуществлялась до разрушения образцов. Окончанием испытания считался момент разрушения образца. Фиксировали значение максимальной разрушающей нагрузки  $P_{\max}$ , Н, и затем считали предел прочности  $R$ , МПа.

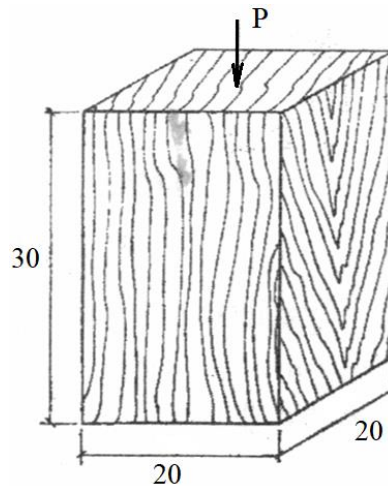


Рисунок 2.7 – Схема нагружения образцов при испытании на сжатие

#### 2.3.4.4 Определение предела прочности при изгибе

Определение предела прочности при статическом изгибе проводили по ГОСТ 16483.3–84 [88] на универсальной испытательной машине Instron 3382. Образцы размером 20×20×300 мм нагружались до разрушения с фиксацией максимальной нагрузки. Схема проведения испытания представлена на рисунке 2.8. Нагрузка осуществлялась до разрушения образцов. Окончанием испытания считался момент разрушения образца. Фиксировали значение максимальной разрушающей нагрузки  $P_{\max}$ , Н, и затем считали предел прочности  $R$ , МПа.

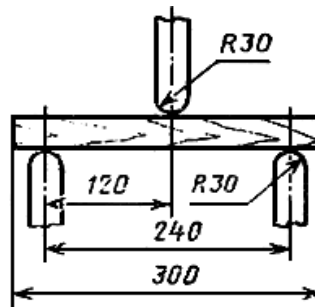


Рисунок 2.8 – Схема проведения испытания по определению предела прочности при изгибе

### 2.3.4.5 Определение прочности клеевого соединения

Прочность адгезионных соединений оценивалась методом скалывания по ГОСТ 33120–2014 [89]. Образцы склеивались по схеме, представленной на рисунке 2.9, выдерживались до полного затвердевания клея и испытывались на сдвиг с фиксацией разрушающего напряжения.

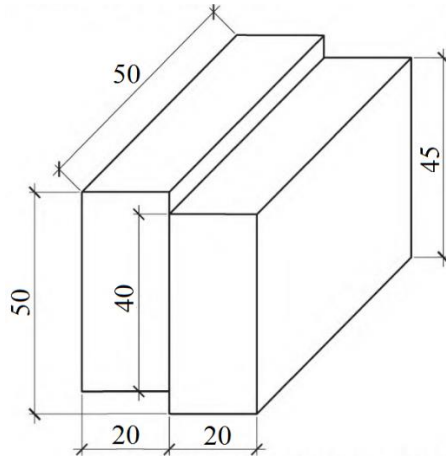


Рисунок 2.9 – Схема склеивания образцов для проведения испытания по определению прочности клеевого соединения

Для склеивания образцов применялась меламино-формальдегидная смола в соответствии с ГОСТ 20850–2014 «Конструкции деревянные клееные несущие. Общие технические условия». Для нагружения образцов использовалась испытательная машина INSTRON 3382, скорость нагружения составляла 0,7 мм/мин. Для передачи нагрузки от испытательной машина на образцы применялось специальное приспособление, изготовленное по ГОСТ 33120–2014, схема которого представлена на рисунке 2.10.

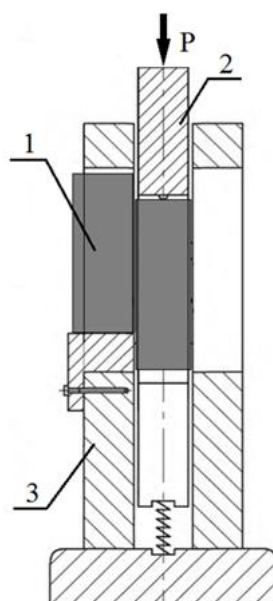


Рисунок 2.10 – Схема приспособления для фиксации образцов и передачи на них нагрузки: 1 – образец; 2 – подвижная часть приспособления, передающая нагрузку на образец; 3 – неподвижная часть приспособления, фиксирующая образец

### 2.3.5 Определение водо- и паропроницаемости поверхности древесины

Водопроницаемость определялась согласно ГОСТ Р 70748–2023 «Конструкции деревянные. Метод определения водопроницаемости защитных покрытий в натуральных условиях». Оценку водопроницаемости проводили по количеству воды, прошедшей через приповерхностный слой за интервал времени на единице поверхности.

Паропроницаемость оценивалась по изменению массы сосуда с водой, накрытого образцом, в соответствии с методикой расчета по ГОСТ 25898–2020 «Материалы и изделия строительные. Методы определения паропроницаемости и сопротивления паропроницанию».

### 2.3.6 Определение биологической стойкости древесины

Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 9.050–2021 «Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов», метод 1. Данный метод позволяет оценить биостойкость материала, основываясь на

интенсивности роста плесневых грибов в условиях отсутствия дополнительного источника питания.

### **2.3.7 Определение огнезащитной эффективности**

В рамках работы проводилось исследование влияния плазменной обработки на огнестойкость по п. 6.4 ГОСТ Р 53292–2009 [93] с регистрацией времени до возгорания.

### **2.3.8 Комплексный термический анализ**

Термическая стабильность модифицированной древесины изучалась с помощью дифференциально-термического анализа (ДТА) и термогравиметрии (ТГ) [94] на приборе DERIVATOGRAPH Q-1500 D. Анализировались:

- температура начала разложения;
- кинетика пиролиза;
- остаточная зольность.

Исследования проводились как в среде инертного газа – азота, так и в среде воздуха.

## **2.4 Методология исследования**

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

Исходя из рабочей гипотезы были выполнены следующие этапы:

- проведен анализ работ, посвященных термической обработке и горению древесины для установления процессов, протекающих при термическом воздействии на древесину, а также выполнено теоретическое численное определение параметров обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы;



- разработан лабораторный стенд для обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы, а также скорректированы ранее полученные теоретические параметры обработки с учетом особенностей лабораторного стенда;

- для дальнейших исследований структуры и свойств обработанной древесины подготовлены и обработаны потоком плазмы образцы из древесины сосны, ели и лиственницы;

- исследованы структура и свойства древесины после плазменной обработки и проведено сравнение с исходной древесиной;

- разработаны оборудование и технологическая схема для промышленной обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии со структурно-методологической схемой, представленной на рисунке 2.11.

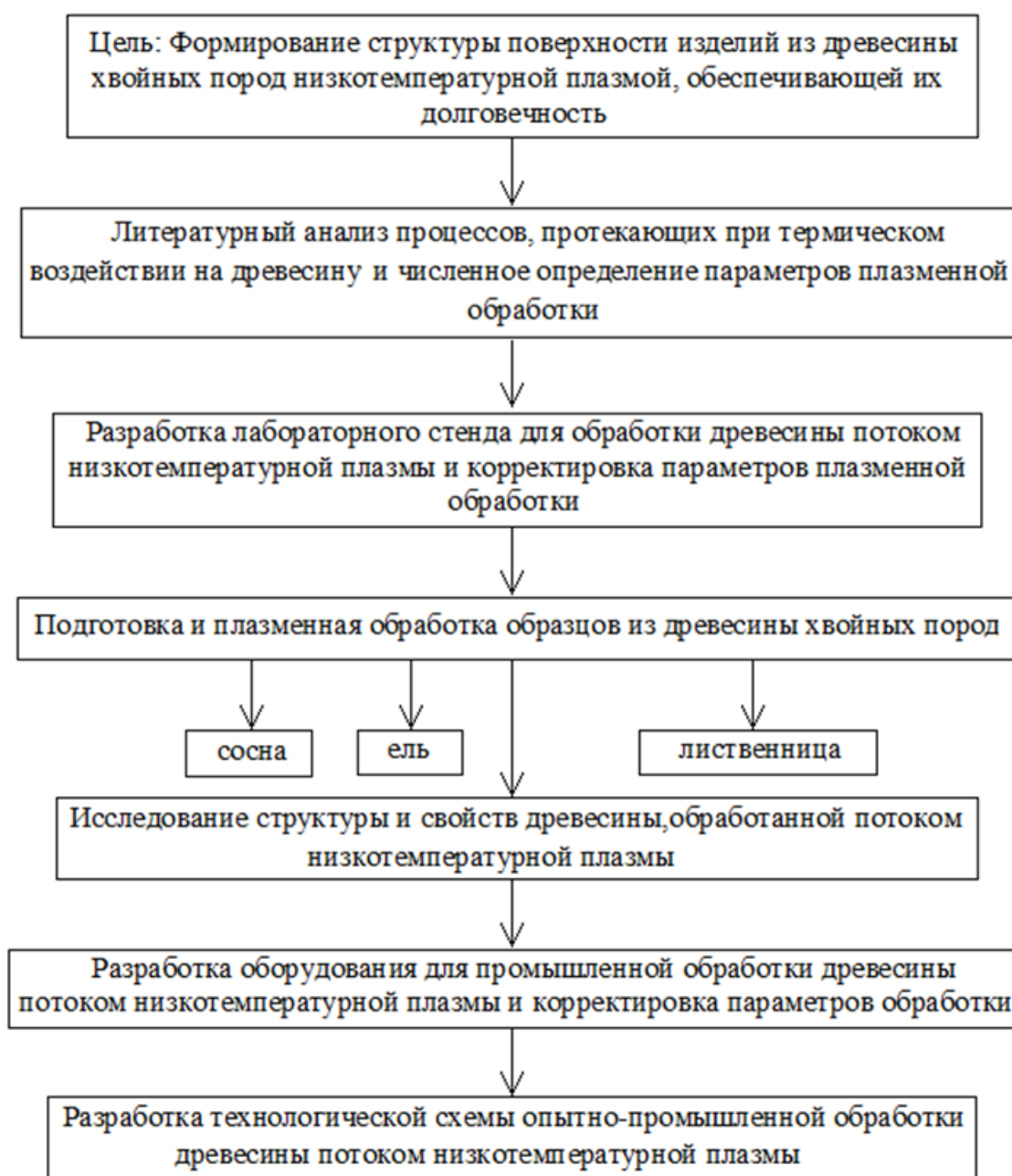


Рисунок 2.11 – Структурно-методологическая схема работы

Проведение работы согласно структурно-методологической схеме позволит получить комплексные данные об изменениях структуры в приповерхностном слое древесины хвойных пород, протекающих при обработке потоком низкотемпературной плазмы и способствующих повышению долговечности строительных изделий из древесины.

### **ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ПОВЕРХНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ**

Древесина – анизотропный материал, свойства которого различаются не только вдоль и поперек волокон, но и от центра ствола к коре и от корней к вершине. Характеристики древесины, представленные в нормативной документации, представляют собой средние результаты статистически обработанных данных. Для ускорения процесса исследования влияния обработки древесины хвойных пород потоком низкотемпературной плазмы необходимо построить математическую модель, с помощью которой возможно рассмотреть процесс плазменной обработки древесины при различных параметрах как плазменной обработки, так и древесины.

#### **3.1 Модель термического разложения древесины**

Нагрев тел, состоящих из дерева, сопровождается следующими физико-химическими процессами [95–97]:

1. При сравнительно небольших температурах идет испарение легколетучих компонентов, прежде всего влаги.
2. При более высоких температурах начинается пиролиз – многостадийный процесс термического разложения твердых компонентов древесины с выделением газов, жидких продуктов пиролиза и образованием коксика – твердого компонента, основу которого составляет углерод (древесный уголь).
3. При дальнейшем нагреве коксик тоже разлагается, образуются летучие продукты и неорганическая зола.

На рисунке 3.1 представлена схема изменения состояния и химического состава древесины при ее нагревании и последующем горении. Все образующиеся на разных стадиях газы фильтруются из глубины тела к его поверхности и выводятся в окружающую среду. Эти процессы сопровождаются поглощением и выделением тепла, в результате чего уменьшается плотность материала и изменяются его теплофизические свойства. Поскольку внутри

древесины не присутствует свободный кислород, то горение происходит только на ее поверхности.



Рисунок 3.1 – Схема изменения агрегатного состояния и химического состава древесины при ее горении. Стрелки обозначают: 1 – подвод тепла в результате излучения, конвекции и теплопроводности; 2 – образование газовой фазы в результате пиролиза древесины; 3 – сушка древесины; 4 – образование твердой фазы в результате пиролиза древесины; 5 – окисление газообразных и дисперсных продуктов пиролиза; 6 – образование пепла; 7 – образование и исчезновение частиц сажи; 8 – образование частиц дыма и их выветривание

Для правильного математического моделирования теплового режима тел из дерева при их нагреве необходимо учитывать все эти процессы.

Обычно они описываются дифференциальными уравнениями, аналогичными уравнениям химической кинетики. Параметры реакций в этих уравнениях определяются путем сопоставления экспериментальных данных с расчетными. В настоящее время существуют работы, посвященные этому вопросу. Обзор некоторых из них можно найти в [96]. Результаты этих работ

показывают, что параметры реакций термического разложения зависят от многих параметров – размеров исследуемых образцов, способа нагрева, его темпа, скорости фильтрации газообразных продуктов и т. п. Многие из рассмотренных исследований связаны с технологическими процессами в лесохимии либо с пожарной безопасностью, где тепловые потоки и температуры не очень высоки, а процесс нагрева достаточно медленный. При обработке поверхности древесины струей плазмы тепловые потоки достигают величин  $10^6$  Вт/м<sup>2</sup>, а нагрев участков поверхности осуществляется за время порядка 1 с. В связи с этим представляет интерес дополнительно исследовать процесс термодеструкции древесины с максимально возможным темпом нагрева.

Одним из способов исследования процессов термического разложения материалов является их нагрев в дериватографе с фиксированным темпом и одновременным измерением массы твердого остатка в зависимости от времени. При этом испытуемый образец должен иметь достаточно малые размеры, чтобы в любой момент температурное поле в нем было однородным.

На рисунке 3.2 представлены результаты комплексного термического исследования образца сосны первоначальной массы  $10^{-4}$  кг на дериватографе (Derivatograph Q1500, Венгрия) при нагреве в среде аргона с темпом 20 град/мин. Из кривой потери массы следует, что можно выделить 4 стадии термического разложения.

В соответствии с этими результатами предлагается использовать следующую модель термодеструкции:

1. В начальный момент материал состоит из легколетучих компонентов (свободная вода, легкоиспаряющиеся компоненты) и материала основного каркаса.

2. В процессе нагрева в материале протекают 4 реакции, соответствующие 4 стадиям:

- стадия 1 (участок 1–2): испарение легколетучих компонентов (время  $t < t_1 \approx 300$  с, температура  $T < 430$  K);

– стадия 2 (участок 3–4): 1-я стадия пиролиза материала каркаса с выделением газа и образованием промежуточного продукта ( $t_1 < t < t_2 \approx 770$  с,  $T < 550$  K);

– стадия 3 (участок 4–5): 2-я стадия пиролиза с образованием коксика ( $t_2 < t < t_3 \approx 770$  с,  $T < 850$  K);

– стадия 4 (участок 5–6): медленное разложение коксика ( $t > t_3$ ) с почти постоянной скоростью.

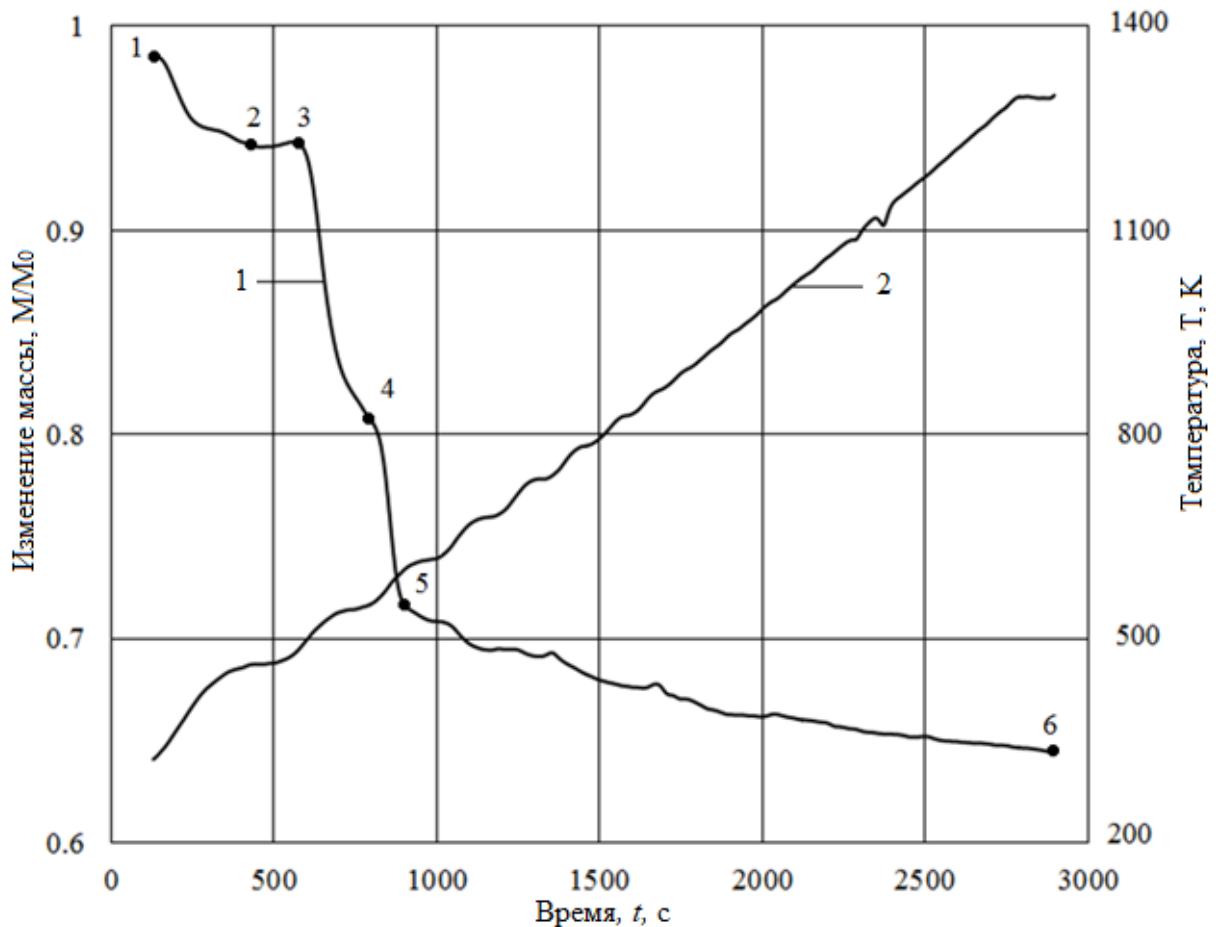


Рисунок 3.2 – Термогравиметрические кривые относительного изменения

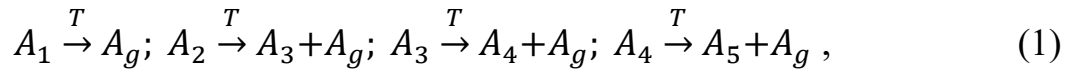
массы образца сосны (1) и изменение температуры (2) в среде аргона

3. Материал представляет собой 6-компонентную смесь:

- легколетучие в исходном состоянии (компонента  $A_1$ );
- материал основного каркаса (компонента  $A_2$ );
- продукт первой стадии пиролиза (компонента  $A_3$ );
- коксик (компонента  $A_4$ );
- кокс (зола, инертная компонента  $A_5$ );

– газообразные продукты пиролиза (компонента  $A_g$ ), конкретный состав этих продуктов не учитывается.

4. Рассматривается следующая схема реакций:



где:

$A_1$  – легколетучие вещества в исходном состоянии;

$A_2$  – материал основного каркаса древесины;

$A_3$  – продукт первой стадии пиролиза;

$A_4$  – коксик;

$A_5$  – кокс (зола);

$A_g$  – газообразные продукты пиролиза.

5. Скорость каждой из реакций описывается законом Аррениуса.

Следует отметить, что в реальности каждая из реакций (1) включает сложные многостадийные химические преобразования. В данной модели эта детализация не учитывается.

Масса каждой компоненты описывается следующими дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dM_1}{dt} = -w_1; \quad (2)$$

$$\frac{dM_2}{dt} = -w_2; \quad (3)$$

$$\frac{dM_3}{dt} = \alpha_2 w_2 - w_3; \quad (4)$$

$$\frac{dM_4}{dt} = \alpha_3 w_3 - w_4, \quad (5)$$

$$\frac{dM_5}{dt} = \alpha_4 w_4. \quad (6)$$

Здесь

$M_i$  – масса  $i$ -й компоненты (кг),  $i = 1-4$ ;

$\alpha_i$  – доли твердого продукта, образующегося в  $i$ -й реакции,  $i = 2-4$ ;

$w_i$  – скорость  $i$ -й реакции (кг/с),

$$w_i = M_i k_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right); \quad (7)$$

$k_i, E_i$  – предэкспонент и энергия активации  $i$ -й реакции;

$T$  – температура образца (К);

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$t$  – время.

В начальный момент времени масса образца  $M = M_0 = M_1 + M_2$ , причем  $M_1 = \varphi \cdot M_0$ ,  $M_2 = M_0 - M_1 = M(t_1)$ ,  $M_3 = M_4 = M_5 = M_g = 0$ , где  $\varphi$  – начальное значение массовой доли легколетучих компонентов. Суммарная масса твердого остатка в любой момент времени  $M(t) = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5$ .

Параметры реакций термического разложения определяются путем сопоставления численного решения системы уравнений (2) – (6) с измеренными значениями  $M(t)$ . Для получения предварительных значений параметров используется следующий алгоритм.

Как видно из рисунка 3.1, каждая из реакций идет в своем температурном и временном интервале. При  $t < t_1$  идет главным образом реакция (2); здесь меняется только  $M_1$ ,  $M_2$  остается постоянным, остальные компоненты еще не образовались. Из уравнения (2) следует

$$\ln\left(\frac{1}{M_1} \frac{dM_1}{dt}\right) = \ln\left(\frac{1}{M - M_2} \frac{dM}{dt}\right) = \ln(k_1) - \frac{E_1}{RT}.$$

Измеренные значения массы подставлялись в левую часть равенства, полученная кривая аппроксимировалась с помощью метода наименьших квадратов в виде линейной зависимости от величины  $1/T$  – производилось «спрямление» данных. Значения  $k_1, E_1$  определялись по параметрам этого спрямления.

На второй стадии разложения при  $t_1 < t < t_2$  идет в основном реакция (3),  $w_3 \approx 0$  и  $M(t) = M_2 + M_3$ . Из уравнений (3) – (4) следует:  $\alpha_2 M_2 + M_3 = \text{const} = \alpha_2 M(t_1)$



$= M(t_2)$ , т. к. в начале стадии компоненты  $A_3$  еще нет, а в конце нет компоненты  $A_2$ . Отсюда  $\alpha_2 = M(t_2)/M(t_1)$ , и

$$M_3 = M(t_2) - \alpha_2 M_2, \quad M(t) = (1 - \alpha_2) M_2 + M(t_2), \quad \frac{1}{M_2} \frac{dM_2}{dt} = \frac{1}{M - M(t_2)} \frac{dM}{dt}$$

При этом уравнение (3) приводится к виду

$$\ln \left[ \frac{1}{M - M(t_2)} \frac{dM}{dt} \right] = \ln(k_2) - \frac{E_2}{RT}.$$

Параметры  $k_2$ ,  $E_2$  определялись путем спрямления функции  $f$  в левой части равенства, вычисленной по экспериментальным данным, в зависимости от  $1/T$  (рисунок 3.3).

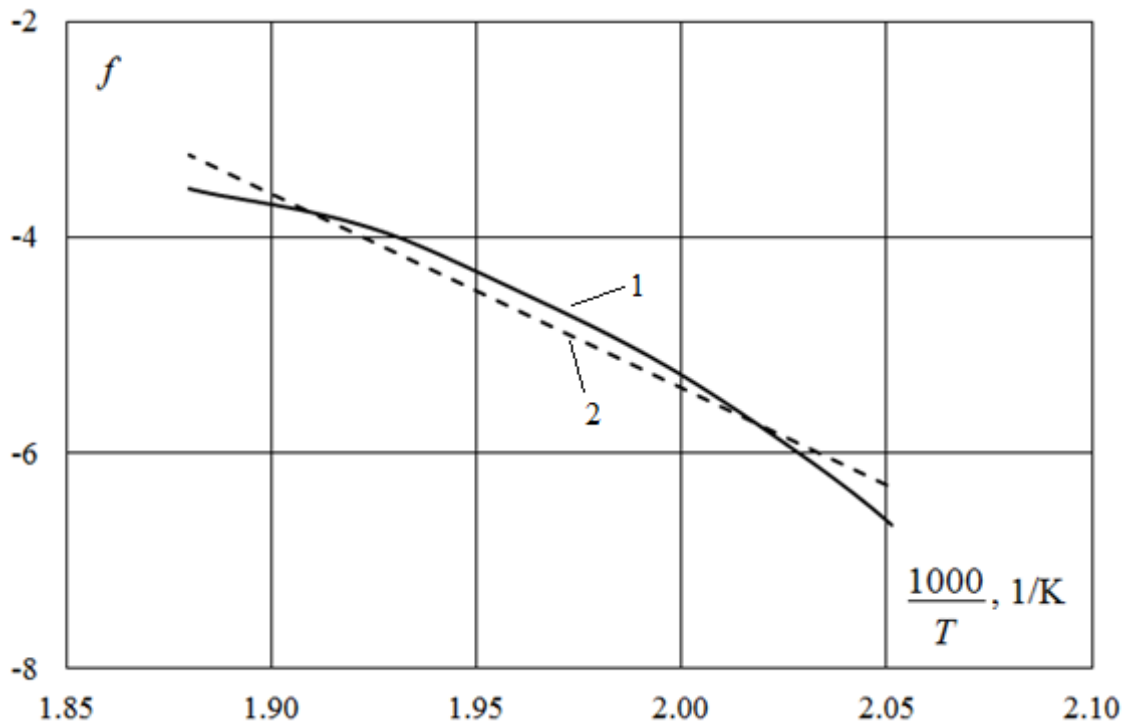


Рисунок 3.3 – Аппроксимация левой части уравнения (7), соответствующего потере массы на второй стадии термического разложения: 1 – экспериментальные значения; 2 – линейная аппроксимация

Аналогичный алгоритм применялся для третьей и четвертой стадии разложения. При этом  $\alpha_i = M(t_i)/M(t_{i-1})$ , а параметры  $k_i$ ,  $E_i$  определялись на основе равенства, полученного из уравнений (4) – (5):

$$\ln \left[ \frac{1}{M - M(t_i)} \frac{dM}{dt} \right] = \ln(k_i) - \frac{E_i}{RT}, \quad i = 3, 4.$$

Здесь  $M(t_4)$  – масса неорганического коксового остатка после завершения процессов термического разложения.

Полученные таким образом параметры подставлялись в систему уравнений (1) – (5), которая решалась численно неявным конечно-разностным методом Эйлера [98]. Использовалась следующая система разностных уравнений, аппроксимирующая систему (1) – (5) с первым порядком по времени:

$$\frac{M_i^n - M_i^{n-1}}{\tau} = -M_i^n R_i(T^n), \quad i = 1, 2; \quad (8)$$

$$\frac{M_i^n - M_i^{n-1}}{\tau} = v_{i-1} M_{i-1}^n R_{i-1}(T^n) - M_i^n R_i(T^n), \quad i = 3, 4; \quad (9)$$

$$\frac{M_5^n - M_5^{n-1}}{\tau} = v_4 M_4^n R_4(T^n). \quad (10)$$

Здесь  $T^n$ ,  $M_i^n$  – значения температуры и массы  $i$ -го компонента в момент времени  $t_n$  ( $i = 1-5$ );  $\tau$  – шаг по времени;  $R_i(T^n) = k_i \cdot \exp(-E_i/(RT^n))$  ( $i = 1-4$ ).

Значения масс компонентов в последовательные моменты времени вычисляются из линейной системы уравнений (8) – (10) при известной температуре и начальных значениях масс:

$$M_i^n = \frac{M_i^{n-1}}{1 + \tau R_i(T^n)}, \quad i = 1, 2;$$

$$M_i^n = \frac{M_i^{n-1} + \tau v_{i-1} M_{i-1}^n R_{i-1}(T^n)}{1 + \tau R_i(T^n)}, \quad i = 3, 4;$$

$$M_5^n = M_5^{n-1} + \tau v_4 M_4^n R_4(T^n).$$

В таблице 3.1 приведены кинетические параметры реакций, полученные при обработке экспериментальных данных при темпе нагрева 20 град/мин; при

этом конкретные вычисления проводились при начальной доле летучих  $M_{1,0}/M_0 = 0,05$  и шаге по времени  $\tau = 1$  с. Нулевое значение энергии активации на 4-й стадии разложения означает, что здесь скорость реакции не зависит от температуры.

Таблица 3.1 – Параметры реакций термического разложения древесины

| № стадии | $k$ , 1/с           | $E/R$ , К | A     |
|----------|---------------------|-----------|-------|
| 1        | $8,1 \cdot 10^2$    | 4000      | –     |
| 2        | $1,9 \cdot 10^{13}$ | 18000     | 0,877 |
| 3        | $4,7 \cdot 10^{17}$ | 25600     | 0,860 |
| 4        | $6,0 \cdot 10^{-5}$ | 0         | 0,06  |

На рисунке 3.4 представлены графики расчетных и экспериментальных данных при темпе нагрева 20 град/мин, полученные кривые имеют хорошее согласование.

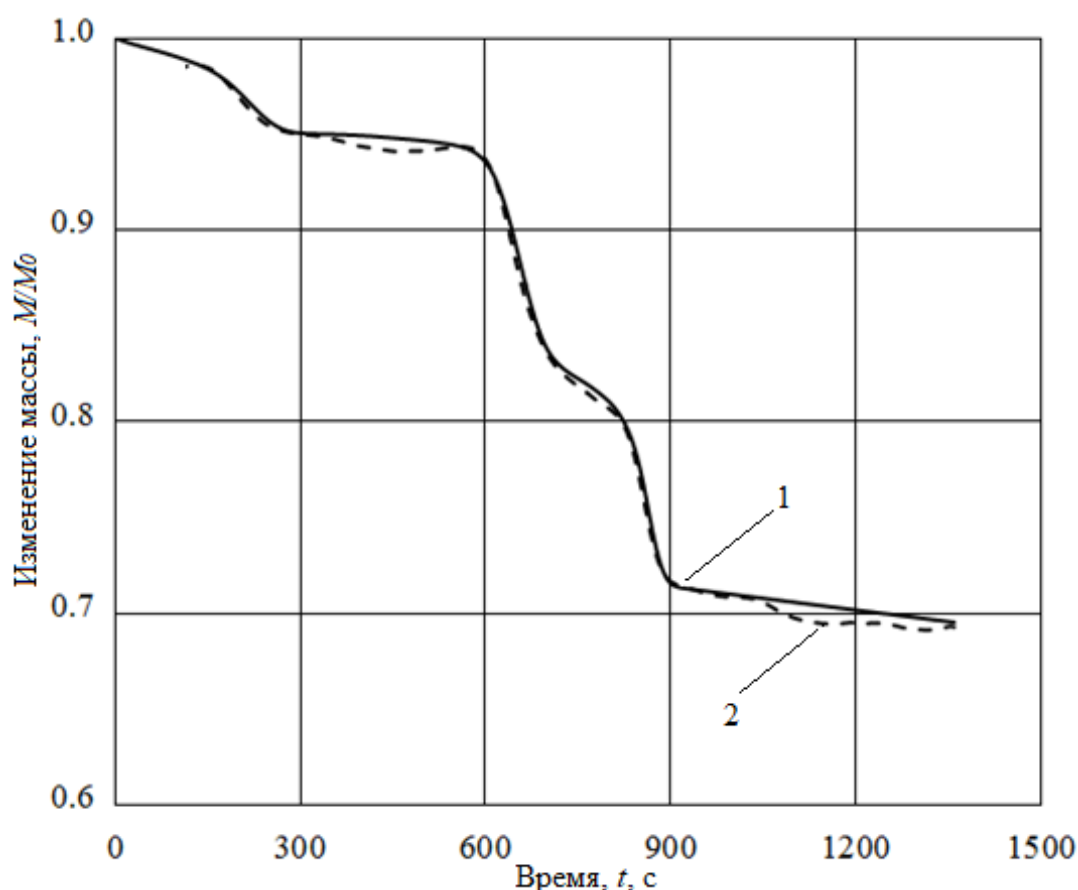


Рисунок 3.4 – Сравнение расчетных (кривая 1) и экспериментальных (кривая 2) кривых потери массы при темпе нагрева 20 град/мин,  $\varphi = 0,05$

Испытания при меньшем темпе нагрева (10 град/мин) показали, что полученные значения параметров также дают удовлетворительное согласование

с экспериментом на всех стадиях разложения, кроме четвертой (рисунок 3.5). Следует обратить внимание, что скорость реакции на 4-й стадии (рисунок 3.5, участок кривой от ~1900 до ~4000 с) достаточно мала, и при малом времени теплового воздействия глубина превращения при пиролизе вряд ли будет глубокой. Кроме того, на этой стадии большую значимость должно иметь горение в воздушной среде, которого не было при испытаниях в инертном газе (аргоне).

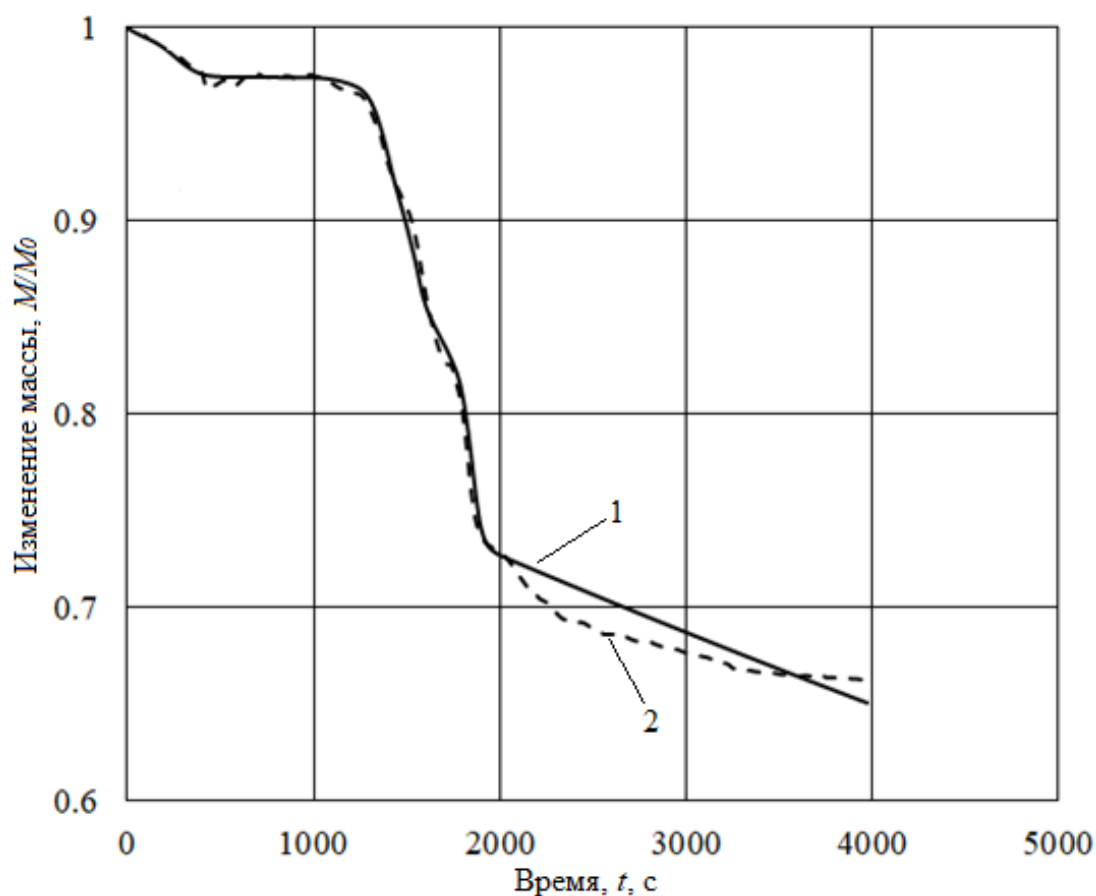


Рисунок 3.5 – Сравнение расчетных (кривая 1) и экспериментальных (кривая 2) кривых потери массы при темпе нагрева 10 град/мин,  $\varphi = 0,026$

### 3.2 Математическая модель теплового режима древесины при плазменной обработке её поверхности и алгоритм численного решения задачи

В работе рассматривается процесс обработки деревянной пластины струёй низкотемпературной плазмы конечной ширины, движущейся вдоль поверхности с постоянной скоростью. Под воздействием конвективного теплового потока в

тонком приповерхностном слое древесины происходит термическое разложение (пиролиз) с изменением структуры и образованием газообразных продуктов.

Для описания теплового поля внутри древесины используется модель пористого реагирующего тела, учитывающая:

- теплопроводность в объёме материала;
- пиролиз древесины с кинетикой четырёх стадий разложения и изменением плотности компонентов;
- фильтрацию газообразных продуктов и перенос тепла с их участием.

Температурное поле описывается уравнением энергии с учётом эффективного коэффициента теплопроводности, который отражает анизотропность древесины, но в модели заменён одним средним значением из-за преобладания градиентов температуры по глубине.

Кинетика пиролиза основана на термогравиметрическом анализе лиственницы и включает четыре стадии с соответствующими тепловыми эффектами: эндотермические реакции преобладают на ранних стадиях, экзотермический эффект проявляется при высоких температурах ( $>593$  K) на последней стадии, однако из-за короткого времени воздействия плазмы его влияние на температурное поле мало.

Для решения системы уравнений поставленной задачи, описывающих тепловой режим и кинетику пиролиза, применяется численный метод с дискретизацией по пространственным координатам и времени. Особое внимание уделяется учёту нелинейных зависимостей теплофизических свойств и тепловых эффектов реакций.

Алгоритм предусматривает:

- вычисление температуры и плотностей компонентов на каждом временном шаге;
- обновление кинетических параметров и тепловых эффектов в зависимости от текущей температуры;
- контроль сходимости и стабильности решения.

Более подробно математическая модель теплового режима древесины при плазменной обработке её поверхности и алгоритм численного решения задачи, на основании данных работ [99–115], описаны в приложении Б.

### 3.3 Результаты расчетов

Численные расчеты по предложенной математической модели проводились при следующих значениях исходных данных:

Длина доски  $L = 0,3$  м. (Расчеты показали, что зависимости температуры и плотности древесины от координаты  $x - x_*(t)$  в разные моменты времени близки друг к другу за исключением далеких от оси струи расстояний. Поэтому увеличение значения  $L$  не даст новой информации, но увеличит время расчета.)

Ширина доски  $l = 0,1$  м.

Глубина, до которой ведется расчет,  $h = 0,005$  м.

Диаметр теплового контакта струи плазмы с древесиной (ширина струи)  $2\Delta = 0,01$  м.

Эффективный коэффициент теплопроводности,  $\lambda_{eff} = 0,14$  Вт/(м·К).

Эффективная удельная теплоемкость материала  $c_{eff} = 1500$  Дж/(кг·К).

Начальная плотность материала  $\rho_0 = 670$  кг/м<sup>3</sup>.

Начальная массовая доля летучих компонентов  $\varphi = 0,05$ .

Излучательная способность поверхности материала  $\varepsilon_w = 0,8$ .

Мощность плазмотрона ( $N$ ) менялась в диапазоне 24–15,8 кВт.

Коэффициент полезного действия плазмотрона  $\eta = 0,6$ .

Скорость перемещения струи вдоль доски ( $V$ ) изменялась в диапазоне 0,03–0,12 м/с.

Результаты расчетов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Расчетные параметры плазменной обработки и глубина, на которой происходит разложение древесины

| Мощность<br>плазмотрона<br>а<br>$N$ , кВт | Тепловой<br>поток*<br>$q_{\max}$ ,<br>Вт/м <sup>2</sup> | Скорость<br>перемеще-<br>ния струи<br>$V$ , см/с | $t_k$ ,<br>с | Количество<br>теплоты<br>$Q$ , Дж | $\Delta_1$ ,<br>мм | $\Delta_2$ ,<br>мм | Степень<br>деструкции<br>$D$ , % |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------------|
| 15,6                                      | $0,8 \cdot 10^6$                                        | 3                                                | 6            | 48000                             | 0,23               | 0,66               | 1,15                             |
| 23,8                                      | $1,4 \cdot 10^6$                                        | 3                                                | 6            | 84000                             | 0,35               | 1,00               | 1,75                             |
| 35,2                                      | $1,9 \cdot 10^6$                                        | 3                                                | 6            | 114000                            | 0,42               | 1,2                | 2,1                              |
| 58,8                                      | $3,4 \cdot 10^6$                                        | 3                                                | 6            | 204000                            | 0,53               | 1,23               | 2,65                             |
| 15,6                                      | $0,8 \cdot 10^6$                                        | 6                                                | 3            | 24000                             | 0,13               | 0,35               | 0,65                             |
| 23,8                                      | $1,2 \cdot 10^6$                                        | 6                                                | 3            | 36000                             | 0,21               | 0,53               | 1,05                             |
| 35,2                                      | $1,9 \cdot 10^6$                                        | 6                                                | 3            | 57000                             | 0,28               | 0,73               | 1,4                              |
| 58,8                                      | $3,4 \cdot 10^6$                                        | 6                                                | 3            | 102000                            | 0,35               | 0,81               | 1,75                             |
| 15,6                                      | $0,8 \cdot 10^6$                                        | 9                                                | 3            | 24000                             | -                  | 0,02               | 0                                |
| 23,8                                      | $1,4 \cdot 10^6$                                        | 9                                                | 3            | 42000                             | 0,17               | 0,43               | 0,85                             |
| 35,2                                      | $1,9 \cdot 10^6$                                        | 9                                                | 3            | 57000                             | 0,23               | 0,53               | 1,15                             |
| 58,8                                      | $3,4 \cdot 10^6$                                        | 9                                                | 3            | 102000                            | 0,28               | 0,73               | 1,4                              |
| 23,8                                      | $1,4 \cdot 10^6$                                        | 12                                               | 2,5          | 35000                             | 0,12               | 0,28               | 0,6                              |
| 35,2                                      | $1,9 \cdot 10^6$                                        | 12                                               | 2,5          | 47500                             | 0,19               | 0,43               | 0,95                             |
| 58,8                                      | $3,4 \cdot 10^6$                                        | 12                                               | 2,5          | 85000                             | 0,26               | 0,48               | 1,3                              |

Примечание:

$q_{\max}$  – максимальное значение теплового потока при начале нагрева (без учета горения газов), Вт/м<sup>2</sup>;

$t_k$  – время, до которого велся расчет, с;

$\Delta_1$  – глубина, на которой заканчивается быстрый этап пиролиза (в модели пиролиза – исчезает компонента № 3, и твердый каркас древесины состоит только из компонент № 4 и № 5), мм;

$\Delta_2$  – глубина, на которой начинается разложение твердого каркаса древесины (появляется компонента № 3 – результат разложения исходного материала каркаса), мм.

Далее приведены рисунки 3.6–3.11, построенные по результатам расчета для варианта:

Мощность плазмотрона – 24 кВт.

Коэффициент полезного действия – 0,6.

Максимальное значение теплового потока без учета горения продуктов пиролиза –  $1,26 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

Диаметр струи при тепловом контакте с поверхностью дерева – 0,01 м.

Скорость движения струи вдоль поверхности доски – 0,06 м/с.

На рисунке 3.6 представлены графики температуры поверхности материала в точках  $x = 0,05$  м и  $x = 0,1$  м в зависимости от времени. Пик на кривых соответствует точке максимального внешнего теплового потока от струи. Плавное снижение температуры после прохождения плазменного потока рассматриваемой точки обусловлено продолжающимся разложением и горением выделившихся газов с постепенным затуханием.

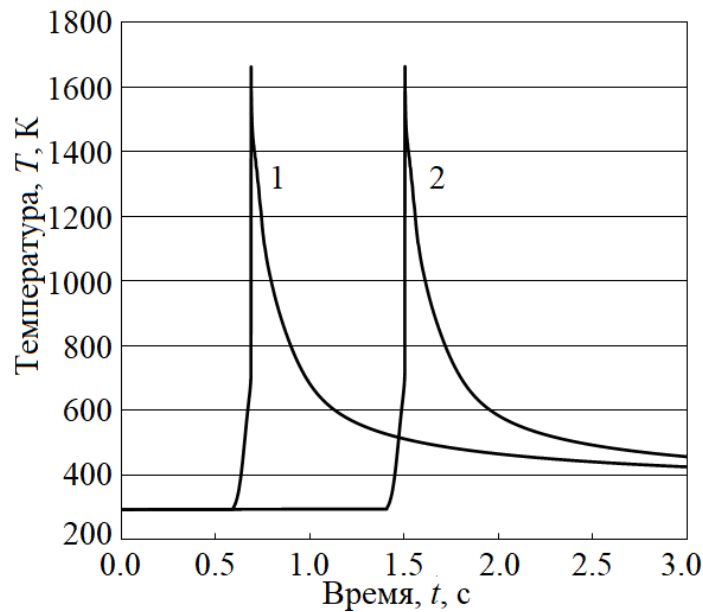


Рисунок 3.6 – Расчетная температура поверхности материала в зависимости от времени: 1 – в точке  $x = 0,05$  м; 2 – в точке  $x = 0,1$  м

На рисунке 3.7 представлены кривые температуры поверхности материала в моменты времени 1, 2 и 3 с. Температура мала в левой части графиков, т. к. начальное положение оси струи находится на расстоянии 1 см от начала обрабатываемого образца (доски). Пики температуры соответствуют положению оси струи в данный момент времени (1, 2 и 3 с соответственно).



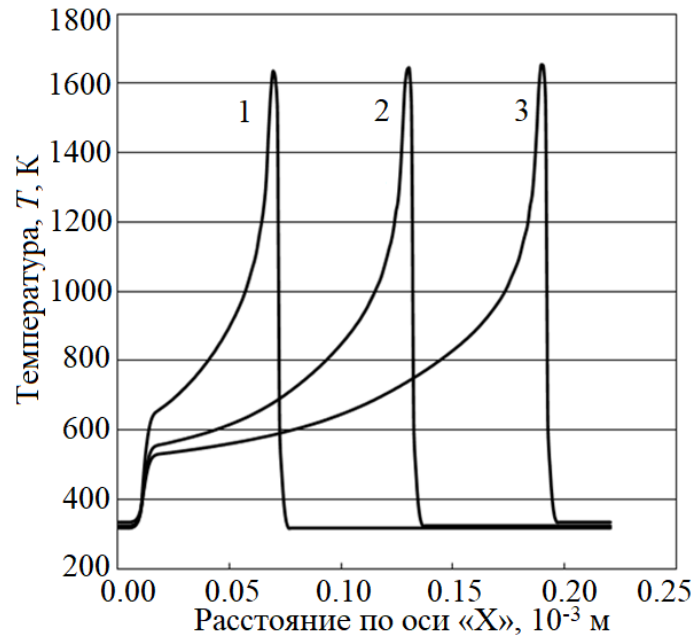


Рисунок 3.7 – Расчетная температура поверхности по длине материала (по оси «X»):

1 – в момент времени 1 с; 2 – в момент времени 2 с; 3 – в момент времени 3 с

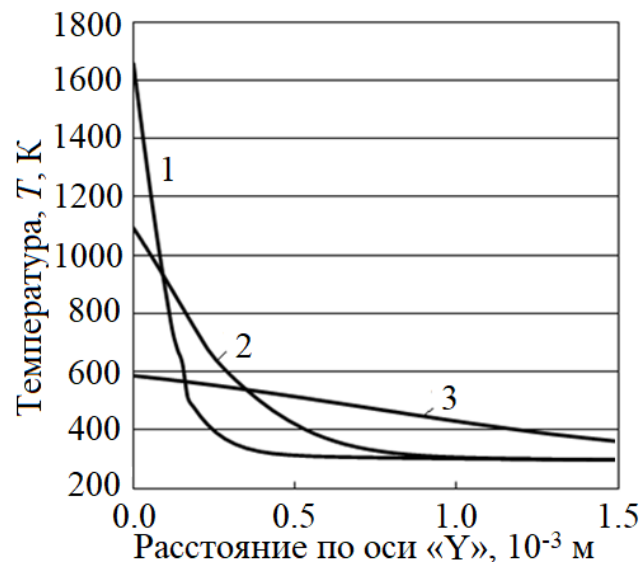


Рисунок 3.8 – Расчетное распределение температуры по глубине материала (по оси «Y») в момент времени  $t = 3$  с:

1 – в окрестности максимального теплового потока;  
 2 – после прохождения струи на расстоянии 1 см от области нагрева;  
 3 – после прохождения струи на расстоянии 10 см от области нагрева

На рисунке 3.8 представлены графики распределения температуры по глубине материала в момент времени  $t = 3$  с в окрестности максимального теплового потока и после прохождения струи на расстоянии 1 см и 10 см от

области нагрева. Поведение кривых 2, 3 показывает, что даже после прохождения струи нагрев продолжается за счет догорания продуктов пиролиза.

На рисунке 3.9 представлено распределение температуры материала в окрестности зоны максимального нагрева на поверхности образца на глубине 0,1; 0,2; 0,35 и 1 мм. Заметно смещение пиковых значений температуры по глубине: чем больше глубина, на которой рассматривается температура, тем медленнее она прогревается (участки с наибольшими значениями температуры – левее от положения плазменного потока). Такой эффект связан с относительно низкой теплопроводностью древесины.

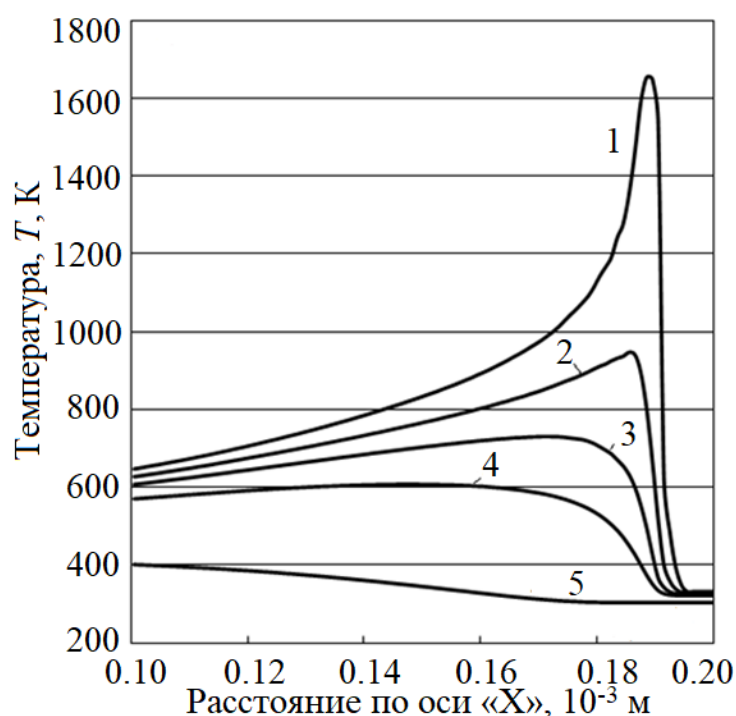


Рисунок 3.9 – Расчетное распределение температуры по длине материала (по оси «x»):

- 1) в окрестности зоны максимального нагрева на поверхности образца;
- 2 – на глубине 0,1 мм; 3 – на глубине 0,2 мм; 4 – на глубине 0,35;
- 5 – на глубине 1 мм

На рисунке 3.10 представлено распределение плотности материала по глубине в момент времени  $t = 3$  с в окрестности максимального теплового потока и после прохождения струи на расстоянии 1 и 10 см от области максимального нагрева. Видно, что разложение продолжается даже после того, как струя прошла через рассматриваемую точку.

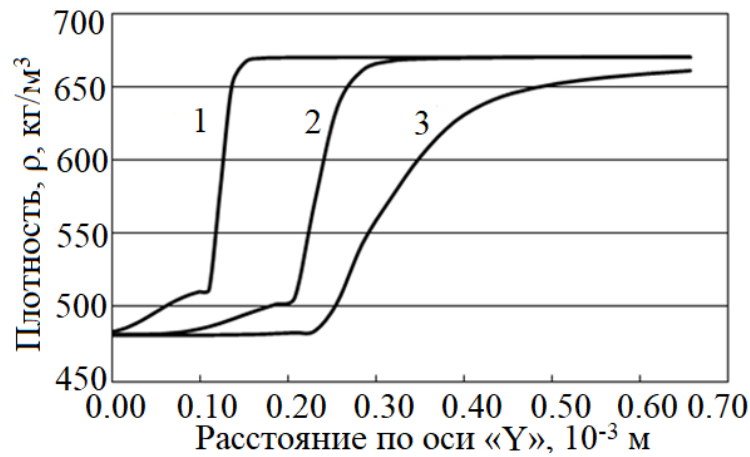


Рисунок 3.10 – Расчетное распределение плотности материала по глубине (по оси «у») в момент времени  $t = 3$  с:

- 1 – в окрестности максимального теплового потока;  
 2 – после прохождения струи на расстоянии 1 см от области максимального нагрева; 3 – после прохождения струи на расстоянии 10 см от области максимального нагрева

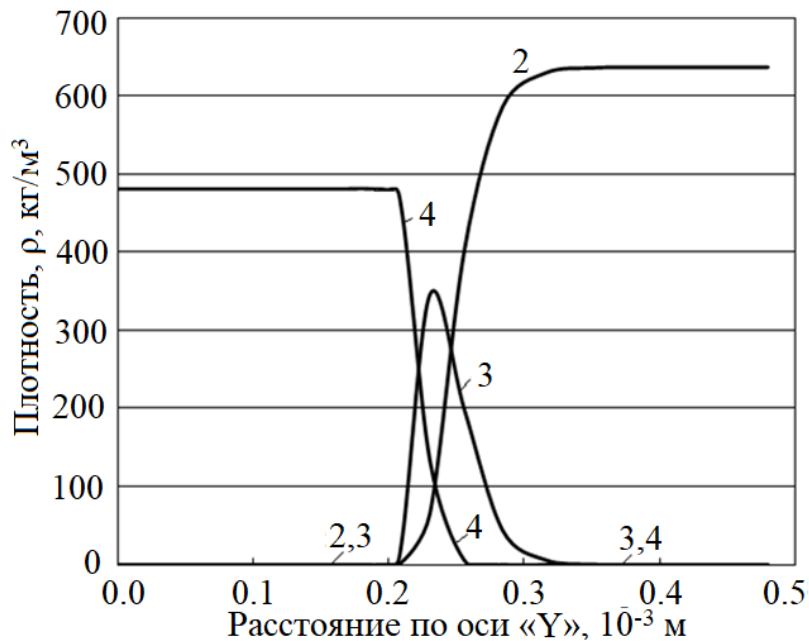


Рисунок 3.11 – Расчетное распределение плотности компонентов разложения по глубине материала (по оси «у») после окончания прохождения плазменной струи:

- 2 – материал исходного твердого каркаса (компонента № 2);  
 3, 4 – компоненты, возникающие на 2-й и 3-ей стадии разложения соответственно (компоненты № 3,4 см. пункт 3.1)

На рисунке 3.11 представлено распределение плотности компонентов разложения после окончания прохождения плазменной струи. На графиках не приведена плотность легколетучих компонентов, а также плотность компонента,

образующегося на конечной стадии пиролиза, вследствие их малой величины. Рисунок 3.11 характеризует распределение по глубине этапов пиролиза древесины. Появление 3-го компонента означает начало разложения твердого каркаса древесины; соответствующая глубина –  $\Delta_2$  в таблице 3.2. Исчезновение его означает окончание быстрых этапов пиролиза; соответствующая глубина –  $\Delta_1$ .

Полученные данные опубликованы в [116, 117].

### **Выводы по главе 3**

1. Предложенная модель термического разложения древесины, учитывающая четыре стадии пиролиза древесины: испарение легколетучих компонентов, две стадии пиролиза с образованием промежуточных продуктов и коксика, а также медленное разложение коксика – показывает хорошее согласование с экспериментальными результатами, особенно для высоких температур и быстрых процессов нагрева, характерных для плазменной обработки.

2. Математическая модель, описывающая тепловые процессы в древесине при воздействии низкотемпературной плазмы, обеспечивает численное решение системы уравнений. Уравнения модели включают баланс массы и энергии, а также граничные условия, учитывающие взаимодействие струи плазмы с поверхностью древесины, включая горение продуктов пиролиза. Численное решение системы уравнений выполнено с использованием конечно-разностного метода.

3. Расчеты для различных параметров плазменной обработки (мощность плазмотрона, скорость перемещения струи) показывают, что увеличение мощности плазмотрона и/или уменьшение скорости перемещения струи приводят к увеличению количества теплоты, подведенной к обрабатываемой плазмой древесине, что в свою очередь приводит к повышению глубины термического воздействия. Установлено, что даже после прохождения струи нагрев продолжается за счет догорания продуктов пиролиза, что важно для понимания динамики процесса.

4. Результаты моделирования позволяют прогнозировать глубину и характер изменения структуры древесины при плазменной обработке, что может быть использовано для оптимизации технологических параметров.

5. Расчетные параметры плазменной обработки будут использоваться для практической обработки древесины на разработанном стенде с целью дальнейшего комплексного исследования, описанного в следующих главах.

## **ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБРАБОТКИ ПОТОКОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ НА СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ**

Данная глава содержит комплексное исследование влияния режимов низкотемпературной плазменной обработки на структуру и свойства древесины хвойных пород. В рамках главы рассматриваются изменения морфологии поверхности, механических характеристик, влагостойкости, биологической устойчивости и огнезащитных свойств. Полученные результаты позволят определить оптимальные параметры обработки для дальнейшего внедрения технологии в производство строительных материалов.

### **4.1 Влияние режимов плазменной обработки на структуру поверхности древесины**

В предыдущей главе теоретически установлена возможность варьировать характеристики обработанного приповерхностного слоя древесины в зависимости от параметров плазменной обработки. Изменение характеристик связано с протеканием физико-химических реакций в приповерхностном слое древесины. Следствием протекания реакций являются изменения в структуре приповерхностного слоя древесины. Далее рассмотрено влияние режимов плазменной обработки на структуру поверхности древесины.

В настоящей главе изучено влияние различной величины удельного теплового потока ( $1,1\text{--}3,2 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$ ) и скорости обработки ( $0,03\text{--}0,09 \text{ м/с}$ ).

#### **4.1.1 Определение структурных изменений поверхности древесины с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии**

На рисунке 4.1 представлены микрофотографии среза образцов из сосны до и после обработки потоком низкотемпературной плазмы при величине удельного теплового потока  $1,8 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$  и скорости обработки  $0,03 \text{ м/с}$ . На снимке до обработки (рисунок 4.1, *а*) на поверхности древесины виднеются ворсинки длиной  $0,3\text{--}0,7 \text{ мм}$ , образовавшиеся в процессе распилки изделий. Это связано с тем, что режущий инструмент не раздвигает древесные волокна, а вырывает их, особенно если рез происходит поперек их направления. В результате на поверхности остаются оторванные клеточные оболочки, которые

и образуют ворсистость. Количество ворсинок и размер главным образом зависят от состояния режущего инструмента, скорости подачи (реза), сорта и влажности древесины [118–120].

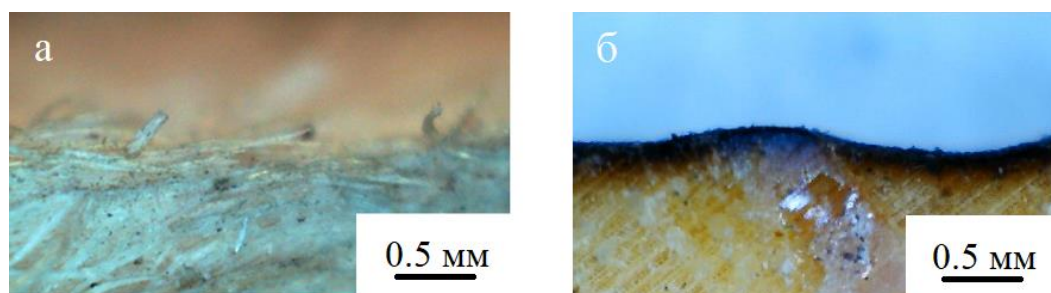


Рисунок 4.1 – Микрофотографии среза образцов из сосны: *а* – исходный образец; *б* – обработанный потоком низкотемпературной плазмы

На снимке после обработки потоком низкотемпературной плазмы (рисунок 4.1, *б*) поверхность гладкая без ворсинок, имеет черный окрас и частички сажи. В результате воздействия потоком низкотемпературной плазмы происходит термическое разложение древесных волокон – ворсинок с образованием сажи. Также после воздействия потоком низкотемпературной плазмы наблюдается образование волнообразного рельефа поверхности древесины. Такой эффект связан с разной реакцией ранних и поздних клеток древесины – трахеид на термическое воздействие из-за разницы в их плотности и влажности [121]. Плотность ранней древесины сосны в  $\sim 2,5$  раза ниже, чем плотность поздней древесины [122]. Ранняя древесина, за счет более низкой плотности, при подведении тепла разлагается активнее, чем поздняя, тем самым образуя углубления на поверхности древесины. На рисунке 4.2, *а* отчетливо наблюдается чередование ранней (зоны *а1*) и поздней (зоны *а2*) древесины, а также наличие углублений в зонах расположения ранней древесины (зоны *а1*).

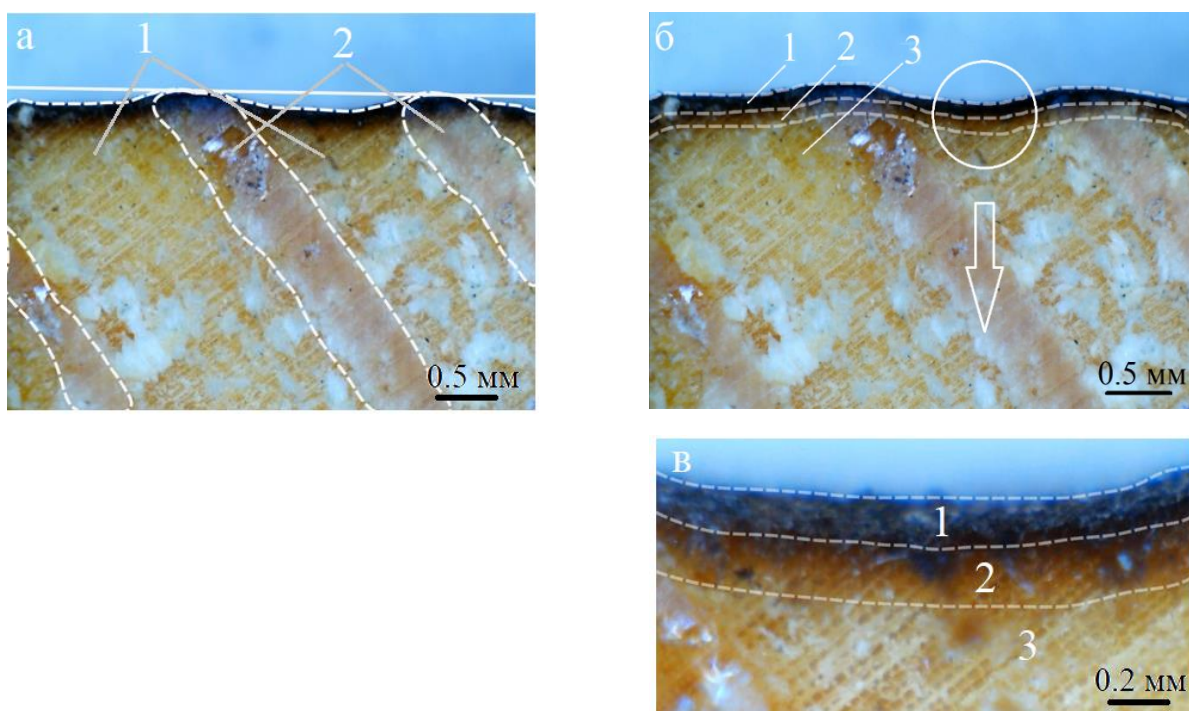


Рисунок 4.2 – Микрофотографии среза образцов из сосны после плазменной обработки: *а, б* – увеличение 20×; *в* – увеличение 200×;  
*а1* – зона ранней древесины; *а2* – зона поздней древесины;  
*б, в1* – зона соответствует стадии окончания пиролиза; *б, в2* – соответствует начальной стадии пиролиза; *б, в3* – зона исходной древесины

Также заметен цветовой градиент от черного на поверхности древесины до желтого на расстоянии 0,5 мм и ниже от поверхности. На рисунке 4.2, *б, в* выделено три цветовых области, соответствующих разным стадиям разложения древесины. Область 1 толщиной ~0,2 мм имеет черный окрас и соответствует стадии разложения углерода. Древесные клетки ближе к поверхности разрушены, наблюдается отсутствие древесной структуры. Область 2 толщиной ~0,25 мм имеет градиентный окрас от коричневого до золотистого цвета, соответствует стадии пиролиза древесины. Структура древесины в большей степени сохраняется, наблюдается ее разрушение только на границе с областью 1. Область 3 имеет светло-желтый окрас и соответствует исходной древесине (с началом процесса сушки на границе с областью 2). Структура древесины не нарушена.

При сравнении областей, выделенных на микрофотографиях (рисунок 4.2), с результатами теоретических расчетов, представленных в таблице 3.2, а именно



со значениями глубин:  $\Delta_1$  – глубина, на которой заканчивается этап пиролиза (в модели пиролиза исчезает компонент № 3, и твердый каркас древесины состоит только из компонентов № 4 и № 5, а именно коксика (углерода) и кокса);  $\Delta_2$  – глубина, на которой начинается разложение твердого каркаса древесины (появляется компонент № 3 – результат разложения исходного материала каркаса), определено, что фактическая область 1 (рисунок 4.2, б) соответствует расчетной  $\Delta_1$ , а область 2 (рисунок 4.2, б) соответствует расчетной  $\Delta_2$ . На основании этого предлагается использовать модель слоев приповерхностной области древесины после плазменной обработки, схематично представленную на рисунке 4.3. Слой 1 глубиной  $\Delta_1$  соответствует стадии окончания пиролиза, имеет черный окрас и представляет собой углерод. Слой 2 глубиной  $\Delta_2$  соответствует начальной стадии пиролиза, имеет градиентный окрас от желтого до темно-коричневого и представляет собой результат разложения исходного материала каркаса. Слой 3 представляет собой исходную древесину. Толщина слоя 3 определяется как толщина всего обрабатываемого изделия за исключением  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$ . Толщина  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  в большей степени определяется величиной удельного теплового потока плазмы и скоростью обработки изделия.



Рисунок 4.3 – Модель слоев приповерхностной области древесины после плазменной обработки: 1 – соответствует стадии окончания пиролиза, имеет черный окрас и представляет собой углерод; 2 – соответствует начальной стадии пиролиза и представляет собой результат разложения исходного материала каркаса; 3 – представляет собой исходную древесину

По данным сканирующей электронной микроскопии (рисунок 4.4) структура поверхности исходных (необработанных) образцов из сосны

неоднородная, шероховатая, с большим количеством открытых пор и каналов (смоляные ходы, межклеточные полости, капилляры), образованных в результате распиловки изделий.

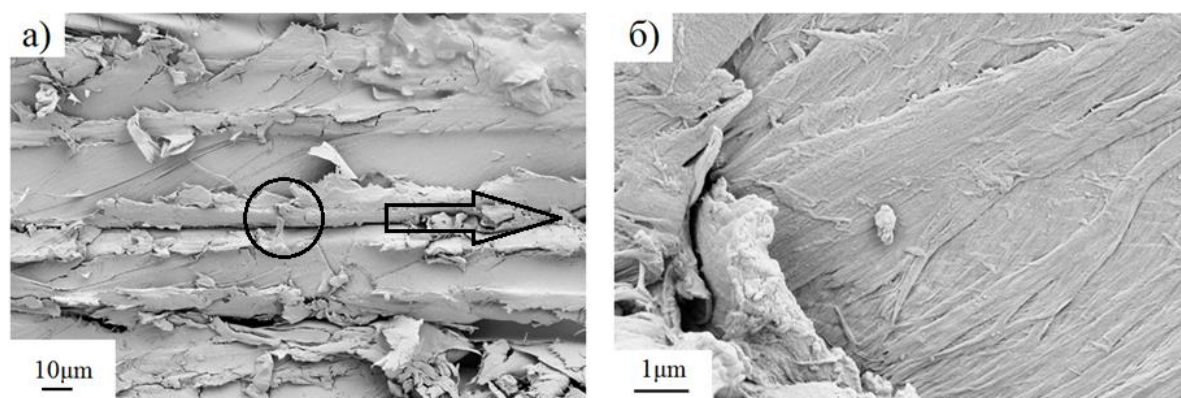


Рисунок 4.4 – Микрофотографии сканирующей электронной микроскопии поверхности древесины до обработки потоком низкотемпературной плазмы: *а* – снимок в масштабе 10 мкм; *б* – снимок в масштабе 1 мкм

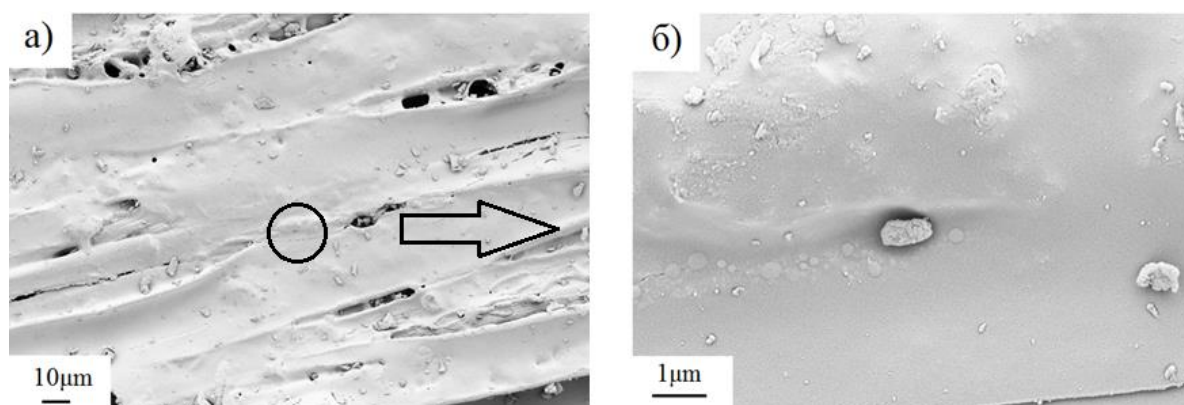


Рисунок 4.5 – Микрофотографии сканирующей электронной микроскопии поверхности древесины после обработки потоком низкотемпературной плазмы: *а* – снимок в масштабе 10 мкм; *б* – снимок в масштабе 1 мкм

На электронных снимках образцов после обработки потоком низкотемпературной плазмы (рисунок 4.5) заметно значительное увеличение однородности структуры древесины и уменьшение шероховатости поверхности за счет термического разложения древесных волокон. Виднеются продукты разложения – частички сажи по всей площади поверхности древесины. Наблюдается большее количество пор и каналов, которые до плазменной обработки были скрыты древесными волокнами. Поры и каналы частично или

полностью заполнены смолами. Это связано с движением смол к поверхности при термическом воздействии [123].

#### **4.2 Влияние плазменной обработки на механические свойства древесины в зависимости от режима плазменной обработки**

Механические свойства древесины являются ключевым параметром, определяющим ее применимость в строительных конструкциях. Известно, что термическое воздействие приводит к снижению прочности древесины, и это снижение прямо пропорционально величине и времени термического воздействия [46]. Поэтому необходимо определить это снижение для его учитывания при проектировании конструкций из древесины, обработанной потоком низкотемпературной плазмы. В данном разделе исследуется влияние обработки потоком низкотемпературной плазмы на прочность при сжатии, изгибе и на прочность клевого соединения. Обработка потоком низкотемпературной плазмы сравнивалась с наиболее схожим по принципу обработки – обжигом газовой горелкой.

##### **4.2.1 Влияние плазменной обработки на твердость древесины**

В таблицах 4.1–4.3 представлены значения твердости по Бринеллю для образцов из сосны, лиственницы и ели в зависимости от параметров плазменной обработки.

Таблица 4.1 – Результаты испытаний на твердость образцов из сосны в зависимости от режима плазменной обработки

| № | Удельный тепловой поток $q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки $V$ , см/с | Количество теплоты, $Q$ , Дж | Твердость по Бринеллю $HBW$ , кгс/мм <sup>2</sup> |
|---|--------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|
| 1 | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 9                             | 6111                         | $1,8 \pm 0,2$                                     |
| 2 | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 9166                         | $1,8 \pm 0,2$                                     |
| 3 | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 12500                        | $1,8 \pm 0,2$                                     |
| 4 | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 25000                        | $1,7 \pm 0,2$                                     |
| 5 | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 15000                        | $1,8 \pm 0,2$                                     |
| 6 | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 30000                        | $1,7 \pm 0,2$                                     |
| 7 | $2,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 23334                        | $1,9 \pm 0,2$                                     |

## Продолжение таблицы 4.1

| №  | Удельный<br>тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость<br>обработки<br>$V$ , см/с | Количество<br>теплоты,<br>$Q$ , Дж | Твердость по<br>Бринеллю<br>$HBW$ , кгс/мм <sup>2</sup> |
|----|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 46666                              | $1,8 \pm 0,2$                                           |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 26667                              | $1,9 \pm 0,2$                                           |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 53334                              | $1,8 \pm 0,2$                                           |

Таблица 4.2 – Результаты испытаний на твердость образцов из лиственницы в зависимости от режима плазменной обработки

| №  | Удельный<br>тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость<br>обработки<br>$V$ , см/с | Количество<br>теплоты,<br>$Q$ , Дж | Твердость по<br>Бринеллю<br>$HBW$ , кгс/мм <sup>2</sup> |
|----|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                             | 9                                   | 6111                               | $2,7 \pm 0,2$                                           |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 9166                               | $2,6 \pm 0,2$                                           |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 12500                              | $2,7 \pm 0,2$                                           |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 25000                              | $2,8 \pm 0,2$                                           |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 15000                              | $2,7 \pm 0,2$                                           |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 30000                              | $2,7 \pm 0,2$                                           |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 23334                              | $2,8 \pm 0,2$                                           |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 46666                              | $2,6 \pm 0,2$                                           |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 26667                              | $2,7 \pm 0,2$                                           |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 53334                              | $2,9 \pm 0,2$                                           |

Таблица 4.3 – Результаты испытаний на твердость образцов из ели в зависимости от режима плазменной обработки

| № | Удельный<br>тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость<br>обработки<br>$V$ , см/с | Количество<br>теплоты<br>$Q$ , Дж | Твердость по<br>Бринеллю<br>$HBW$ , кгс/мм <sup>2</sup> |
|---|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1 | $1,1 \cdot 10^6$                                             | 9                                   | 6111                              | $2,0 \pm 0,2$                                           |
| 2 | $1,1 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 9166                              | $1,9 \pm 0,2$                                           |
| 3 | $1,5 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 12500                             | $1,9 \pm 0,2$                                           |
| 4 | $1,5 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 25000                             | $1,9 \pm 0,2$                                           |
| 5 | $1,8 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 15000                             | $2,0 \pm 0,2$                                           |
| 6 | $1,8 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 30000                             | $2,1 \pm 0,2$                                           |
| 7 | $2,8 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 23334                             | $2,0 \pm 0,2$                                           |
| 8 | $2,8 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 46666                             | $2,0 \pm 0,2$                                           |

| №  | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Твердость по Бринеллю<br>$HBW$ , кгс/мм <sup>2</sup> |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------|
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 26667                          | $1.9 \pm 0,2$                                        |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 53334                          | $2.0 \pm 0,2$                                        |

Для всех исследуемых пород отмечается отсутствие влияния плазменной обработки на твердость. Однако в работах [124–128], при объемной термической обработке, авторами установлено снижение твердости древесины до 15–20 % за счет частичного термического разложения целлюлозы и лигнина. Отсутствие влияния плазменной обработки на твердость связано с малой толщиной обработанного слоя, а соответственно – с малой долей древесины, подвергшейся термическому разложению.

#### 4.2.2 Влияние плазменной обработки на износостойкость поверхности древесины

На рисунках 4.6, 4.7 представлены изображения профилей поверхности после трибологического испытания (CSEM TRIBOMETR) с анализом кросс-секции следа износа от штифта для образцов из сосны. Видно, что след износа от штифта у образца после плазменной обработки (глубина 53,8 мкм, площадь 6178 мкм<sup>2</sup>) меньше, чем у исходного (необработанного) образца (глубина 111 мкм, площадь 21781 мкм<sup>2</sup>). В таблице 4.4 представлены результаты испытаний для различных режимов плазменной обработки.

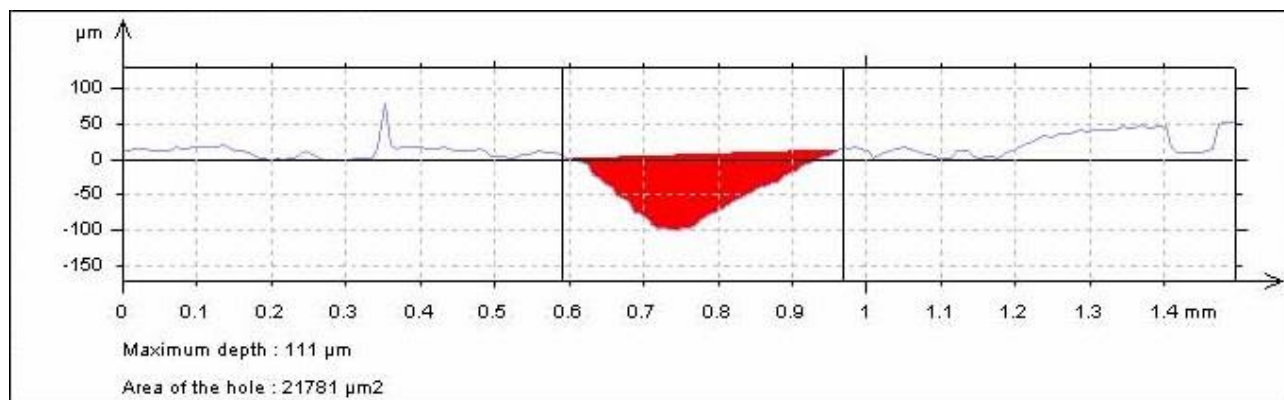


Рисунок 4.6 – Профиль поверхности образца из исходной сосны после испытания на CSEM TRIBOMETR

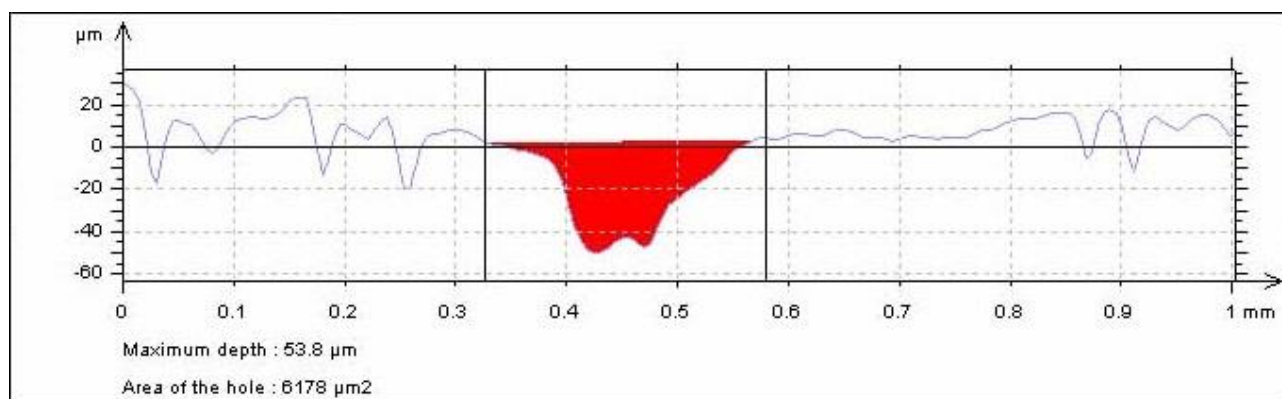


Рисунок 4.7 – Профиль поверхности образца из сосны, обработанного потоком низкотемпературной плазмы после испытания на CSEM TRIBOMETR

Таблица 4.4 – Результаты испытаний на износ (CSEM TRIBOMETR) образцов из сосны в зависимости от режима плазменной обработки

| №  | Удельный тепловой поток $q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки $V$ , см/с | Количество теплоты $Q$ , Дж | Глубина следа, мкм | Площадь следа, мкм <sup>2</sup> |
|----|--------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------|---------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 9                             | 6111                        | $108 \pm 5$        | $21781 \pm 100$                 |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 9166                        | $85 \pm 5$         | $15341 \pm 100$                 |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 12500                       | $73 \pm 5$         | $9752 \pm 100$                  |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 25000                       | $53 \pm 5$         | $5879 \pm 100$                  |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 15000                       | $65 \pm 5$         | $8275 \pm 100$                  |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 30000                       | $45 \pm 5$         | $5126 \pm 100$                  |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 23334                       | $56 \pm 5$         | $6138 \pm 100$                  |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 46666                       | $42 \pm 5$         | $4788 \pm 100$                  |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 26667                       | $51 \pm 5$         | $5422 \pm 100$                  |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 53334                       | $38 \pm 5$         | $4554 \pm 100$                  |

Установлено, что с увеличением количества теплоты, подводимой к образцам в результате плазменной обработки, глубина и площадь следа износа от штифта, при испытании на CSEM TRIBOMETR, уменьшается. Такой результат связан с тем, что в процессе термического воздействия на древесину происходит снижение внутренних напряжений и деформации за счет уменьшения влаги и стабилизации структуры, что способствует росту твёрдости и износостойкости приповерхностного слоя древесины [129, 130]. Также с увеличением количества теплоты формируется углеродный (обугленный) слой,



который повышает сопротивление механическому воздействию и истиранию [131].

На рисунках 4.8, 4.9 представлены профили поверхности для образцов из лиственницы, полученные по результатам испытаний на CSEM TRIBOMETR, а в таблице 4.5 – результаты статистической обработки полученных данных.

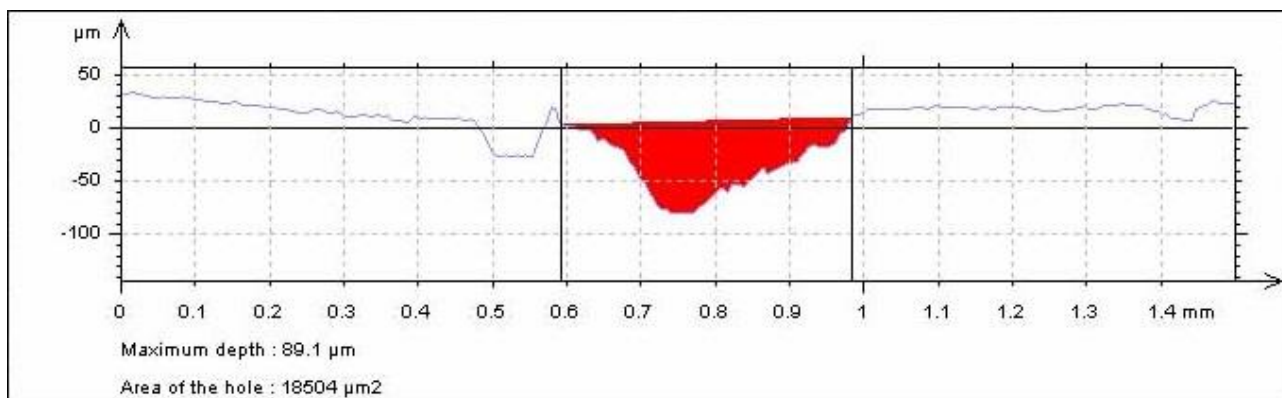


Рисунок 4.8 – Профиль поверхности образца из исходной лиственницы после испытания на CSEM TRIBOMETR

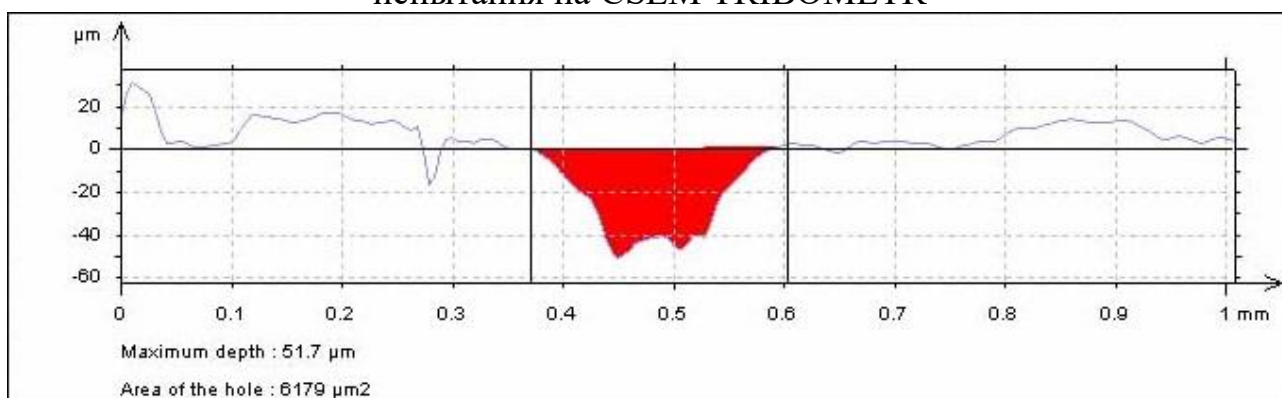


Рисунок 4.9 – Профиль поверхности образца из лиственницы, обработанного потоком низкотемпературной плазмы после испытания на CSEM TRIBOMETR

Таблица 4.5 – Результаты испытаний на износ (CSEM TRIBOMETR) образцов из лиственницы в зависимости от режима плазменной обработки

| № | Удельный тепловой поток $q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки $V$ , см/с | Количество теплоты $Q$ , Дж | Глубина следа, мкм | Площадь следа, мкм <sup>2</sup> |
|---|--------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------|---------------------------------|
| 1 | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 9                             | 6111                        | $88 \pm 4$         | $18500 \pm 70$                  |
| 2 | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 9166                        | $85 \pm 4$         | $14750 \pm 70$                  |
| 3 | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 12500                       | $78 \pm 4$         | $9141 \pm 70$                   |
| 4 | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 25000                       | $46 \pm 4$         | $5798 \pm 70$                   |
| 5 | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 15000                       | $52 \pm 4$         | $6181 \pm 70$                   |

Продолжение таблицы 4.5

| №  | Удельный<br>тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость<br>обработки<br>$V$ , см/с | Количество<br>теплоты<br>$Q$ , Дж | Глубина<br>следа,<br>мкм | Площадь<br>следа,<br>мкм <sup>2</sup> |
|----|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 30000                             | $43 \pm 4$               | $5331 \pm 70$                         |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 23334                             | $48 \pm 4$               | $5958 \pm 70$                         |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 46666                             | $40 \pm 4$               | $5074 \pm 70$                         |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 26667                             | $44 \pm 4$               | $5546 \pm 70$                         |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 53334                             | $39 \pm 4$               | $4899 \pm 70$                         |

Для образцов из лиственницы, так же, как и для образцов из сосны, заметно снижение износа поверхности штифтом после обработки потоком низкотемпературной плазмы.

На рисунках 4.10, 4.11 представлены профили поверхности для образцов из ели, полученные по результатам испытаний на CSEM TRIBOMETR, а в таблице 4.6 – результаты статистической обработки полученных данных.

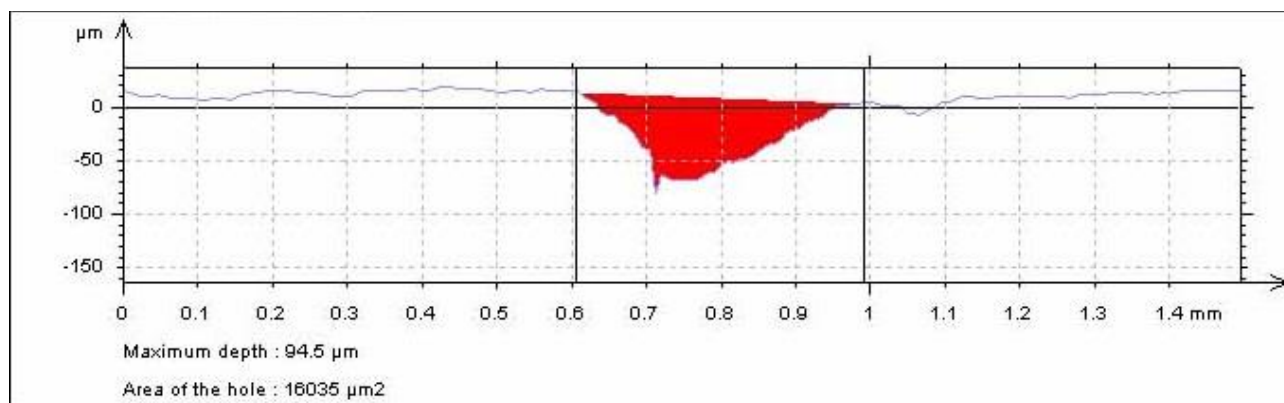


Рисунок 4.10 – Профиль поверхности образца из исходной ели после испытания на CSEM TRIBOMETR



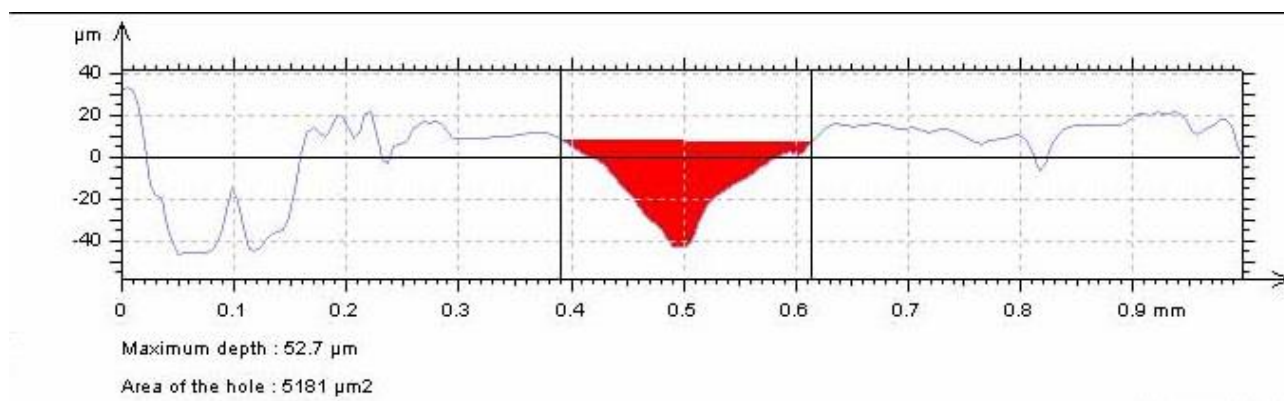


Рисунок 4.11 – Профиль поверхности образца из ели, обработанного потоком низкотемпературной плазмы после испытания на CSEM TRIBOMETER

Таблица 4.6 – Результаты испытаний на износ (CSEM TRIBOMETER) образцов из ели в зависимости от режима плазменной обработки

| №  | Удельный тепловой поток $q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки $V$ , см/с | Количество теплоты $Q$ , Дж | Глубина следа, мкм | Площадь следа, мкм <sup>2</sup> |
|----|--------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------|---------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 9                             | 6111                        | $97 \pm 5$         | $16057 \pm 100$                 |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 9166                        | $87 \pm 5$         | $11254 \pm 100$                 |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 12500                       | $74 \pm 5$         | $7436 \pm 100$                  |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 25000                       | $47 \pm 5$         | $4753 \pm 100$                  |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 15000                       | $59 \pm 5$         | $5475 \pm 100$                  |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 30000                       | $42 \pm 5$         | $4452 \pm 100$                  |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 23334                       | $50 \pm 5$         | $4974 \pm 100$                  |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 46666                       | $39 \pm 5$         | $4366 \pm 100$                  |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 26667                       | $46 \pm 5$         | $4598 \pm 100$                  |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 53334                       | $37 \pm 5$         | $4258 \pm 100$                  |

Для образцов из ели также наблюдается увеличение износостойкости после плазменной обработки. При повышении количества теплоты, подводимой к образцам в результате плазменной обработки, увеличивается глубина обработанной древесины с повышенной износостойкостью.

#### 4.2.3 Влияние плазменной обработки на прочность древесины при сжатии

По результатам испытаний древесины на прочность при сжатии строятся кривые в координатах «деформация – напряжение». На рисунке 4.12

схематически представлена типичная деформационная кривая образца древесины при сжатии.

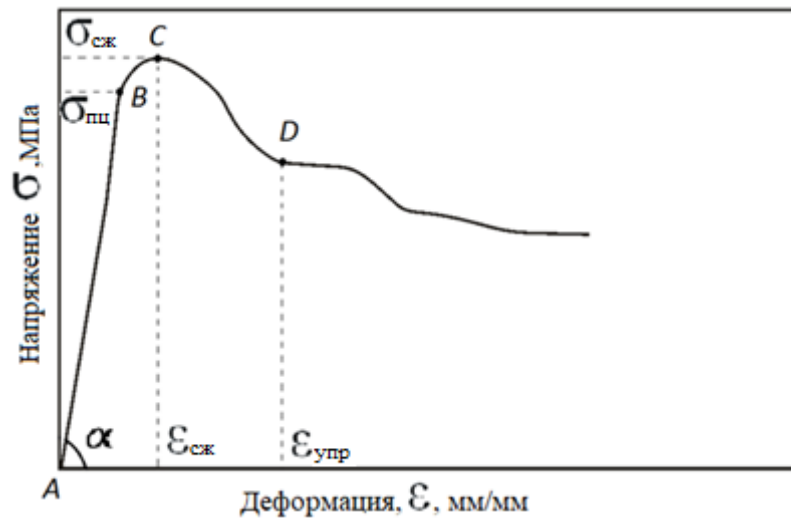


Рисунок 4.12. – Схематическое представление типичных деформационных кривых в координатах «деформация – напряжения» образцов из древесины:  $\sigma_{сж}$  – предел прочности при сжатии;  $\sigma_{пц}$  – предел пропорциональности;  $\varepsilon_{сж}$  – деформация, при которой происходит достижение предела прочности;  $\varepsilon_{упр}$  – деформация, при которой происходит временное упрочнение образца

На рисунке 4.13 приведены деформационные кривые, полученные при сжатии образцов из сосны. Представлены результаты для исходной древесины до плазменной обработки и после плазменной обработки, которые сравнивались с результатами, полученными для древесины, обработанной газозвдушной горелкой. Эти деформационные кривые статистически обработаны, и результаты этой обработки приведены в таблице 4.7.

Анализ полученных данных показывает, что обработка как потоком низкотемпературной плазмы, так и газозвдушной горелкой при условии достижения схожих характеристик поверхности древесины не оказывает влияния на прочность древесины сосны при сжатии.

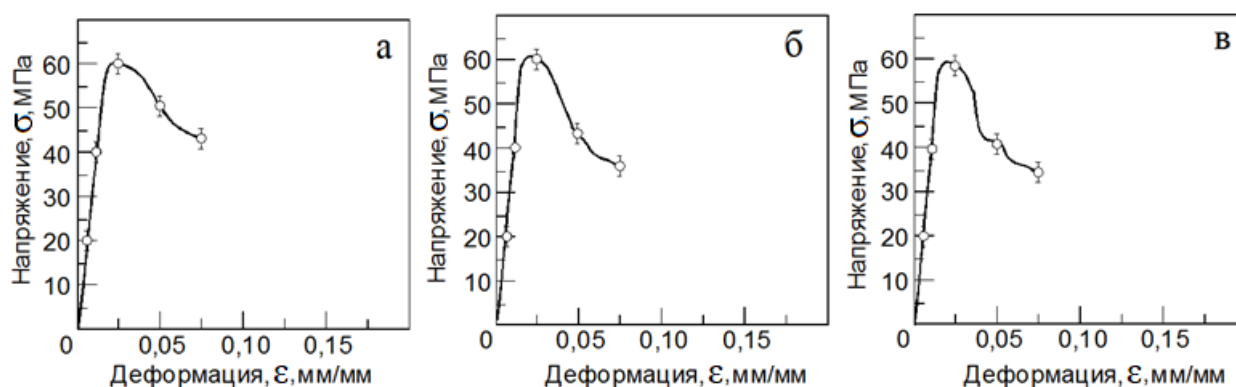


Рисунок 4.13 – Зависимость деформации от напряжения для образцов, изготовленных из сосны: *а* – необработанные образцы; *б* – обработанные газовой горелкой; *в* – обработанные энергией плазмы

Таблица 4.7 – Оценка механических характеристик образцов из сосны

| № | Вид обработки образцов | Модуль упругости $E$ , МПа | Деформация разрушения $\epsilon_{сж}$ , мм/мм | Предел прочности $\sigma_{сж}$ , МПа |
|---|------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | Необработанные         | $4540 \pm 330$             | $0,017 \pm 0,003$                             | $60 \pm 3$                           |
| 2 | Плазменная             | $4498 \pm 330$             | $0,017 \pm 0,003$                             | $59 \pm 3$                           |
| 3 | Горелка                | $4505 \pm 330$             | $0,017 \pm 0,003$                             | $61 \pm 3$                           |

Анализ полученных данных показывает, что обработка как потоком низкотемпературной плазмы, так и газовой горелкой при условии достижения схожих характеристик поверхности древесины не оказывает влияния на прочность древесины сосны при сжатии.

В таблице 4.8 представлены механические характеристики образцов из сосны в зависимости от режима обработки потоком низкотемпературной плазмы. По результатам статистической обработки построены графики зависимости значения предела прочности при сжатии от режима обработки, представленные на рисунке 4.14.

Таблица 4.8 – Механические характеристики образцов из сосны в зависимости от режима обработки

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

В результате анализа полученных данных установлено, что обработка древесины сосны потоком низкотемпературной плазмы при рассмотренных параметрах не оказывает влияния на предел прочности при сжатии.

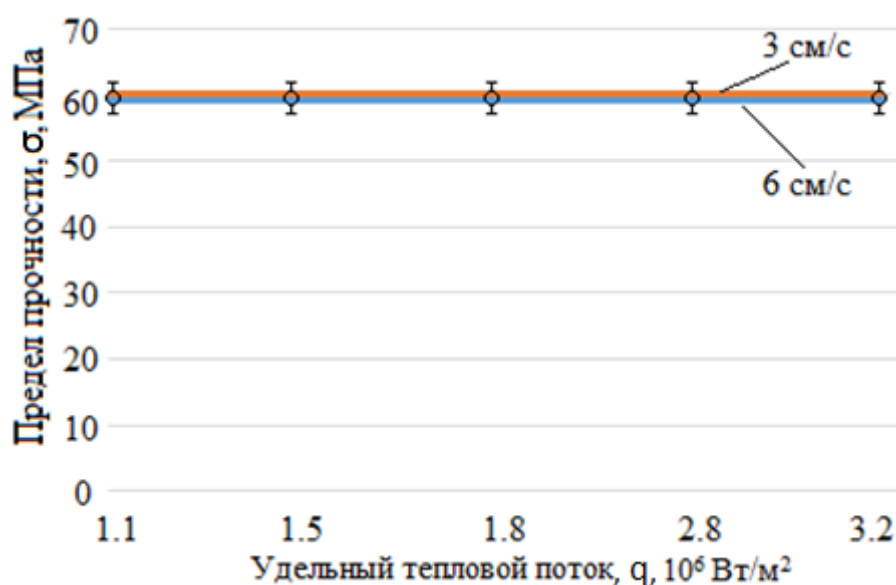


Рисунок 4.14 – Зависимость значения предела прочности при сжатии от режима обработки для образцов из сосны

На рисунке 4.15 представлены деформационные кривые в координатах «напряжение – деформация» для образцов из лиственницы.

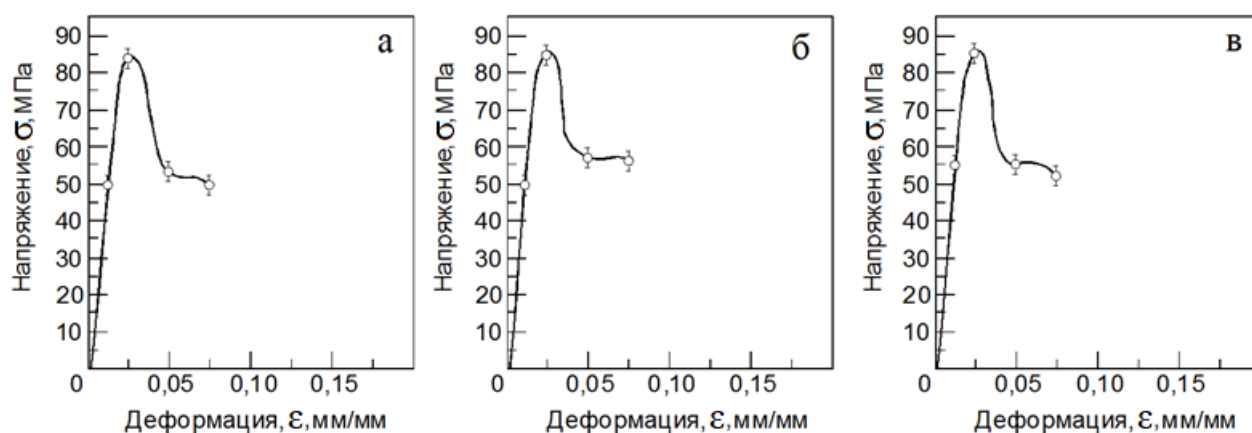


Рисунок 4.15 – Зависимость деформации от напряжения для образцов, изготовленных из лиственницы: *а* – необработанные образцы; *б* – обработанные газовой горелкой; *в* – обработанные энергией плазмы

Результаты статистической обработки деформационных кривых из каждой серии образцов из лиственницы представлены в таблице 4.9. Анализ полученных данных показывает, что обработка как потоком низкотемпературной плазмы, так и газовой горелкой при условии достижения схожих характеристик поверхности древесины не оказывают влияния на прочность древесины лиственницы при сжатии.

Таблица 4.9 – Оценка механических характеристик образцов из лиственницы

| № | Вид обработки образцов | Модуль упругости $E$ , МПа | Деформация разрушения $\epsilon_{сж}$ , мм/мм | Предел прочности $\sigma_{сж}$ , МПа |
|---|------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | Необработанные         | $5777 \pm 330$             | $0,019 \pm 0,003$                             | $86 \pm 3$                           |
| 2 | Плазменная             | $5715 \pm 330$             | $0,020 \pm 0,003$                             | $87 \pm 3$                           |
| 3 | Горелка                | $5699 \pm 330$             | $0,020 \pm 0,003$                             | $87 \pm 3$                           |

В таблице 4.10 представлены механические характеристики образцов из лиственницы в зависимости от режима обработки потоком низкотемпературной плазмы.

Таблица 4.10 – Механические характеристики образцов из лиственницы в зависимости от режима обработки

| №  | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Деформация разрушения<br>$\varepsilon_{\text{сж}}$ , мм/мм | Предел прочности<br>$\sigma_{\text{сж}}$ , МПа |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 9                                | 6111                           | $0,019 \pm 0,003$                                          | $86 \pm 3$                                     |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 9166                           | $0,019 \pm 0,003$                                          | $87 \pm 3$                                     |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 12500                          | $0,020 \pm 0,003$                                          | $87 \pm 3$                                     |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 25000                          | $0,019 \pm 0,003$                                          | $87 \pm 3$                                     |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 15000                          | $0,020 \pm 0,003$                                          | $86 \pm 3$                                     |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 30000                          | $0,020 \pm 0,003$                                          | $86 \pm 3$                                     |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 23334                          | $0,020 \pm 0,003$                                          | $87 \pm 3$                                     |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 46666                          | $0,021 \pm 0,003$                                          | $86 \pm 3$                                     |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 26667                          | $0,020 \pm 0,003$                                          | $86 \pm 3$                                     |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 53334                          | $0,021 \pm 0,003$                                          | $86 \pm 3$                                     |

В результате анализа полученных данных установлено, что обработка древесины лиственницы потоком низкотемпературной плазмы при всех рассмотренных параметрах не оказывает влияния на предел прочности при сжатии.

На рисунке 4.16 представлены деформационные кривые в координатах «напряжение – деформация» для образцов из ели.

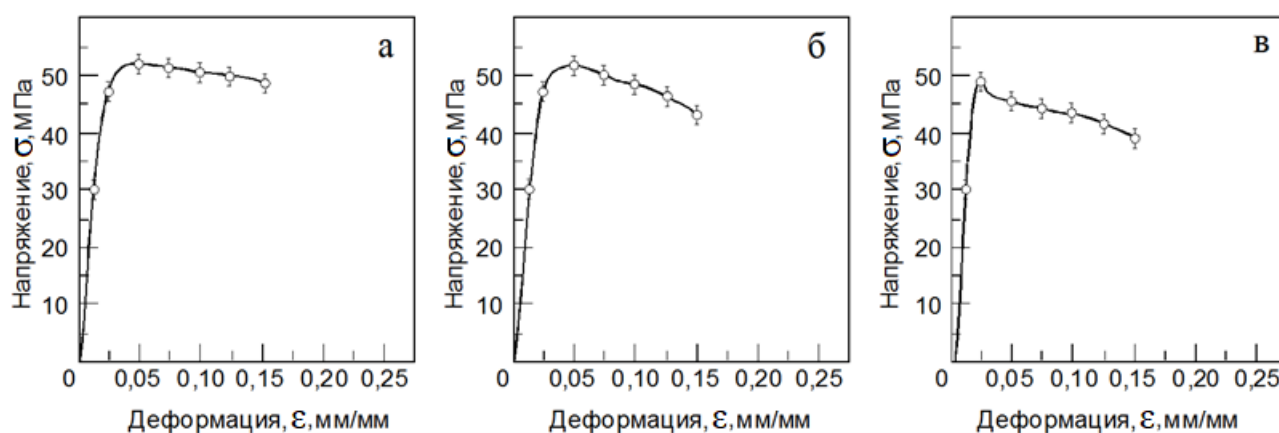


Рисунок 4.16 – Зависимость деформации от напряжения для образцов, изготовленных из ели: а – необработанные образцы; б – обработанные газовой горелкой; в – обработанные энергией плазмы

Результаты статистической обработки деформационных кривых из каждой серии образцов из ели представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Оценка механических характеристик образцов из ели

| № | Вид обработки образцов | Модуль упругости $E$ , МПа | Деформация разрушения $\varepsilon_{сж}$ , мм/мм | Предел прочности $\sigma_{сж}$ , МПа |
|---|------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | Необработанные         | $3026 \pm 330$             | $0,049 \pm 0,003$                                | $52 \pm 3$                           |
| 2 | Плазменная             | $3864 \pm 330$             | $0,025 \pm 0,003$                                | $49 \pm 3$                           |
| 3 | Горелка                | $3125 \pm 330$             | $0,051 \pm 0,003$                                | $52 \pm 3$                           |

Из рассмотренных сортов древесины у ели отмечается снижение значения деформации разрушения в  $\sim 2$  раза. Это происходит за счет уменьшения количества гемицеллюлоз, выступающих в качестве пластификаторов древесины [132–134]. Поскольку ель, из рассмотренных сортов древесины, обладает наименьшим количеством гемицеллюлоз, то их деструкция в результате термического воздействия наиболее сильно влияет на значение деформации.

В таблице 4.12 представлены механические характеристики образцов из ели в зависимости от режима обработки потоком низкотемпературной плазмы.

Таблица 4.12 – Механические характеристики образцов из ели в зависимости от режима обработки

| №  | Удельный тепловой поток $q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки $V$ , см/с | Количество теплоты $Q$ , Дж | Деформация разрушения $\varepsilon_{сж}$ , мм/мм | Предел прочности $\sigma_{сж}$ , МПа |
|----|--------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 9                             | 6111                        | $0,041 \pm 0,003$                                | $51 \pm 3$                           |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 9166                        | $0,036 \pm 0,003$                                | $51 \pm 3$                           |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 12500                       | $0,025 \pm 0,003$                                | $50 \pm 3$                           |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 25000                       | $0,020 \pm 0,003$                                | $49 \pm 3$                           |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 15000                       | $0,021 \pm 0,003$                                | $50 \pm 3$                           |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 30000                       | $0,020 \pm 0,003$                                | $49 \pm 3$                           |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 23334                       | $0,020 \pm 0,003$                                | $50 \pm 3$                           |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 46666                       | $0,019 \pm 0,003$                                | $48 \pm 3$                           |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 26667                       | $0,020 \pm 0,003$                                | $49 \pm 3$                           |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 53334                       | $0,017 \pm 0,003$                                | $48 \pm 3$                           |

В результате анализа полученных данных установлено, что обработка древесины ели потоком низкотемпературной плазмы при всех рассмотренных параметрах не оказывает влияния на предел прочности при сжатии. Однако древесина становится более хрупкой за счет снижения количества пластификаторов – гемицеллюлоз.

#### 4.2.4 Влияние плазменной обработки на прочность древесины при изгибе

По результатам испытаний образцов из древесины сосны на статический изгиб построены графики зависимости прогиба от напряжения (рисунок 4.17). Результаты обработки полученных данных представлены в виде средних значений в таблице 4.13.

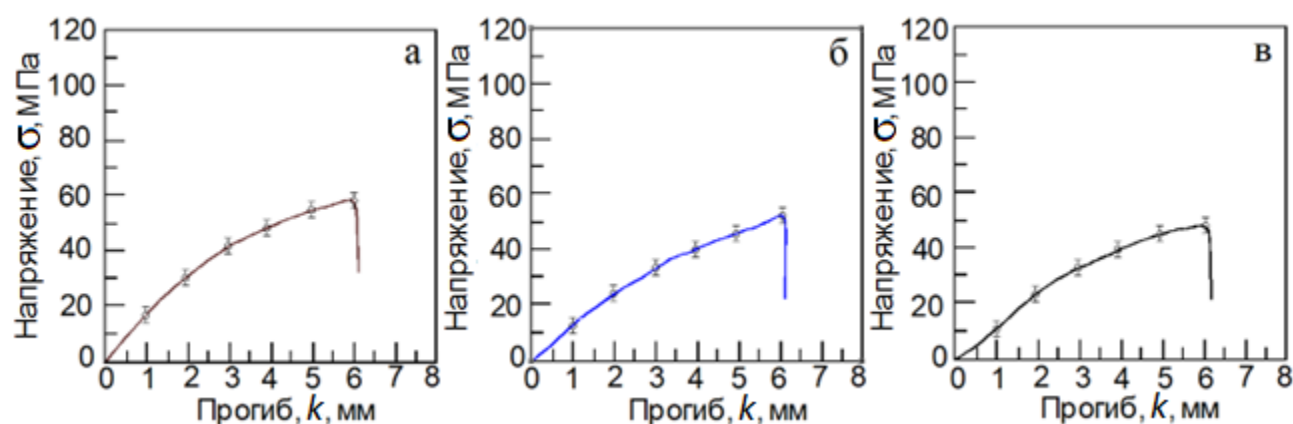


Рисунок 4.17 – Зависимость прогиба от напряжения для образцов, изготовленных из сосны: *а* – необработанные образцы; *б* – обработанные газовой горелкой; *в* – обработанные энергией плазмы

Таблица 4.13 – Оценка механических характеристик образцов из сосны

| № | Сорт древесины | Вид обработки образцов | Размеры поперечного сечения образцов, мм |    | Предел прочности $\sigma_{изг}$ , МПа |
|---|----------------|------------------------|------------------------------------------|----|---------------------------------------|
|   |                |                        | b                                        | h  |                                       |
| 1 | Сосна          | Необработанные         | 20                                       | 20 | $57 \pm 5$                            |
| 2 |                | Горелка                | 20                                       | 20 | $53 \pm 5$                            |
| 3 |                | Плазменная             | 20                                       | 20 | $50 \pm 5$                            |



В таблице 4.14 представлены значения предела прочности при изгибе для образцов из сосны для разных параметров плазменной обработки. Анализ полученных данных испытаний образцов из сосны на изгиб показывает, что обработка как потоком низкотемпературной плазмы, так и обработка газоздушнoй горелкой приводит к снижению прочности при изгибе на 5–10 %. Такой эффект связан с термической деструкцией связующего компонента – гемицеллюлозы. И если уменьшение количества гемицеллюлозы не оказывает влияния на прочность при сжатии, то значение прочности при изгибе реагирует на изменение количества гемицеллюлозы. Снижение предела прочности прямо пропорционально увеличению количества подведенной к образцу в результате плазменной обработки теплоты, которая влияет на объем и степень термодеструкции приповерхностного слоя древесины и которая зависит от величины удельного теплового потока, а также скорости обработки.

Таблица 4.14 – Зависимость предела прочности при изгибе от параметров плазменной обработки образцов из сосны

| №  | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Предел прочности<br>$\sigma_{\text{изг}}$ , МПа |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 9                                | 6111                           | $53 \pm 5$                                      |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 9166                           | $52 \pm 5$                                      |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 12500                          | $51 \pm 5$                                      |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 25000                          | $50 \pm 5$                                      |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 15000                          | $51 \pm 5$                                      |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 30000                          | $49 \pm 5$                                      |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 23334                          | $50 \pm 5$                                      |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 46666                          | $48 \pm 5$                                      |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 26667                          | $50 \pm 5$                                      |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 53334                          | $48 \pm 5$                                      |

На рисунке 4.18 представлены графики зависимости напряжения от значения прогиба для образцов из лиственницы. Результаты статистической

обработки полученных данных представлены в виде средних значений в таблице 4.15.

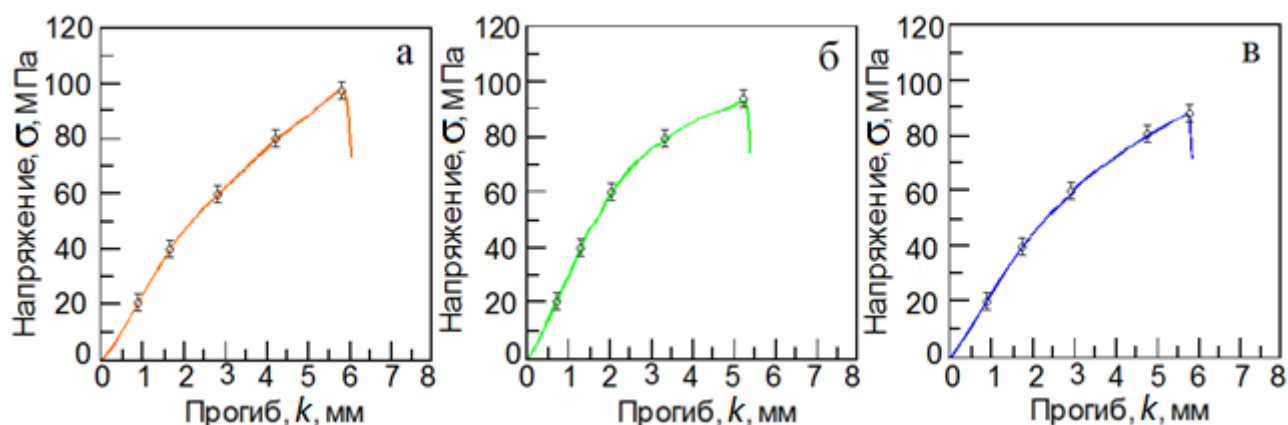


Рисунок 4.18 – Зависимость прогиба от напряжения для образцов, изготовленных из лиственницы: *а* – необработанные образцы; *б* – обработанные газовой горелкой; *в* – обработанные энергией плазмы

Таблица 4.15 – Оценка механических характеристик образцов из лиственницы

| № | Сорт древесины | Вид обработки образцов | Размеры поперечного сечения образцов, мм |          | Предел прочности, $\sigma_{изг}$ , МПа |
|---|----------------|------------------------|------------------------------------------|----------|----------------------------------------|
|   |                |                        | <i>b</i>                                 | <i>h</i> |                                        |
| 1 | Лиственница    | Необработанные         | 20                                       | 20       | $97 \pm 5$                             |
| 2 |                | Горелка                | 20                                       | 20       | $94 \pm 5$                             |
| 3 |                | Плазменная             | 20                                       | 20       | $90 \pm 5$                             |

В таблице 4.16 представлены значения предела прочности при изгибе образцов из лиственницы для разных параметров плазменной обработки.

Для лиственницы аналогично тому, что наблюдается у сосны, отмечается заметное снижение предела прочности при изгибе после проведения обработки как газовой горелкой, так и потоком низкотемпературной плазмы. При этом эффект снижения прочности при изгибе, вызванный плазменной обработкой, оказывается более выраженным по сравнению с обработкой горелкой. Это связано с тем, что при плазменной обработке воздействуют более высокие удельные тепловые потоки, которые оказывают более сильное влияние на структуру древесины и, соответственно, на её механические свойства.

Таблица 4.16 – Зависимость предела прочности при изгибе от параметров плазменной обработки образцов из лиственницы

| №  | Удельный тепловой поток $q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки $V$ , см/с | Количество теплоты $Q$ , Дж | Предел прочности $\sigma_{\text{изг}}$ , МПа |
|----|--------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 9                             | 6111                        | $94 \pm 5$                                   |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 9166                        | $94 \pm 5$                                   |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 12500                       | $93 \pm 5$                                   |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 25000                       | $90 \pm 5$                                   |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 15000                       | $93 \pm 5$                                   |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 30000                       | $90 \pm 5$                                   |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 23334                       | $91 \pm 5$                                   |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 46666                       | $89 \pm 5$                                   |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 26667                       | $90 \pm 5$                                   |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 53334                       | $88 \pm 5$                                   |

На рисунке 4.19 представлены графики зависимости напряжения от значения прогиба для образцов из ели. Результаты обработки графиков приведены в виде средних значений в таблице 4.17.

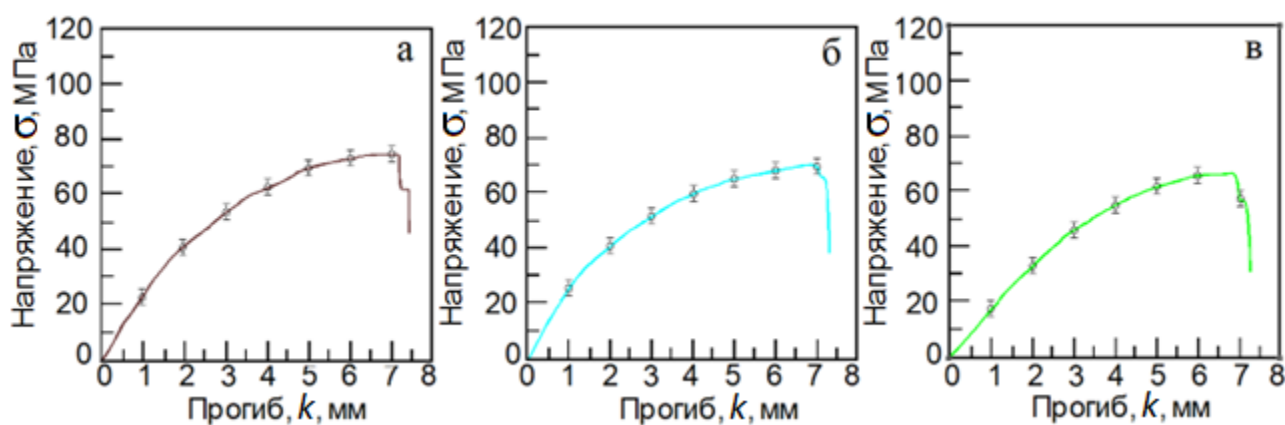


Рисунок 4.19 – Зависимость прогиба от напряжения для образцов, изготовленных из ели: *а* – необработанные образцы; *б* – обработанные газоздушнoй горелкой; *в* – обработанные энергией плазмы

Таблица 4.17 – Оценка механических характеристик образцов из ели

| № | Сорт древесины | Вид обработки образцов | Размеры поперечного сечения образцов, мм |     | Предел прочности, $\sigma_{изг}$ , МПа |
|---|----------------|------------------------|------------------------------------------|-----|----------------------------------------|
|   |                |                        | $b$                                      | $h$ |                                        |
| 1 | Ель            | Необработанные         | 20                                       | 20  | $75 \pm 2$                             |
| 2 |                | Горелка                | 20                                       | 20  | $70 \pm 3$                             |
| 3 |                | Плазменная             | 20                                       | 20  | $68 \pm 3$                             |

В таблице 4.18 представлены значения предела прочности при изгибе образцов из ели для разных параметров плазменной обработки. Эффект снижения предела прочности при изгибе, так же, как и у предыдущих образцов, отмечается и у ели. Такой результат не является уникальным только для обработки потоком плазмы или газозвушной горелкой, а является типичным для термической обработки древесины. Основным фактором, который определяет снижение прочности древесины, выступает именно количество теплоты, подведенной к древесине в результате плазменной обработки, которая в большей степени зависит от удельного теплового потока и времени воздействия. При повышении температуры происходят химические изменения в структуре древесины, что приводит к ухудшению механических свойств, в том числе прочности на изгиб [135, 136]. Аналогичные эффекты наблюдаются и при высокотемпературной сушке древесины, когда даже относительно мягкие режимы сушки могут вызывать снижение прочности материала, а при более высоких температурах – заметное потемнение и ухудшение прочностных характеристик [137].

Таблица 4.18 – Зависимость предела прочности при изгибе от параметров плазменной обработки образцов из ели

| №  | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Предел прочности<br>$\sigma_{\text{изг}}$ , МПа |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 9                                | 6111                           | $71 \pm 5$                                      |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 9166                           | $70 \pm 5$                                      |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 12500                          | $69 \pm 5$                                      |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 25000                          | $68 \pm 5$                                      |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 15000                          | $69 \pm 5$                                      |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 30000                          | $67 \pm 5$                                      |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 23334                          | $68 \pm 5$                                      |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 46666                          | $66 \pm 5$                                      |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 26667                          | $68 \pm 5$                                      |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 53334                          | $65 \pm 5$                                      |

Для уточнения полученных результатов проводились дополнительные испытания: нормативная документация предусматривает испытание на изгиб для образцов сечением 20×20 мм, длиной 300 мм. Предполагается, что за счет высокого количества теплоты, распределения температурных полей вглубь древесины и сравнительно небольшого размера образцов объем обработанной древесины для таких образцов составляет порядка 40 %. При увеличении поперечного сечения до 40×40 мм и неизменной длине 300 мм объем обработанной древесины составляет уже порядка 20 %, а при увеличении сечения до 50×50 мм объем обработанной древесины составляет ~15 %. С учетом этого факта было решено провести испытания на образцах размером 50×50 мм и длиной 500 мм. Результаты проведенных испытаний представлены в таблицах 4.19–4.21.

Таблица 4.19 – Зависимость предела прочности при изгибе от параметров  
плазменной обработки образцов из сосны

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

Таблица 4.20 – Зависимость предела прочности при изгибе от параметров  
плазменной обработки образцов из лиственницы

| №  | Удельный<br>тепловой<br>поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость<br>обработки<br>$V$ , см/с | Количество<br>теплоты<br>$Q$ , Дж | Предел<br>прочности<br>$\sigma_{\text{изг}}$ ,<br>МПа |
|----|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                                | 9                                   | 6111                              | $94 \pm 5$                                            |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                                | 6                                   | 9166                              | $94 \pm 5$                                            |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                                | 6                                   | 12500                             | $94 \pm 5$                                            |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                                | 3                                   | 25000                             | $93 \pm 5$                                            |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                                | 6                                   | 15000                             | $94 \pm 5$                                            |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                                | 3                                   | 30000                             | $92 \pm 5$                                            |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                                | 6                                   | 23334                             | $93 \pm 5$                                            |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                                | 3                                   | 46666                             | $91 \pm 5$                                            |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                                | 6                                   | 26667                             | $92 \pm 5$                                            |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                                | 3                                   | 53334                             | $91 \pm 5$                                            |

Таблица 4.21 – Зависимость предела прочности при изгибе от параметров плазменной обработки образцов из ели

| №  | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Предел прочности<br>$\sigma_{\text{изг}}$ , МПа |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 9                                | 6111                           | $70 \pm 5$                                      |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 9166                           | $70 \pm 5$                                      |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 12500                          | $70 \pm 5$                                      |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 25000                          | $68 \pm 5$                                      |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 15000                          | $69 \pm 5$                                      |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 30000                          | $67 \pm 5$                                      |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 23334                          | $68 \pm 5$                                      |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 46666                          | $66 \pm 5$                                      |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 26667                          | $68 \pm 5$                                      |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 53334                          | $66 \pm 5$                                      |

Результаты испытаний подтверждают предположение о том, что снижение предела прочности при изгибе зависит не только от величины подведенной к образцу теплоты в результате плазменной обработки, которая зависит от удельного теплового потока и времени воздействия (скорости обработки), но и от соотношения объема обработанной древесины к объему исходной древесины. В свою очередь, объем обработанной древесины напрямую зависит от количества теплоты, подведенной к древесине. Результаты испытаний образцов с размерами, указанными в нормативном документе, отличаются от результатов испытаний образцов большего размера для всех рассмотренных сортов древесины. Установлено, что при повышении сечения испытываемой древесины до 50×50 мм обработка потоком низкотемпературной плазмы не оказывает значительного влияния на предел прочности при изгибе, т. к. объем обработанной древесины относительно всего объема изделия уменьшается. Поскольку изделия сечением 20×20 мм и длиной 300 мм в качестве конструктивных элементов не применяются, необходимости введения коэффициента запаса прочности нет.

#### 4.2.5 Влияние плазменной обработки изделий из древесины на прочность клеевого соединения

В настоящее время большим спросом пользуются изделия из клееной древесины. Такие изделия позволяют возводить большепролетные конструкции и/или конструкции с уникальными архитектурными формами [138, 139]. Также одним из преимуществ клееной древесины является возможность использования для ее производства низкосортного сырья [140]. Учитывая популярность применения клееной древесины, а также возможное влияние обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы на прочность при скалывании, необходимо было провести испытания по определению влияния обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы на прочность при скалывании.

На рисунке 4.20 представлены графики зависимости деформации от напряжения, полученные в результате испытания образцов из сосны на скалывание клеевого соединения.

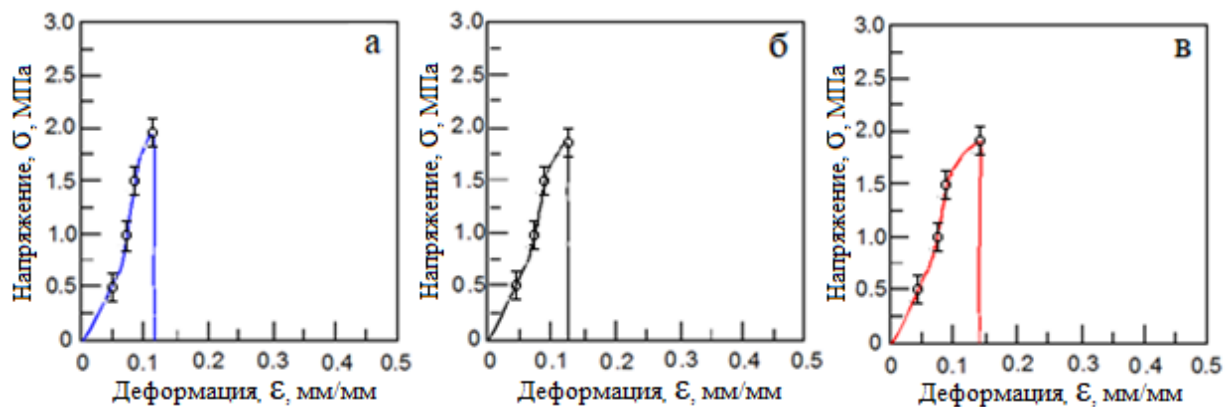


Рисунок 4.20 – Зависимость деформации от напряжения для образцов, изготовленных из сосны: *а* – необработанные образцы; *б* – обработанные газовоздушной горелкой; *в* – обработанные потоком низкотемпературной плазмы

Результаты обработки графиков зависимости деформации от напряжения для образцов из сосны приведены в виде средних значений в таблице 4.22.



Таблица 4.22 – Оценка механических характеристик образцов из сосны

| № | Сорт древесины | Влажность образцов, % | Вид обработки образцов | Предел прочности $\sigma_{ск}$ , МПа | Деформация разрушения $\epsilon_{ск}$ , мм/мм |
|---|----------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1 | Сосна          | 12                    | Необработанные         | $1,9 \pm 0,3$                        | $0,12 \pm 0,03$                               |
| 2 |                | 12                    | Плазменная             | $1,9 \pm 0,3$                        | $0,14 \pm 0,03$                               |
| 3 |                | 12                    | Горелка                | $1,9 \pm 0,3$                        | $0,13 \pm 0,03$                               |

Установлено, что предел прочности клеевого соединения у образцов из исходной древесины сосны, а также у образцов из древесины, обработанной газоздушнoй горелкой и потоком низкотемпературной плазмы, одинаков. Разрушение образцов происходит не по клеевому соединению, а по древесине, что свидетельствует о высокой прочности клеевого шва.

В таблице 4.23 представлены значения предела прочности при скалывании образцов из сосны в зависимости от параметров обработки потоком низкотемпературной плазмы.

Таблица 4.23 – Механические характеристики образцов из сосны в зависимости от режима обработки при испытании прочности клеевого соединения

| №  | Удельный тепловой поток $q_{max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки $V$ , см/с | Количество теплоты $Q$ , Дж | Деформация разрушения $\epsilon_{ск}$ , мм/мм | Предел прочности $\sigma_{ск}$ , МПа |
|----|-------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                      | 9                             | 6111                        | $0,11 \pm 0,03$                               | $1,9 \pm 0,3$                        |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                      | 6                             | 9166                        | $0,11 \pm 0,03$                               | $1,9 \pm 0,3$                        |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                      | 6                             | 12500                       | $0,12 \pm 0,03$                               | $1,9 \pm 0,3$                        |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                      | 3                             | 25000                       | $0,14 \pm 0,03$                               | $1,9 \pm 0,3$                        |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                      | 6                             | 15000                       | $0,13 \pm 0,03$                               | $1,9 \pm 0,3$                        |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                      | 3                             | 30000                       | $0,14 \pm 0,03$                               | $1,8 \pm 0,3$                        |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                      | 6                             | 23334                       | $0,14 \pm 0,03$                               | $1,9 \pm 0,3$                        |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                      | 3                             | 46666                       | $0,15 \pm 0,03$                               | $1,8 \pm 0,3$                        |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                      | 6                             | 26667                       | $0,14 \pm 0,03$                               | $1,9 \pm 0,3$                        |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                      | 3                             | 53334                       | $0,15 \pm 0,03$                               | $1,8 \pm 0,3$                        |

После статистической обработки результатов установлено, что обработка древесины сосны потоком низкотемпературной плазмы не оказывает влияния на прочность клееной древесины при скалывании.

На рисунке 4.21 представлены графики зависимости деформации от напряжения, полученные в результате испытания образцов из лиственницы на скалывание клеевого соединения.

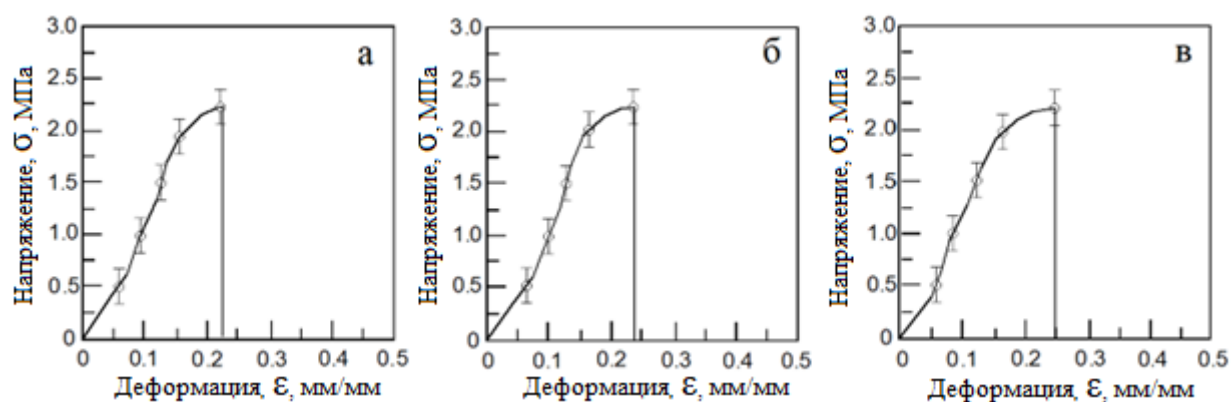


Рисунок 4.21 – Зависимость деформации от напряжения для образцов, изготовленных из лиственницы: *а* – необработанные образцы; *б* – обработанные газовой горелкой; *в* – обработанные потоком низкотемпературной плазмы

Результаты обработки графиков зависимости деформации от напряжения для образцов из лиственницы приведены в виде средних значений в таблице 4.24.

Таблица 4.24 – Оценка механических характеристик образцов из сосны

| № | Сорт древесины | Влажность образцов, % | Вид обработки образцов | Предел прочности $\sigma_{ск}$ , МПа | Деформация разрушения $\epsilon_{ск}$ , мм/мм |
|---|----------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1 | Лиственница    | 12                    | Необработанные         | $2,2 \pm 0,4$                        | $0,22 \pm 0,03$                               |
| 2 |                | 12                    | Плазменная             | $2,2 \pm 0,4$                        | $0,24 \pm 0,03$                               |
| 3 |                | 12                    | Горелка                | $2,2 \pm 0,4$                        | $0,23 \pm 0,03$                               |

Установлено, что предел прочности у образцов из исходной древесины, а также у образцов из древесины, обработанной газовой горелкой и потоком низкотемпературной плазмы, одинаков. Разрушение образцов из лиственницы, так же, как и образцов из сосны, происходит не по клеевому соединению, а по древесине, что свидетельствует о высокой прочности клеевого шва.

В таблице 4.25 представлены значения предела прочности при скалывании образцов из лиственницы в зависимости от параметров обработки потоком низкотемпературной плазмы.

Таблица 4.25 – Механические характеристики образцов из лиственницы в зависимости от режима обработки при испытании прочности клеевого соединения

| №  | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Деформация разрушения<br>$\varepsilon_{\text{ск}}$ , мм/мм | Предел прочности<br>$\sigma_{\text{ск}}$ , МПа |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 9                                | 6111                           | $0,22 \pm 0,03$                                            | $2,2 \pm 0,4$                                  |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 9166                           | $0,22 \pm 0,03$                                            | $2,2 \pm 0,4$                                  |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 12500                          | $0,23 \pm 0,03$                                            | $2,2 \pm 0,4$                                  |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 25000                          | $0,24 \pm 0,03$                                            | $2,2 \pm 0,4$                                  |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 15000                          | $0,23 \pm 0,03$                                            | $2,2 \pm 0,4$                                  |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 30000                          | $0,24 \pm 0,03$                                            | $2,3 \pm 0,4$                                  |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 23334                          | $0,25 \pm 0,03$                                            | $2,2 \pm 0,4$                                  |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 46666                          | $0,25 \pm 0,03$                                            | $2,3 \pm 0,4$                                  |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 26667                          | $0,24 \pm 0,03$                                            | $2,2 \pm 0,4$                                  |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 53334                          | $0,25 \pm 0,03$                                            | $2,3 \pm 0,4$                                  |

После статистической обработки результатов установлено, что обработка древесины лиственницы потоком низкотемпературной плазмы, так же, как и сосны, не оказывает влияния на прочность клеевой древесины при скалывании.

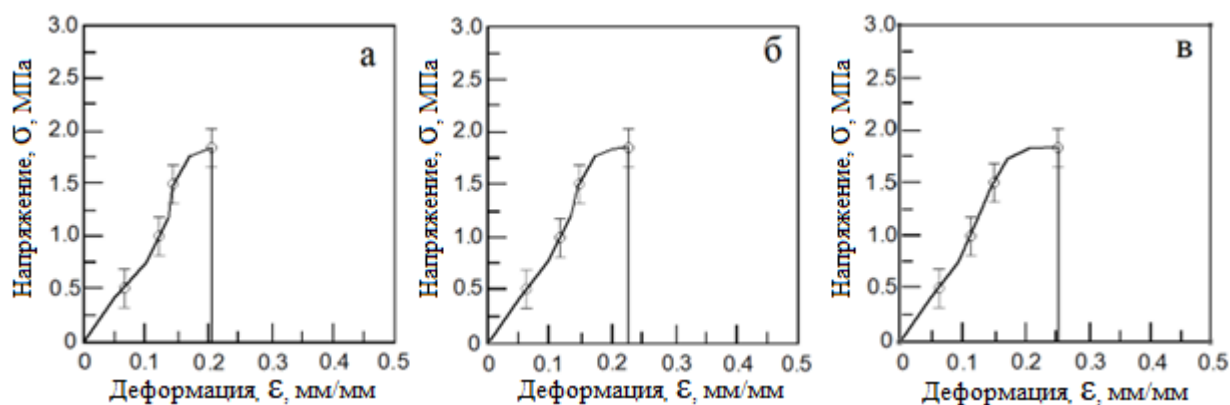


Рисунок 4.22 – Зависимость деформации от напряжения для образцов, изготовленных из ели: *а* – необработанные образцы; *б* – обработанные газовой горелкой; *в* – обработанные потоком низкотемпературной плазмы

На рисунке 4.22 представлены графики зависимости деформации от напряжения, полученные в результате испытания образцов из ели на скалывание

клеевого соединения. Результаты обработки графиков зависимости деформации от напряжения для образцов из лиственницы приведены в виде средних значений в таблице 4.26.

Таблица 4.26 – Оценка механических характеристик образцов из сосны

| № | Сорт древесины | Влажность образцов, % | Вид обработки образцов | Предел прочности $\sigma_{ск}$ , МПа | Деформация разрушения $\varepsilon_{ск}$ , мм/мм |
|---|----------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 1 | Лиственница    | 12                    | Необработанные         | $1,7 \pm 0,4$                        | $0,21 \pm 0,03$                                  |
| 2 |                | 12                    | Плазменная             | $1,7 \pm 0,4$                        | $0,25 \pm 0,03$                                  |
| 3 |                | 12                    | Горелка                | $1,7 \pm 0,4$                        | $0,23 \pm 0,03$                                  |

Установлено, что предел прочности у образцов из исходной древесины, а также у образцов из древесины, обработанной газозвдушной горелкой и потоком низкотемпературной плазмы, одинаков. Разрушение образцов из ели, так же, как и образцов из сосны и лиственницы, происходит по древесине.

В таблице 4.27 представлены значения предела прочности при скалывании образцов из ели в зависимости от параметров обработки потоком низкотемпературной плазмы.

Таблица 4.27 – Механические характеристики образцов из ели в зависимости от режима обработки при испытании прочности клеевого соединения

| №  | Удельный тепловой поток $q_{max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки $V$ , см/с | Количество теплоты $Q$ , Дж | Деформация разрушения $\varepsilon_{ск}$ , мм/мм | Предел прочности $\sigma_{ск}$ , МПа |
|----|-------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                      | 9                             | 6111                        | $0,22 \pm 0,03$                                  | $1,7 \pm 0,4$                        |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                      | 6                             | 9166                        | $0,23 \pm 0,03$                                  | $1,7 \pm 0,4$                        |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                      | 6                             | 12500                       | $0,23 \pm 0,03$                                  | $1,7 \pm 0,4$                        |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                      | 3                             | 25000                       | $0,25 \pm 0,03$                                  | $1,7 \pm 0,4$                        |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                      | 6                             | 15000                       | $0,24 \pm 0,03$                                  | $1,7 \pm 0,4$                        |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                      | 3                             | 30000                       | $0,26 \pm 0,03$                                  | $1,7 \pm 0,4$                        |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                      | 6                             | 23334                       | $0,25 \pm 0,03$                                  | $1,7 \pm 0,4$                        |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                      | 3                             | 46666                       | $0,27 \pm 0,03$                                  | $1,7 \pm 0,4$                        |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                      | 6                             | 26667                       | $0,26 \pm 0,03$                                  | $1,7 \pm 0,4$                        |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                      | 3                             | 53334                       | $0,27 \pm 0,03$                                  | $1,7 \pm 0,4$                        |

После обработки полученных результатов установлено, что обработка древесины ели потоком низкотемпературной плазмы, так же как сосны и лиственницы, не оказывает влияния на прочность клееной древесины при скалывании.

В представленных исследованиях по определению влияния обработки потоком низкотемпературной плазмы на прочность при скалывании использовались образцы, которые склеивались после плазменной обработки. Для установления возможности плазменной обработки уже готовых изделий из клееной древесины также необходимо провести испытания по определению прочности при скалывании для образцов, обработанных потоком низкотемпературной плазмы после склеивания. В таблицах 4.28–4.30 представлены значения предела прочности при скалывании для образцов, обработанных потоком плазмы после склеивания.

Таблица 4.28 – Механические характеристики образцов из сосны в зависимости от режима обработки при испытании прочности клеевого соединения

| №  | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Деформация разрушения<br>$\varepsilon_{\text{ск}}$ , мм/мм | Предел прочности<br>$\sigma_{\text{ск}}$ , МПа |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 9                                | 6111                           | $0,11 \pm 0,03$                                            | $1,9 \pm 0,3$                                  |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 9166                           | $0,11 \pm 0,03$                                            | $1,9 \pm 0,3$                                  |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 12500                          | $0,12 \pm 0,03$                                            | $1,9 \pm 0,3$                                  |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 25000                          | $0,14 \pm 0,03$                                            | $1,9 \pm 0,3$                                  |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 15000                          | $0,13 \pm 0,03$                                            | $1,9 \pm 0,3$                                  |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 30000                          | $0,14 \pm 0,03$                                            | $1,8 \pm 0,3$                                  |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 23334                          | $0,14 \pm 0,03$                                            | $1,9 \pm 0,3$                                  |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 46666                          | $0,15 \pm 0,03$                                            | $1,8 \pm 0,3$                                  |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 26667                          | $0,14 \pm 0,03$                                            | $1,9 \pm 0,3$                                  |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 53334                          | $0,15 \pm 0,03$                                            | $1,8 \pm 0,3$                                  |

Таблица 4.29 – Механические характеристики образцов из лиственницы в зависимости от режима обработки при испытании прочности клеевого соединения

| №  | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Деформация разрушения<br>$\varepsilon_{\text{ск}}$ , мм/мм | Предел прочности<br>$\sigma_{\text{ск}}$ , МПа |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 9                                | 6111                           | $0,22 \pm 0,03$                                            | $2,2 \pm 0,4$                                  |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 9166                           | $0,22 \pm 0,03$                                            | $2,2 \pm 0,4$                                  |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 12500                          | $0,23 \pm 0,03$                                            | $2,2 \pm 0,4$                                  |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 25000                          | $0,24 \pm 0,03$                                            | $2,2 \pm 0,4$                                  |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 15000                          | $0,23 \pm 0,03$                                            | $2,2 \pm 0,4$                                  |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 30000                          | $0,24 \pm 0,03$                                            | $2,3 \pm 0,4$                                  |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 23334                          | $0,25 \pm 0,03$                                            | $2,2 \pm 0,4$                                  |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 46666                          | $0,25 \pm 0,03$                                            | $2,3 \pm 0,4$                                  |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 26667                          | $0,24 \pm 0,03$                                            | $2,2 \pm 0,4$                                  |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 53334                          | $0,25 \pm 0,03$                                            | $2,3 \pm 0,4$                                  |

Таблица 4.30 – Механические характеристики образцов из ели в зависимости от режима обработки при испытании прочности клеевого соединения

| №  | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Деформация разрушения<br>$\varepsilon_{\text{ск}}$ , мм/мм | Предел прочности<br>$\sigma_{\text{ск}}$ , МПа |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 9                                | 6111                           | $0,22 \pm 0,03$                                            | $1,7 \pm 0,4$                                  |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 9166                           | $0,23 \pm 0,03$                                            | $1,7 \pm 0,4$                                  |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 12500                          | $0,23 \pm 0,03$                                            | $1,7 \pm 0,4$                                  |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 25000                          | $0,25 \pm 0,03$                                            | $1,7 \pm 0,4$                                  |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 15000                          | $0,24 \pm 0,03$                                            | $1,7 \pm 0,4$                                  |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 30000                          | $0,26 \pm 0,03$                                            | $1,7 \pm 0,4$                                  |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 23334                          | $0,25 \pm 0,03$                                            | $1,7 \pm 0,4$                                  |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 46666                          | $0,27 \pm 0,03$                                            | $1,7 \pm 0,4$                                  |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 26667                          | $0,26 \pm 0,03$                                            | $1,7 \pm 0,4$                                  |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 53334                          | $0,27 \pm 0,03$                                            | $1,7 \pm 0,4$                                  |

Установлено, что обработка древесины потоком низкотемпературной плазмы, при рассматриваемых параметрах обработки, не оказывает влияния на

прочность клеевого соединения при скалывании. Такой результат актуален для древесины сосны, ели, лиственницы.

Определено, что прочность клеевого соединения не зависит от очередности операций «склеивание» и «плазменная обработка», а значит, возможна обработка потоком низкотемпературной плазмы уже готовых изделий из клееной древесины.

#### **4.3 Влияние плазменной обработки на краевой угол смачивания, паро- и водопроницаемость поверхности древесины**

Краевой угол смачивания характеризует степень смачиваемости поверхности твердого тела жидкостью. Чем больше значение краевого угла смачивания, тем меньше смачиваемость поверхности. Низкая смачиваемость поверхности играет немаловажную роль в защите древесины от образования грибков и плесени посредством защиты древесины от замачивания. В исследовании обработка древесины потоком низкотемпературной плазмы сравнивалась с покрытием поверхности древесины лаком и краской ПФ-115.

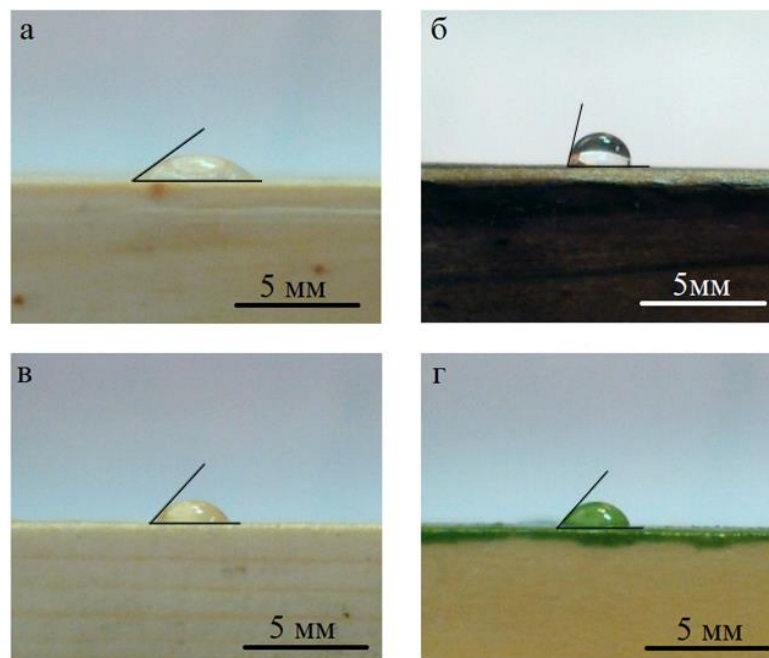


Рисунок 4.23 – Микрофотографии капли, лежащей на поверхности древесины сосны: *а* – исходной (без обработки); *б* – после плазменной обработки; *в* – покрытой лаком; *г* – окрашенный краской

На рисунке 4.23 представлены микрофотографии капли, лежащей на поверхности образцов в момент времени 1 с после соприкосновения с поверхностью. Значения угла смачивания для образцов из сосны представлены в таблице 4.31.

Таблица 4.31 – Угол смачивания поверхности сосны

| № | Образец                         | Угол смачивания, град |
|---|---------------------------------|-----------------------|
| 1 | Исходная древесина              | $48 \pm 3$            |
| 2 | Древесина, обработанная плазмой | $79 \pm 3$            |
| 3 | Древесина, окрашенная краской   | $61 \pm 3$            |
| 4 | Древесина, покрытая лаком       | $59 \pm 3$            |

Из рассмотренных образцов наибольшим значением краевого угла обладают образцы, обработанные потоком низкотемпературной плазмы, а наименьшим – исходной древесины. Снижение смачиваемости поверхности образца после плазменной обработки обусловлено выходом на поверхность смол, а также структурными изменениями приповерхностного слоя древесины [141–44]. При покрытии древесины лаком или краской изменений структуры приповерхностного слоя древесины не происходит, а наличие микропор в покрытии обеспечивает контакт воды с древесиной. За счет этого значение краевого угла смачивания у древесины, покрытой лакокрасочными материалами, выше, чем у исходной древесины, но ниже, чем у древесины, обработанной потоком низкотемпературной плазмы.

В таблицах 4.32–4.34 представлены значения краевого угла смачивания для образцов из сосны, лиственницы и ели при различных параметрах плазменной обработки.

Таблица 4.32 – Значение краевого угла смачивания для образцов из сосны в зависимости от режима плазменной обработки

| № | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Угол смачивания, град |
|---|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1 | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 9                                | 6111                           | $72 \pm 3$            |
| 2 | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 9166                           | $74 \pm 3$            |
| 3 | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 12500                          | $75 \pm 3$            |



Продолжение таблицы 4.32

| №  | Удельный тепловой<br>поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость<br>обработки<br>$V$ , см/с | Количество<br>теплоты<br>$Q$ , Дж | Угол<br>смачивания,<br>град |
|----|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 25000                             | $79 \pm 3$                  |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 15000                             | $76 \pm 3$                  |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 30000                             | $82 \pm 3$                  |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 23334                             | $79 \pm 3$                  |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 46666                             | $85 \pm 3$                  |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 26667                             | $80 \pm 3$                  |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 53334                             | $86 \pm 3$                  |

Заметно увеличение угла смачивания при повышении количества теплоты  $Q$ , подводимой к образцам из древесины сосны в результате плазменной обработки. Такой эффект связан с увеличением глубины обработки и степенью деструкции древесины (таблица 3.2).

Таблица 4.33 – Значение краевого угла смачивания для образцов из лиственницы в зависимости от режима плазменной обработки

| №  | Удельный тепловой<br>поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость<br>обработки<br>$V$ , см/с | Количество<br>теплоты<br>$Q$ , Дж | Угол<br>смачивания,<br>град |
|----|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                             | 9                                   | 6111                              | $80 \pm 4$                  |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 9166                              | $81 \pm 4$                  |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 12500                             | $81 \pm 4$                  |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 25000                             | $83 \pm 4$                  |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 15000                             | $83 \pm 4$                  |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 30000                             | $86 \pm 4$                  |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 23334                             | $82 \pm 4$                  |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 46666                             | $89 \pm 4$                  |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 26667                             | $83 \pm 4$                  |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 53334                             | $90 \pm 4$                  |

Таблица 4.34 – Значение краевого угла смачивания для образцов из ели в зависимости от режима плазменной обработки

| №  | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Угол смачивания, град |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 9                                | 6111                           | $71 \pm 3$            |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 9166                           | $72 \pm 3$            |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 12500                          | $73 \pm 3$            |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 25000                          | $76 \pm 3$            |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 15000                          | $74 \pm 3$            |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 30000                          | $80 \pm 3$            |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 23334                          | $75 \pm 3$            |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 46666                          | $82 \pm 3$            |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 26667                          | $77 \pm 3$            |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 53334                          | $82 \pm 3$            |

Для образцов из лиственницы и ели, так же, как и для сосны, характерна прямая зависимость роста угла смачивания с увеличением количества теплоты, подведенной к образцам в результате плазменной обработки. Такой эффект связан с большими структурными изменениями в результате термического воздействия потоком низкотемпературной плазмы, а также с большим количеством смол, выделяющихся на поверхности древесины.

Учитывая эффект повышения устойчивости древесины с модифицированным слоем на поверхности к капельной влаге, необходимо определить ее водопроницаемость и паропроницаемость.

На рисунке 4.24 представлены кривые зависимости объема воды от времени при определении водопроницаемости образцов из сосны до и после плазменной обработки.

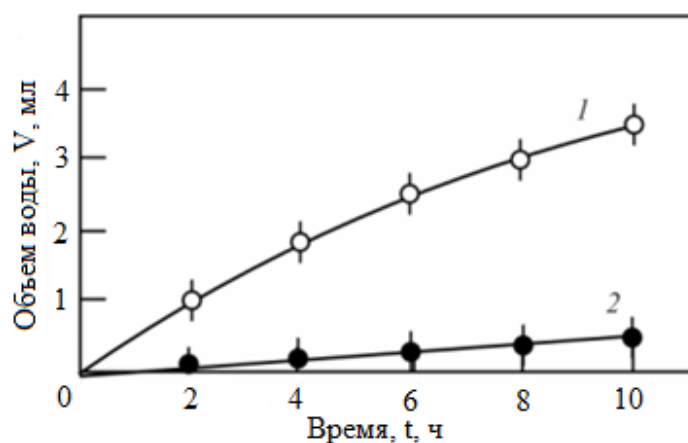


Рисунок 4.24 – Водопроницаемость образцов сосны в зависимости времени выдерживания: 1 – до обработки; 2 – после плазменной обработки

Значение водопроницаемости для образцов из сосны при разных параметрах плазменной обработки представлены в таблице 4.35.

Таблица 4.35 – Значение водопроницаемости для образцов из сосны в зависимости от режима плазменной обработки

| №  | Удельный тепловой поток $q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки $V$ , см/с | Количество теплоты $Q$ , Дж | Водопроницаемость, см <sup>3</sup> /ч |
|----|--------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 9                             | 6111                        | $4,0 \pm 0,1$                         |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 9166                        | $2,2 \pm 0,1$                         |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 12500                       | $1,7 \pm 0,1$                         |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 25000                       | $1,3 \pm 0,1$                         |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 15000                       | $1,5 \pm 0,1$                         |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 30000                       | $1,0 \pm 0,1$                         |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 23334                       | $1,4 \pm 0,1$                         |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 46666                       | $0,8 \pm 0,1$                         |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 26667                       | $1,3 \pm 0,1$                         |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 53334                       | $0,8 \pm 0,1$                         |

Установлено, что после обработки потоком низкотемпературной плазмы снижается значение водопроницаемости древесины сосны. Определено влияние параметров плазменной обработки на водопроницаемость – при увеличении количества теплоты, подводимого к образцу из сосны в результате плазменной обработки, снижается значение водопроницаемости.

В таблицах 4.36–4.37 представлены значения водопроницаемости для образцов из лиственницы и ели при разных параметрах плазменной обработки.

Таблица 4.36 – Значение водопроницаемости для образцов из лиственницы в зависимости от режима плазменной обработки

| №  | Удельный тепловой поток $q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки $V$ , см/с | Количество теплоты $Q$ , Дж | Водопроницаемость, см <sup>3</sup> /ч |
|----|--------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 9                             | 6111                        | $3,8 \pm 0,1$                         |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 9166                        | $2,7 \pm 0,1$                         |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 12500                       | $1,8 \pm 0,1$                         |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 25000                       | $1,3 \pm 0,1$                         |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 15000                       | $1,7 \pm 0,1$                         |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 30000                       | $1,0 \pm 0,1$                         |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 23334                       | $1,4 \pm 0,1$                         |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 46666                       | $0,7 \pm 0,1$                         |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 26667                       | $1,2 \pm 0,1$                         |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 53334                       | $0,6 \pm 0,1$                         |

По результатам анализа полученных результатов установлено, что для образцов из лиственницы и ели, так же, как и для образцов из сосны, характерно снижение водопроницаемости после обработки потоком низкотемпературной плазмы. Зависимость значения водопроницаемости от величины подводимой теплоты в результате плазменной обработки объясняется разным количеством выделившихся смол, а также изменением структуры поверхности древесины.

Таблица 4.37 – Значение водопроницаемости для образцов из ели в зависимости от режима плазменной обработки

| № | Удельный тепловой поток $q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки $V$ , см/с | Количество теплоты $Q$ , Дж | Водопроницаемость, см <sup>3</sup> /ч |
|---|--------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| 1 | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 9                             | 6111                        | $4,0 \pm 0,1$                         |
| 2 | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 9166                        | $2,6 \pm 0,1$                         |
| 3 | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 12500                       | $1,8 \pm 0,1$                         |
| 4 | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 25000                       | $1,3 \pm 0,1$                         |
| 5 | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 15000                       | $1,6 \pm 0,1$                         |

Продолжение таблицы 4.37

| №  | Удельный<br>тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость<br>обработки<br>$V$ , см/с | Количество<br>теплоты<br>$Q$ , Дж | Водопроницаемость,<br>см <sup>3</sup> /ч |
|----|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 30000                             | $1,0 \pm 0,1$                            |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 23334                             | $1,4 \pm 0,1$                            |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 46666                             | $0,8 \pm 0,1$                            |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 26667                             | $1,2 \pm 0,1$                            |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 53334                             | $0,7 \pm 0,1$                            |

Важным фактором долговечности древесины является ее паропроницаемость, или, как ее называют, возможность древесины «дышать». Паропроницаемость поверхности древесины позволяет предотвратить конденсирование влаги в толще материала, влияющее на свойства древесины [145].

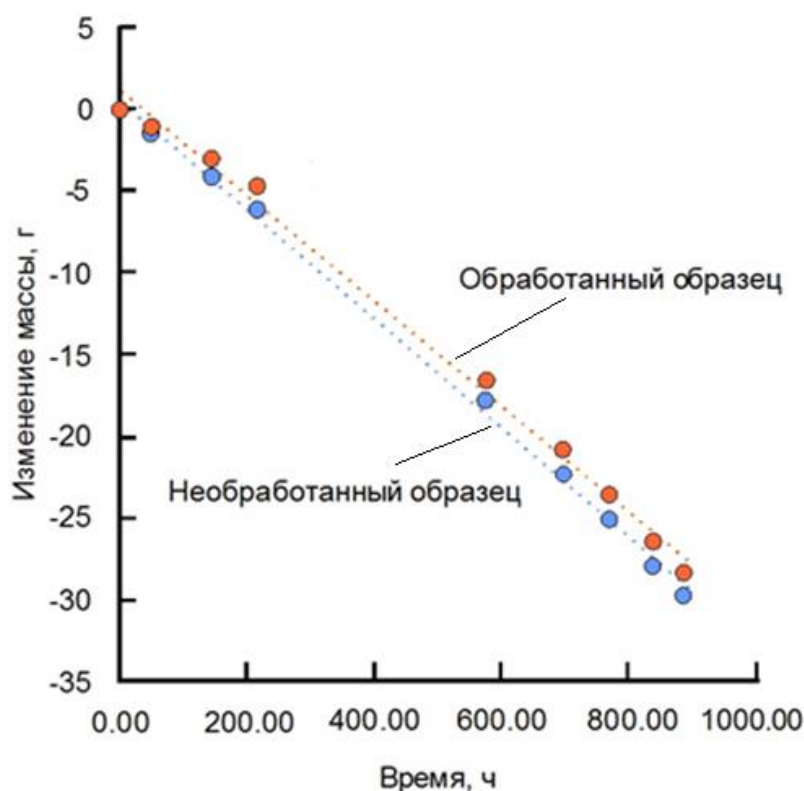


Рисунок 4.25 – Изменение массы воды в емкости испытательного прибора от времени при определении паропроницаемости

На рисунке 4.25 представлены графики изменения массы воды в емкости устройства для определения паропроницаемости в зависимости от времени выдерживания образцов исходной древесины и обработанной потоком

низкотемпературной плазмы. В дальнейшем полученные данные использовались для расчета паропроницаемости образцов.

В таблице 4.38 представлены значения паропроницаемости образцов из сосны в зависимости от параметров плазменной обработки. Определено, что значение паропроницаемости для образцов из сосны в результате обработки потоком низкотемпературной плазмы не изменяется и соответствует значению паропроницаемости исходной древесины.

Таблица 4.38 – Значение паропроницаемости для образцов из сосны в зависимости от режима плазменной обработки

| №  | Удельный тепловой поток $q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки $V$ , см/с | Количество теплоты $Q$ , Дж | Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па) |
|----|--------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 9                             | 6111                        | $0,20 \pm 0,01$                |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 9166                        | $0,21 \pm 0,01$                |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 12500                       | $0,21 \pm 0,01$                |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 25000                       | $0,20 \pm 0,01$                |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 15000                       | $0,21 \pm 0,01$                |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 30000                       | $0,20 \pm 0,01$                |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 23334                       | $0,20 \pm 0,01$                |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 46666                       | $0,21 \pm 0,01$                |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 26667                       | $0,20 \pm 0,01$                |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 53334                       | $0,21 \pm 0,01$                |

В таблицах 4.39, 4.40 представлены значения паропроницаемости для образцов из лиственницы и ели при разных параметрах плазменной обработки.

Таблица 4.39 – Значение паропроницаемости для образцов из лиственницы в зависимости от режима плазменной обработки

| № | Удельный тепловой поток $q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки $V$ , см/с | Количество теплоты $Q$ , Дж | Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па) |
|---|--------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 1 | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 9                             | 6111                        | $0,17 \pm 0,01$                |
| 2 | $1,1 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 9166                        | $0,18 \pm 0,01$                |
| 3 | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 6                             | 12500                       | $0,18 \pm 0,01$                |
| 4 | $1,5 \cdot 10^6$                                       | 3                             | 25000                       | $0,18 \pm 0,01$                |

## Продолжение таблицы 4.39

| №  | Удельный<br>тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость<br>обработки<br>$V$ , см/с | Количество<br>теплоты<br>$Q$ , Дж | Паропроницаемость,<br>мг/(м·ч·Па) |
|----|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 15000                             | $0,17 \pm 0,01$                   |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 30000                             | $0,18 \pm 0,01$                   |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 23334                             | $0,18 \pm 0,01$                   |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 46666                             | $0,17 \pm 0,01$                   |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 26667                             | $0,17 \pm 0,01$                   |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 53334                             | $0,18 \pm 0,01$                   |

Таблица 4.40 – Значение паропроницаемости для образцов из ели в зависимости от режима плазменной обработки

| №  | Удельный<br>тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость<br>обработки<br>$V$ , см/с | Количество<br>теплоты<br>$Q$ , Дж | Паропроницаемость,<br>мг/(м·ч·Па) |
|----|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                             | 9                                   | 6111                              | $0,23 \pm 0,01$                   |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 9166                              | $0,22 \pm 0,01$                   |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 12500                             | $0,22 \pm 0,01$                   |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 25000                             | $0,22 \pm 0,01$                   |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 15000                             | $0,22 \pm 0,01$                   |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 30000                             | $0,22 \pm 0,01$                   |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 23334                             | $0,23 \pm 0,01$                   |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 46666                             | $0,22 \pm 0,01$                   |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                             | 6                                   | 26667                             | $0,22 \pm 0,01$                   |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                             | 3                                   | 53334                             | $0,22 \pm 0,01$                   |

В результате исследования установлено, что обработка потоком низкотемпературной плазмы не оказывает влияния на паропроницаемость древесины пород сосна, ель и лиственница. Такой эффект связан с неполным закрытием пор и каналов (смоляные ходы, межклеточные полости, капилляры) смолами. Неизменная паропроницаемость при одновременном снижении смачиваемости и водопроницаемости определяет перспективность использования плазменной обработки для модификации поверхности древесины. Проведя анализ работ [52–58], можно сделать вывод о том, что

снижение смачиваемости и водопроницаемости повысит морозостойкость и формоустойчивость древесины в условиях переменной влажности.

#### **4.4 Влияние плазменной обработки на биологическую стойкость древесины**

Проблема биокоррозии особенно остро стоит для конструкций из древесины, поскольку повреждения, вызванные плесенью и грибами, существенно снижают прочность и эстетическую привлекательность материала [13]. В доступных местах образование плесени можно обнаружить и устранить своевременно, а в труднодоступных зонах развитие вредоносных микроорганизмов может привести к преждевременному выходу конструкции из строя [146, 147]. Следовательно, для обеспечения запланированного срока службы деревянных конструкций крайне важно принять меры по предотвращению образования и распространения вредных микроорганизмов.

На рисунке 4.26 представлены фотографии типичных образцов из сосны после испытания на биостойкость. Биостойкость определялась по интенсивности развития грибов на поверхности образцов. Древесина, обработанная потоком низкотемпературной плазмы, сравнивалась с древесиной, обработанной специализированным защитно-декоративным антисептическим покрытием «Акватекс».

В таблице 4.41 представлены результаты оценки биостойкости образцов, которые были подвергнуты различным методам обработки. Эти данные позволяют провести сравнительный анализ эффективности применяемых защитных методов. Баллы в таблице отражают интенсивность развития грибов на поверхности образца и присваиваются согласно таблице 1 ГОСТ 9.048–89 «Единая система защиты от коррозии и старения. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов».



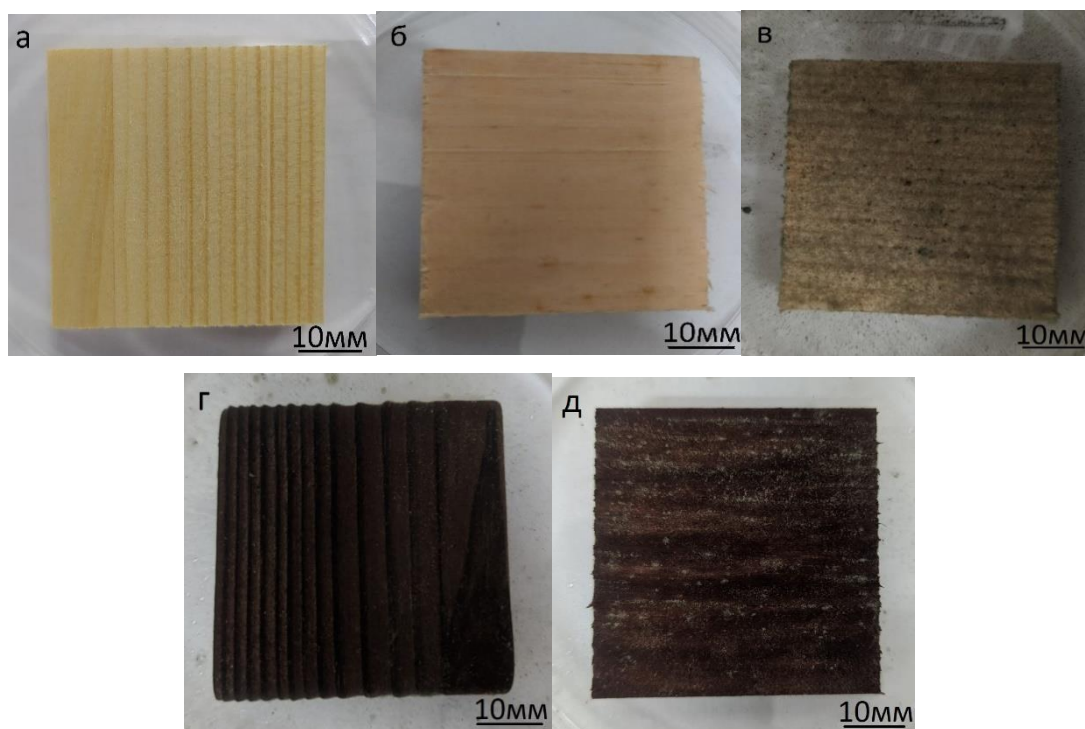


Рисунок 4.26 – Фотографии типичных образцов из сосны после испытания:  
*а* – контрольный образец – исходная (необработанная) древесина без покрытий;  
*б* – образец исходной древесины, обработанный водой; *в* – образец исходной  
 древесины с нанесенной суспензией; *г* – обработанный потоком  
 низкотемпературной плазмы с нанесенной суспензией; *д* – обработанный  
 защитно-декоративным покрытием «Акватекс» с нанесенной суспензией

При проведении микробиологических испытаний были получены следующие данные:

Контрольные образцы (рисунок 4.26, *а*, *б*) – на поверхности контрольного образца и исходной древесины, увлажненных дистиллированной водой, признаки грибного поражения полностью отсутствуют. Данный факт свидетельствует о стерильности исходного материала и используемой воды. По шкале ГОСТ 9.048–89 степень поражения соответствует 0 баллам.

Необработанная древесина (рисунок 4.26, *в*) – на образцах с суспензией наблюдается равномерное интенсивное развитие мицелия по всей поверхности. Степень биоповреждения достигает максимальных 5 баллов.

Плазменная обработка (рисунок 4.26, *д*) – на образцах выявлены единичные слабовыраженные очаги развития грибов. По шкале соответствует 3 баллам.

Образцы с покрытием «Акватекс» (рисунок 4.26, з) – отмечается снижение интенсивности грибного роста по сравнению с необработанной древесиной. Однако наблюдаются сплошное прорастание спор по всей поверхности и многочисленные очаги мицелия (площадью >25 %). Поражение оценивается в 5 баллов.

Таблица 4.41 – Результаты испытания образцов из сосны

| № | Образец                                                                                              | Балл |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1 | Контрольный образец из исходной (необработанной) древесины                                           | 0    |
| 2 | Образец из исходной древесины с нанесенной водой                                                     | 0    |
| 3 | Образец из исходной древесины с нанесенной суспензией                                                | 5    |
| 4 | Образец из исходной древесины, обработанной низкотемпературной плазмой с нанесенной суспензией       | 3    |
| 5 | Образец из древесины, обработанной защитно-декоративным покрытием «Акватекс» с нанесенной суспензией | 5    |

В таблицах 4.42–4.44 представлены значения интенсивности развития грибов в зависимости от параметров плазменной обработки для образцов из сосны, лиственницы и ели.

Таблица 4.42 – Интенсивность развития грибов на образцах из сосны в зависимости от режима плазменной обработки

| №  | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Интенсивность развития грибов, балл |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 9                                | 6111                           | 4                                   |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 9166                           | 4                                   |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 12500                          | 3                                   |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 25000                          | 3                                   |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 15000                          | 3                                   |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 30000                          | 2                                   |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 23334                          | 3                                   |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 46666                          | 2                                   |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 26667                          | 3                                   |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 53334                          | 1                                   |

Из данных таблицы 4.42 следует, что происходит снижение интенсивности развития грибов с увеличением количества теплоты, подводимой к образцам из

сосны в результате плазменной обработки. Такой результат связан с увеличением глубины обработки и степени термодеструкции (таблица 3.2), которые прямопропорционально зависят от количества теплоты.

Таблица 4.43 – Интенсивность развития грибков на образцах из лиственницы в зависимости от режима плазменной обработки

| №  | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Интенсивность развития грибков, балл |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 9                                | 6111                           | 4                                    |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 9166                           | 4                                    |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 12500                          | 3                                    |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 25000                          | 3                                    |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 15000                          | 3                                    |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 30000                          | 2                                    |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 23334                          | 3                                    |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 46666                          | 1                                    |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 26667                          | 3                                    |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 53334                          | 1                                    |

Для образцов из лиственницы, так же, как и для образцов из сосны, закономерно снижение интенсивности развития грибков с увеличением количества подводимой к образцам теплоты в результате плазменной обработки.

Таблица 4.44 – Интенсивность развития грибков на образцах из ели в зависимости от режима плазменной обработки

| № | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Интенсивность развития грибков, балл |
|---|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 9                                | 6111                           | 4                                    |
| 2 | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 9166                           | 4                                    |
| 3 | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 12500                          | 3                                    |
| 4 | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 25000                          | 3                                    |
| 5 | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 15000                          | 3                                    |
| 6 | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 30000                          | 2                                    |
| 7 | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 23334                          | 3                                    |

Продолжение таблицы 4.44

| №  | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Интенсивность развития грибов, балл |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 46666                          | 1                                   |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 26667                          | 3                                   |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 53334                          | 1                                   |

Для образцов из ели, так же, как и для образцов из сосны и лиственницы, отмечается снижение интенсивности развития грибов с увеличением количества подводимой к образцам теплоты в результате плазменной обработки. Зависимость значения биостойкости от параметров обработки связана со степенью термодеструкции питательной для микроорганизмов среды.

Низкая интенсивность развития грибов на поверхности образцов, обработанных потоком низкотемпературной плазмы, объясняется термодеструкцией питательной среды для грибов. При повышении температуры происходит разложение гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина в тонком верхнем слое древесины, что нарушает условия для роста грибов [148]. Кроме того, на глубине до 5 мм в древесине происходит уничтожение микроорганизмов благодаря распределению температурных полей [149]. Обработка также приводит к закупориванию пор на поверхности смолами, что препятствует проникновению спор грибов вглубь древесины, еще больше снижая риск грибкового поражения. Результат отмечается на всех рассмотренных сортах древесины. Получено заключение от Биологического института ТГУ, подтверждающее повышение стойкости древесины, обработанной потоком низкотемпературной плазмы к развитию грибов (приложение В).

#### **4.5 Огнезащитная характеристика древесины, обработанной потоком низкотемпературной плазмы**

Обработка древесины потоком низкотемпературной плазмы оказывает заметное влияние на ее огнезащитные свойства, что связано с изменением химического состава и структуры поверхностного слоя материала. На рисунке

4.27 представлены фотографии образцов из сосны после проведения испытаний. У исходных образцов происходит возгорание ( $t \sim 1300$  °C) через 11 с, а после удаления источника пламени процесс горения продолжается. Между тем в обработанных образцах сосны возгорание происходит только через 32–38 с. Также для режимов с удельным тепловым потоком от  $2,8 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> и выше отмечается прекращение горения древесины после удаления источника пламени. Такой результат характерен для всех рассмотренных сортов древесины и подчеркивает повышение огнестойкости после плазменной обработки.

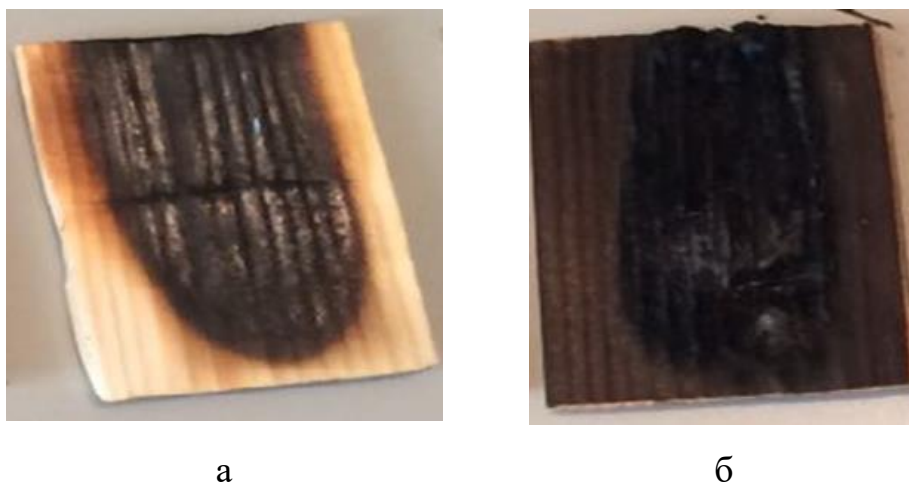


Рисунок 4.27 – Фотографии образцов из сосны после испытаний по определению огнезащитной эффективности: *а* – исходная древесина; *б* – древесина после плазменной обработки

В таблицах 4.45–4.47 представлены значения времени возгорания в зависимости от параметров плазменной обработки для образцов из сосны, лиственницы и ели.

По данным таблицы 4.45 можно отметить увеличение времени возгорания при повышении количества теплоты, подведенной к образцам в результате плазменной обработки. Это связано увеличением глубины обработки древесины и степенью термодеструкции (таблица 3.2), поскольку от глубины обработки древесины и степени термодеструкции зависит количество легколетучих воспламеняющихся веществ.

Таблица 4.45 – Время воспламенения ( $t \sim 1300$  °С) образцов из сосны в зависимости от режима плазменной обработки

| №  | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Время воспламенения,<br>с |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 9                                | 6111                           | $32 \pm 2$                |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 9166                           | $32 \pm 2$                |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 12500                          | $32 \pm 2$                |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 25000                          | $33 \pm 2$                |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 15000                          | $32 \pm 2$                |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 30000                          | $35 \pm 2$                |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 23334                          | $33 \pm 2$                |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 46666                          | $37 \pm 2$                |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 26667                          | $33 \pm 2$                |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 53334                          | $38 \pm 2$                |

Таблица 4.46 – Время воспламенения ( $t \sim 1300$  °С) образцов из лиственницы в зависимости от режима плазменной обработки

| №  | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Время воспламенения,<br>с |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 9                                | 6111                           | $33 \pm 2$                |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 9166                           | $33 \pm 2$                |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 12500                          | $34 \pm 2$                |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 25000                          | $35 \pm 2$                |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 15000                          | $34 \pm 2$                |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 30000                          | $36 \pm 2$                |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 23334                          | $35 \pm 2$                |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 46666                          | $37 \pm 2$                |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 26667                          | $35 \pm 2$                |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 53334                          | $38 \pm 2$                |

Для образцов из лиственницы и ели также заметна зависимость времени воспламенения от количества теплоты, подведенной к древесине в результате плазменной обработки. Воздействие плазменного потока приводит к частичной термодеструкции органических компонентов древесины: гемицеллюлозы,

целлюлозы и лигнина – в поверхностном слое толщиной до нескольких миллиметров. В результате образуется углеродистый защитный слой, обладающий высокой термостойкостью и способный замедлять тепловой поток к внутренним слоям древесины. Этот слой действует как барьер, препятствующий быстрому воспламенению и распространению огня.

Таблица 4.47 – Время воспламенения ( $t \sim 1300$  °C) образцов из ели в зависимости от режима плазменной обработки

| №  | Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Количество теплоты<br>$Q$ , Дж | Время воспламенения,<br>с |
|----|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| 1  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 9                                | 6111                           | $31 \pm 2$                |
| 2  | $1,1 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 9166                           | $31 \pm 2$                |
| 3  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 12500                          | $32 \pm 2$                |
| 4  | $1,5 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 25000                          | $33 \pm 2$                |
| 5  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 15000                          | $32 \pm 2$                |
| 6  | $1,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 30000                          | $34 \pm 2$                |
| 7  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 23334                          | $33 \pm 2$                |
| 8  | $2,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 46666                          | $35 \pm 2$                |
| 9  | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | 26667                          | $33 \pm 2$                |
| 10 | $3,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | 53334                          | $36 \pm 2$                |

Кроме того, плазменная обработка способствует удалению летучих горючих веществ и смол с поверхности, что снижает количество легковоспламеняющихся компонентов. Закупорка пор смолистыми веществами, образованными в процессе обработки, уменьшает доступ кислорода к древесине, что дополнительно повышает огнестойкость.

Время воспламенения зависит от количества теплоты, подведенной к образцам, поскольку от этой характеристики также зависит величина термодеструкции компонентов древесины и толщина наружного углеродистого слоя.

Описанные в главе результаты опубликованы в работах [150–166].

## Выводы по главе 4

1. Обработка низкотемпературной плазмой приводит к значительным изменениям морфологии поверхности древесины: устранению ворсистости, образованию гладкого слоя с частицами сажи и волнообразного рельефа из-за разной плотности ранних и поздних клеток древесины. СЭМ-анализ подтвердил увеличение однородности поверхности и заполнение пор смолами, что согласуется с исследованиями модификации древесины для улучшения её эксплуатационных свойств.

2. Обработка потоком низкотемпературной плазмы не оказывает влияния на механические свойства древесины рассмотренных пород:

- плазменная обработка не оказывает существенного влияния на прочность при сжатии для всех исследованных пород (сосна, лиственница, ель), что соответствует выводам работ по термическому воздействию на древесину;

- прочность при изгибе снижается на 5–10 % из-за деструкции гемицеллюлозы, однако для крупногабаритных конструкций (сечение  $\geq 50 \times 50$  мм) это влияние нивелируется малым объёмом модифицированного слоя;

- прочность клеевых соединений не изменяется, что позволяет применять плазменную обработку как до, так и после склеивания.

3. Плазменная обработка придает изделиям из древесины защитные свойства:

- увеличение краевого угла смачивания (до  $86^\circ$  для сосны) и снижение водопроницаемости (в 5 раз при  $q = 3,2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>) обусловлены выходом смол и образованием углеродистого слоя. Паропроницаемость остаётся неизменной, что важно для «дыхания» материала;

- биостойкость повышается (снижение интенсивности грибкового поражения с 5 баллов у исходной древесины до 1 балла) благодаря термодеструкции питательной среды и закупорке пор смолами. Результаты превосходят эффективность некоторых антисептиков (например, «Акватекс»);

- время воспламенения увеличивается в 3–4 раза (с 11 до 38 с для сосны), а при  $q \geq 2,8 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> наблюдается самозатухание. Это связано с образованием



термостойкого углеродистого слоя и снижением содержания летучих горючих веществ.

Оптимальными режимами, обеспечивающими баланс между глубиной модификации, сохранением прочностных характеристик и функциональными свойствами, являются: удельный тепловой поток  $2,8\text{--}3,2 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> и скорость обработки 3–6 см/с.

## **ГЛАВА 5. АПРОБАЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ**

### **5.1 Внедрение технологии обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы**

Результаты проведенных в работе исследований (опытная партия пиломатериалов) использовались на предприятии ООО «Тарная база» г. Томск. Отмечено увеличение стойкости древесины после плазменной обработки к образованию грибка и плесени, по сравнению с необработанной древесиной, и, как следствие, – сокращение отбраковки продукции с 30 % до ~3–5 % (приложение Г). Для широкомасштабного внедрения результатов исследования подготовлен технологический регламент на производство работ по обработке древесины хвойных пород потоком низкотемпературной плазмы (приложение Д).

#### **5.1.1 Разработка установок по обработке древесины потоком низкотемпературной плазмы**

Рассматривая вопросы промышленной обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы, необходимо в первую очередь разработать оборудование, отвечающее следующим требованиям: доступность составляющих оборудование элементов, простота обслуживания и ремонта, безопасность процесса обработки, производительность.

С учетом предъявляемых требований было разработано и запатентовано следующее оборудование для обработки изделий из древесины потоком низкотемпературной плазмы:

- 1) Патент на полезную модель № 212821 U1 Российская Федерация, МПК В27К 5/00. Устройство для обработки поверхности изделий из древесины низкотемпературными потоками плазмы [81].
- 2) Патент № 2822045 С1 Российская Федерация, МПК В27К 5/00. Установка для обработки поверхности изделий из древесины низкотемпературными потоками плазмы [167].

- 3) Патент на полезную модель № 226213 U1 Российская Федерация, МПК В27К 5/00. Устройство для обработки поверхности изделий круглого сечения из древесины низкотемпературными потоками плазмы [168].

На рисунке 5.1 представлена фотография обработки изделий из древесины на разработанном оборудовании. Оборудование представляет собой пространственную раму с закрепленными на ней плазменным генератором и роликами для перемещения обрабатываемых изделий, приводимых в действие электродвигателем заводского изготовления. Плазменный генератор питается от аппарата плазменной резки, в качестве плазмообразующего газа используется сжатый воздух, подаваемый воздушным компрессором, а охлаждение плазменного генератора осуществляется за счет циркуляции холодной воды в замкнутом контуре. Циркуляция воды обеспечивается водяным насосом заводского изготовления.

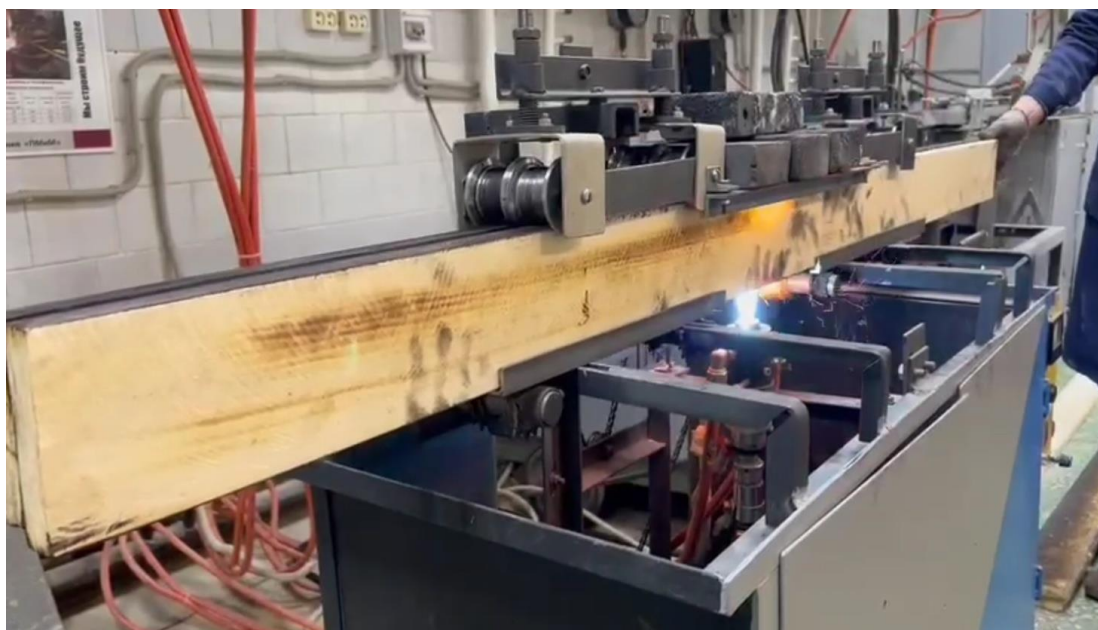


Рисунок 5.1 – Фотография линии обработки изделий из древесины (досок) потоком низкотемпературной плазмы

Оборудование разрабатывалось с учетом возможности использования элементов заводского изготовления. К примеру, в качестве плазменного генератора применяется ВПР-410 [84], для его питания могут использоваться

аппараты для плазменной резки, а для подачи плазмобразующего газа – воздушные компрессоры необходимой производительности.

В таблице 5.1 представлена характеристика скорректированных режимов обработки древесины на разработанном оборудовании.

Таблица 5.1 – Характеристика режимов обработки древесины

| Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Характеристика поверхности             | Цвет поверхности<br>(RAL)   | Область применения*                                                                       |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| $1,1 \cdot 10^6$                                          | 9                                | Неравномерная обработка                | Светло-коричневый (2001)    | Интерьерные панели, мебельные фасады                                                      |
| $1,1 \cdot 10^6$                                          | 6                                | Равномерная обработка, глубина ~0,5 мм | Светло-коричневый (2001)    | Интерьерные панели, мебельные фасады, двери, оконные рамы                                 |
| $1,5 \cdot 10^6$                                          | 6                                | Равномерная обработка, глубина ~0,7 мм | Светло-коричневый (2013)    | Интерьерные панели, мебельные фасады                                                      |
| $1,5 \cdot 10^6$                                          | 3                                | Равномерная обработка, глубина ~1 мм   | Светло-коричневый (2013)    | Интерьерные панели, мебельные фасады, двери, оконные рамы, террасные доски, перила        |
| $1,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | Равномерная обработка, глубина ~0,7 мм | Светло-коричневый (2013)    | Террасные доски, перила, заборы, фасадные панели                                          |
| $1,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | Равномерная обработка, глубина ~1,5 мм | Золотисто-коричневый (8011) | Террасные доски, перила, заборы, фасадные панели, несущие элементы: балки, стойки и т. п. |
| $2,8 \cdot 10^6$                                          | 6                                | Равномерная обработка, глубина ~1,3 мм | Золотисто-коричневый (8011) | Террасные доски, перила, заборы, фасадные панели, несущие элементы: балки, стойки и т. п. |

Продолжение таблицы 5.1

| Удельный тепловой поток<br>$q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки<br>$V$ , см/с | Характеристика поверхности                                  | Цвет поверхности (RAL)  | Область применения*                                                               |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| $2,8 \cdot 10^6$                                          | 3                                | Равномерная обработка, глубина ~1,7 мм, сажа на поверхности | Темно-коричневый (8016) | Интерьерные панели, фасадные панели, полы в общественных зданиях, ступени лестниц |
| $3,2 \cdot 10^6$                                          | 6                                | Равномерная обработка, глубина ~1,5 мм, сажа на поверхности | Темно-коричневый (8017) | Интерьерные панели, фасадные панели, кровельные элементы, наружные лестницы       |
| $3,2 \cdot 10^6$                                          | 3                                | Равномерная обработка, глубина ~2,0 мм, сажа на поверхности | Черный (9011)           | Интерьерные панели, фасадные панели, шпалы, элементы контакта с грунтом           |
| * Указана предположительная область применения            |                                  |                                                             |                         |                                                                                   |

### 5.1.2 Технико-экономическое обоснование эффективности обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы

Немаловажным фактором применения технологии в промышленном масштабе является ее себестоимость. Проведем сравнительный анализ себестоимости обработки изделий из древесины потоком низкотемпературной плазмы с обжигом древесины газоздушными горелками. Обжиг газоздушными горелками выбран для сравнения, как наиболее близкий по принципу обработки, – термическое воздействие на приповерхностный слой древесины.

Для обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы применялось устройство для обработки поверхности изделий из древесины низкотемпературными потоками плазмы с плазменным генератором косвенного действия ВПР-410 с величиной удельного теплового потока  $1,1 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> и скоростью обработки 0,06 см/с. В качестве плазмообразующего газа использовался сжатый воздух. Расход плазмообразующего газа (сжатого

воздуха), подаваемого воздушным компрессором, равнялся 3 м<sup>3</sup>/ч. Для охлаждения плазменного генератора использовалась кольцевая система, состоящая из емкости объемом 10 м<sup>3</sup>, водяного насоса и шлангов. Система охлаждения заполнялась водопроводной водой. Давление воды в системе охлаждения составляло  $3,0 \cdot 10^5$  Па.

Для обжига применялась горелка газовоздушная с номинальной тепловой мощностью 58 кВт и величиной удельного теплового потока, равной  $0,45 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>. Для работы использовался сжиженный газ. Расход газа составлял 6,7 л/ч. Цена газа принималась равной 20 руб. за литр.

Расчет себестоимости проводился на примере обработки 1 м<sup>2</sup> доски из сосны влажностью 12 %, размером 20×120×2500 мм. Производительность каждого способа обработки определялась экспериментально при достижении схожих характеристик покрытий на древесных изделиях. Производительность обработки потоком плазмы – 27 м<sup>2</sup>/ч, обработки газовой горелки – 12,2 м<sup>2</sup>/ч.

Таблица 5.2 – Расчет себестоимости термически обработанной древесины

| Статья затрат                               | Сумма, руб 1 м <sup>2</sup> изделия |                            |
|---------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|
|                                             | Плазменная обработка                | Обработка газовой горелкой |
| Основные материалы (доски из сосны)         | 342                                 | 342                        |
| Оборудование и расходные материалы          | 3,25                                | 0,18                       |
| Аренда помещения                            | 6,94                                | 15,37                      |
| Коммунальные платежи                        | 4,90                                | 13,55                      |
| Транспортные расходы                        | 2,71                                | 5,68                       |
| Заработная плата с налоговыми отчислениями  | 10,53                               | 23,31                      |
| Накладные расходы                           | 5,66                                | 11,62                      |
| Итого полная себестоимость                  | 375,99                              | 411,71                     |
| Себестоимость обработки без учета материала | 33,99                               | 69,71                      |

Результаты расчета себестоимости обработки изделий из древесины разными способами представлены в таблице 5.2. Предполагается, что арендная плата за помещение в обоих случаях одинакова, по факту арендная плата за газифицированное помещение выше. В коммунальные платежи входит только оплата за электроэнергию. Транспортные расходы составляет доставка основных

материалов со склада изготовителя до арендуемого помещения. В статью затрат «Оборудование и расходные материалы» в случае плазменной обработки входят: источник питания (аппарат плазменной резки), плазменный генератор ВПР-410 и расходные материалы к нему (электроды, сопла, уплотнительные прокладки), воздушный компрессор, водяной насос, емкость полипропиленовая на 20 м<sup>3</sup>, шланги и 20 м<sup>3</sup> воды. В случае с обработкой газоздушными горелками в оборудование входят: горелка газоздушная и расходные материалы (сопла, уплотнительные прокладки), шланги для подключения газа. Все остальное оборудование (система подачи изделий – конвейер, система очистки изделий от продуктов горения, вентиляция и др.) не учитывается, поскольку оно будет одинаковым для обоих видов обработки.

После анализа полученных результатов установлено, что, несмотря на большую стоимость оборудования для обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы, себестоимость 1 м<sup>2</sup> обработанного изделия при использовании газовой горелки выше. Такой результат связан с относительно низкой производительностью обработки газовой горелки, что отражается на таких статьях затрат, как аренда помещения, коммунальные платежи и заработная плата. Поскольку одним из значимых факторов, влияющих на себестоимость обработки, является производительность, то возможно увеличение количества горелок с целью повышения теплового потока. При таком варианте значительно увеличится расход газа, а вместе с ним и статья затрат «Коммунальные платежи».

Таким образом, экономический эффект, по сравнению с обжигом древесины газоздушной горелкой, составляет около 35 руб. на 1 м<sup>2</sup> изделия.

### **5.1.3 Технологическая схема производства работ по обработке изделий из древесины хвойных пород потоком низкотемпературной плазмы**

На рисунке 5.2 предложена технологическая схема производства работ по обработке изделий из древесины потоком низкотемпературной плазмы. Предполагается, что древесина ранее уже была заготовлена, распилена на

изделия нужных размеров и доставлена на склад исходной продукции цеха плазменной обработки. Работы производятся в такой последовательности: изначально изделия из древесины хранятся на складе исходной продукции, откуда изделия, достигшие необходимой влажности, поступают в зону очистки, в которой с поверхности древесины удаляются загрязнения, затем они поступают на пост визуального контроля дефектов. Изделия, прошедшие контроль, отправляются на линию плазменной обработки. Обработка осуществляется посредством воздействия потоком низкотемпературной плазмы на поверхность древесины. После плазменной обработки поверхность изделий очищается от продуктов горения – сажи посредством прохода через камеру с вращающимися щетками.



Рисунок 5.2 – Технологическая схема производства работ по обработке изделий из древесины потоком низкотемпературной плазмы

После очистки изделия проходят визуальный контроль качества обработки. Изделия, прошедшие контроль качества, отправляются на пост упаковки, где покрываются полиэтиленовой пленкой. Из упакованных изделий формируется транспортная партия, которая перевозится автопогрузчиками на склад готовой продукции.



## 5.2 Использование побочного продукта – сажи, полученной в результате воздействия плазменного потока с поверхностью древесины для модификации трибологических свойств смазывающих материалов

При обработке древесины хвойных пород потоком низкотемпературной плазмы возможно образование продуктов горения – сажи на поверхности обработанных изделий (таблица 5.1). Технологическая схема производства работ по обработке древесины потоком низкотемпературной плазмы предусматривает очистку поверхности обработанных изделий от сажи. С целью недопущения загрязнения окружающей среды предусмотрен сбор сажи для дальнейшего использования. Для установления области применения полученной сажи необходимо определить ее состав и структуру.

### 5.2.1. Микроструктура и состав сажи

На рисунке 5.3 представлены микрофотографии порошки сажи, полученной при взаимодействии потока низкотемпературной плазмы с поверхностью древесины. Установлено, что размер частиц порошка сажи изменяется в широких пределах от 1 до 90 мкм. Частицы порошка сажи повторяют морфологию древесины. Хорошо виднеются смоляные ходы и стенки древесных клеток.

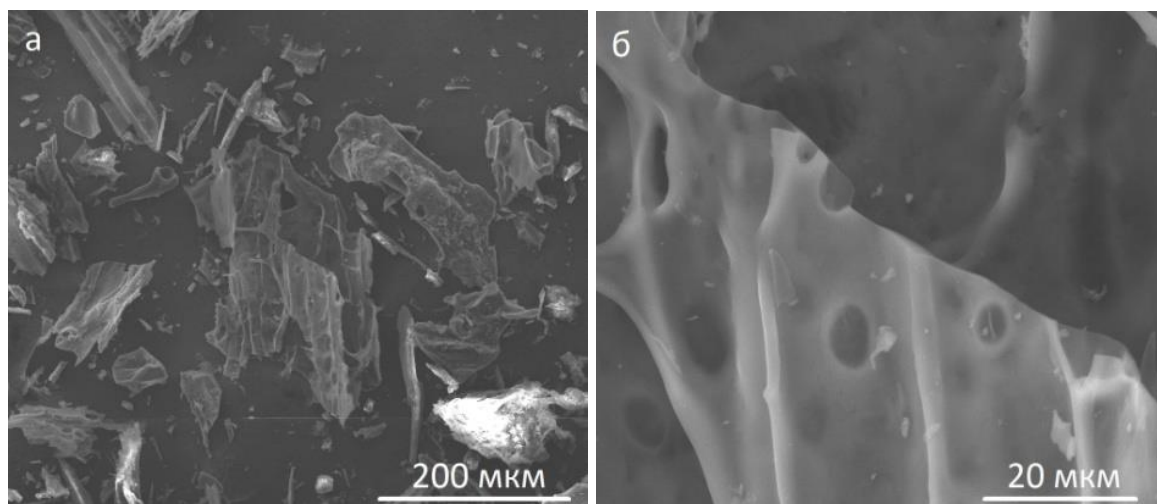


Рисунок 5.3 – Электронные снимки (сканирующая электронная микроскопия) порошка сажи с поверхности древесины: *а* – увеличение  $\times 500$ ; *б* – увеличение  $\times 4000$

На рисунке 5.4 представлена рентгеновская дифрактограмма полученного порошка сажи. Широкий размытый пик на дифрактограмме в области малых углов  $2\theta$  свидетельствует о наличии рентгеноаморфной углеродной фазы [169].

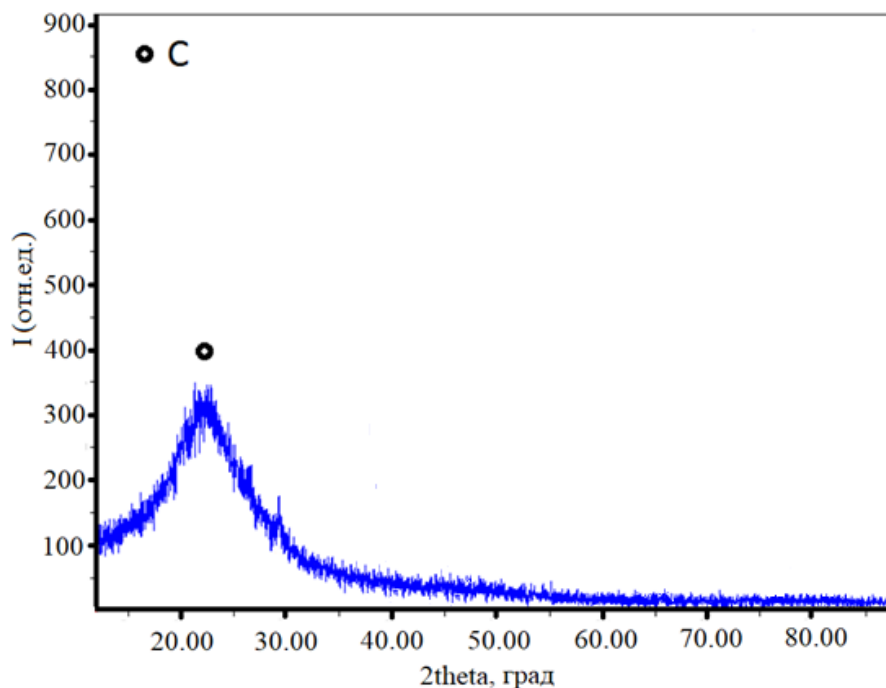


Рисунок 5.4 – Рентгеновская дифрактограмма частиц сажи с поверхности древесины после плазменной обработки

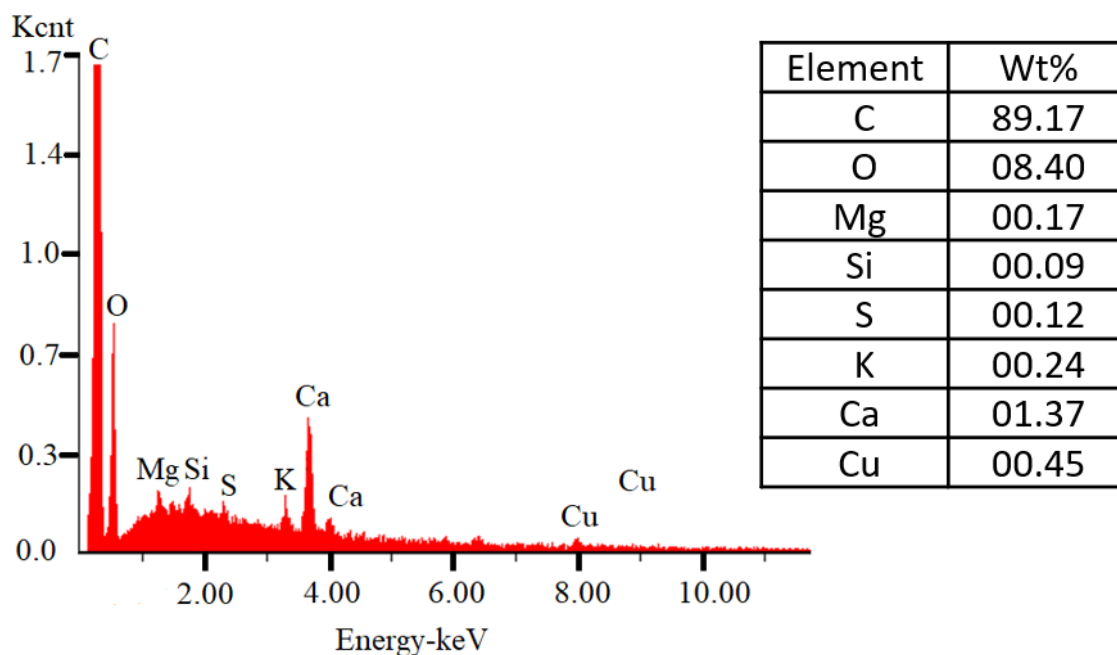


Рисунок 5.5 – Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия сажи с поверхности древесины после плазменной обработки

На рисунке 5.5 представлен результат энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии. Определено, что сажа представляет собой углеродный порошок с минимальным содержанием примесей.

### **5.2.2. Модификация трибологические свойств масел при использовании сажи**

В предыдущем разделе установлено, что сажа представляет собой углеродный порошок с примесями. Углеродные порошки имеют широкий спектр применения и пользуются спросом в промышленном производстве [170]. Одной из областей применения углеродных порошков является их применение в качестве модификаторов триботехнических свойств масел [171–173]. С учетом спроса на углеродный порошок в этой области проведены испытания по определению эффективности использования полученного углеродного порошка (сажи) в качестве добавки – модификатора трибологических свойств масел.

Испытания проводились по трибологической схеме «вращающееся кольцо – неподвижный ролик с погружением в масло».

Исходным материалом при проведении испытания на трение и износ являлись: гидравлическое индустриальное масло И-20а по ГОСТ 20799–2022 [174], трансмиссионного масла ТАД-17 по ТУ 0253-004-75291392-2015, порошок углерода (сажа), полученный путем воздействия потока низкотемпературной плазмы на поверхность изделий из древесины хвойных пород.

В паре трения использовались компоненты подшипников: верхняя обойма  $d = 35$  мм от подшипника 6-7202А [175] и ролик  $d = 9$  мм от подшипника 12507 [175].

Исследования заключались в трибологических испытаниях чистых масел и масел, модифицированных порошком углерода.

Смазочные материалы оценивались по следующим показателям: по величине потери массы образца (ролика) и приросту температуры поверхности контртела (сменной обоймы). Результаты испытаний сведены в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты трибологических испытаний

| Наименование исследования                                                                                                                         | Смазочный состав               | Весовой износ ролика $\Delta m$ , г | Изменение температуры рабочей поверхности $\Delta t$ , °C |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Исследование износостойкости пар трения «кольцо-ролик»<br>кольцо – ШХ15<br>ролик – ШХ15<br><br>Время испытаний – 60 с<br>Величина нагрузки – 20 Н | И-20а                          | 0,130                               | 60                                                        |
|                                                                                                                                                   | И-20а + 1,0 % порошка          | 0,130                               | 60                                                        |
|                                                                                                                                                   | И-20а + 2,0 % порошка          | 0,120                               | 57                                                        |
|                                                                                                                                                   | И-20а + 3,0 % порошка          | 0,110                               | 56                                                        |
|                                                                                                                                                   | И-20а + 4,0 % порошка          | 0,110                               | 54                                                        |
|                                                                                                                                                   | И-20а + 5,0 % порошка          | 0,080                               | 38                                                        |
|                                                                                                                                                   | И-20а + 6,0 % порошка          | 0,080                               | 37                                                        |
|                                                                                                                                                   | И-20а + 7,0 % порошка          | 0,010                               | 15                                                        |
|                                                                                                                                                   | И-20а + 8,0 % порошка          | 0,010                               | 15                                                        |
|                                                                                                                                                   | И-20а + 9,0 % порошка          | 0,005                               | 11                                                        |
|                                                                                                                                                   | И-20а + 10,0 % порошка         | 0,005                               | 8                                                         |
|                                                                                                                                                   | ТАД-17                         | 0,037                               | 35                                                        |
|                                                                                                                                                   | ТАД-17 + 1,0 % порошка         | 0,037                               | 33                                                        |
|                                                                                                                                                   | ТАД-17 + 2,0 % порошка         | 0,035                               | 32                                                        |
|                                                                                                                                                   | ТАД-17 + 3,0 % порошка         | 0,033                               | 30                                                        |
|                                                                                                                                                   | ТАД-17 + 4,0 % порошка         | 0,025                               | 21                                                        |
|                                                                                                                                                   | ТАД-17 + 5,0 % порошка         | 0,010                               | 17                                                        |
|                                                                                                                                                   | ТАД-17 + 6,0 % порошка         | 0,010                               | 15                                                        |
| Величина нагрузки – 40 Н                                                                                                                          | ТАД-17                         | —*                                  | —                                                         |
|                                                                                                                                                   | ТАД-17 + 1,0 %...6,0 % порошка | —                                   | —                                                         |
|                                                                                                                                                   | ТАД-17 + 7,0 % порошка         | 0,015                               | 25                                                        |
|                                                                                                                                                   | ТАД-17 + 8,0 % порошка         | 0,010                               | 21                                                        |
|                                                                                                                                                   | ТАД-17 + 9,0 % порошка         | 0,006                               | 19                                                        |
|                                                                                                                                                   | ТАД-17 + 10,0 % порошка        | 0,005                               | 15                                                        |
|                                                                                                                                                   | ТАД-17 + 11,0 % порошка        | 0,005                               | 15                                                        |
| * Схватывание пары трения                                                                                                                         |                                |                                     |                                                           |

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что введение в индустриальное масло И-20а и трансмиссионное масло ТАД-17 порошка углерода, полученного путем воздействия потоком низкотемпературной плазмы на поверхность изделий из древесины хвойных пород, повышает износостойкость пар трения из ШХ15 – ШХ15. Так, при концентрации 7,0 % (по

массе) порошка углерода в масле индустриальном И-20а износ ролика снижается в 13 раз, а при концентрации 9.0 % (по массе) – в 26 раз. Для трансмиссионное масла ТАД-17 при величине нагрузки = 20 Н с концентрацией порошка углерода 5,0 % (по массе) износ ролика снижается в 3,5 раза. При увеличении нагрузки до 40 Н для трансмиссионного масла ТАД-17 наибольший эффект уменьшения износа ролика отмечен при концентрации порошка, равной 10,0 % (по массе).

Представленные в главе результаты опубликованы в работах [81, 164, 167, 168, 176–178].

### **Выводы по главе 5**

1. Разработанные установки, технологическая схема и технологический регламент на производство работ по обработке древесины обеспечивают равномерную обработку изделий из древесины потоком низкотемпературной плазмы различной формой и размером поперечного сечения в промышленных масштабах. Себестоимость плазменной обработки изделий на разработанных установках ~ в 2 раза ниже, чем при обработке газовой горелкой.

2. Партия строительных изделий из древесины, обработанная в соответствии с предложенным регламентом, подтверждает повышение стойкости древесины к неблагоприятным внешним факторам. Реализовано внедрение технологии обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы на предприятии ООО «Тарная база», г. Томск.

3. Побочный продукт плазменной обработки древесины – сажа с поверхности обработанных изделий представляет собой углеродный рентгеноаморфный порошок и может применяться в качестве добавки-модификатора в смазочные материалы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные итоги диссертационной работы приведены в форме выводов:

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

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

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

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

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

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

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучукова, Н.М. Тенденции развития строительной отрасли в России и ключевые вопросы финансовой безопасности в условиях санкционных ограничений / Н.М. Кучукова, А.Р. Муфтахетдинов, И.Р. Байбурин // Дискуссия. – 2024. – № 3 (124). – С. 20–28.
2. Строительство в российских регионах: итоги 2023 года. – URL: <https://roscongress.org/materials/stroitelstvo-v-rossiyskikh-regionakh-itogi-2023-goda/> (дата обращения: 02.10.2022).
3. Уголев, Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение / Б.Н. Уголев. – Москва : ГОУ ВПО МГУЛ, 2007. – 351 с.
4. Лесная промышленность: современные и актуальные изменения / А.К. Назарова, С.О. Медведев, М.А. Зырянов, Е.В. Соколова // Московский экономический журнал. – 2023. – № 3. – С. 166–176.
5. Зотова, М. Рынок продукции ЛПК России в 2023 году / М. Зотова // ЛесПромИнформ. – 2024. – URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=6669> (дата обращения: 11.09.2024).
6. Mathematical modelling of renewable construction materials for green energy-efficient buildings at permafrost regions of Russia / N.A. Tsvetkov, A.V. Tolstykh, A.N. Khutornoi [et al.] // Environmental Challenges. – 2021. – V. 4. – Article 100101.
7. Чиждова, М.А. Особенности отделки древесины хвойных пород / М.А. Чиждова // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2009. – № 7. – С. 157–161.
8. Маринова, Е.И. Древесина как строительный материал и ее использование в сельском хозяйстве (по материалам исследований специалистов из Германии) / Е.И. Маринова, Н.Н. Журавлева // Научное обозрение. Педагогические науки. – 2019. – № 2–4. – С. 63–65.



9. Ежегодный обзор рынка лесных товаров, 2022–2023 годы // ЕЭК ООН. – 2023. – URL: <https://unece.org/ru/forests/publications/ezhegodnyy-obzor-rynka-lesnykh-tovarov-2022-2023-gody> (дата обращения: 16.12.2023).

10. Анализ современного состояния и тенденций развития мирового рынка древесины / Л.М. Капустина, М.С. Агабабаев, К.Ч. Акберов, Н.М. Агабабаева // ЕГИ. – 2024. – № 4 (54). – С. 141–145.

11. Скурыдин, Ю.Г. Динамические механические свойства древесины некоторых хвойных пород / Ю.Г. Скурыдин, А.Д. Насонов, П.Д. Голубь // Вестник Бурятского государственного университета. Философия. – 2015. – № 3. – С. 104–107.

12. Свойства древесины хвойных пород // Givoyles.ru. – URL: <https://givoyles.ru/articles/drevesina/svoistva-drevesiny-hvoinyh-porod/> (дата обращения: 18.12.2023).

13. Строение и свойства древесины // Технониколь. – URL: <https://nav.tn.ru/knowledge-base/materialy/pilomaterialy-i-derevyannaya-otdelka/stroenie-i-svoystva-drevesiny/> (дата обращения: 20.12.2023).

14. Особенности формирования древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) в смешанных лесных культурах / Е.М. Рунова, И.Н. Чельшева, Н.П. Плотников [и др.] // Лесотехнический журнал. – 2020. – Т. 9. – № 4. – С. 50–61.

15. Ермаков, С.А. Связь базисной плотности со средним годичным приростом, процентом поздней древесины и толщиной коры в средневозрастных ельниках на минеральных почвах и на осушенных торфяниках в Калининградской области / С.А. Ермаков // Строение, свойства и качество древесины – 2018 : материалы VI международного симпозиума им. Б.Н. Уголева. – Красноярск : Изд-во СО РАН, 2018. – С. 76–79.

16. Жилкин, Б.Д. К вопросу о влиянии условий местопроизрастания на анатомическое строение, физические и механические свойства древесины сосны / Б.Д. Жилкин // Труды Брянского лесного института. – 1936. – Т. 1. – С. 13–17.

17. Kollmann, F. Principles of Wood Science and Technology. Vol. 1. Solid Wood / F. Kollmann, W. Cote. – Springer-Verlag, 1968. – 592 p.

18. Кочеткова, Т.Д. Диэлектрическая проницаемость хвойных пород древесины в диапазоне частот 3–12 ГГц / Т.Д. Кочеткова, В.И. Суслиев, С.И. Волчков // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2013. – Т. 14. – № 5. – С. 101–104.

19. Хвойная древесина в каркасных конструкциях: 7 ключевых преимуществ // Villa-Balt.ru. – 2025. – URL: <https://villa-balt.ru/tpost/3u8uo0ykc1-hvoinaya-drevesina-v-karkasnih-konstruktsii> (дата обращения: 11.01.2025).

20. Разница между древесиной лиственницы, сосны и ели // Les-zavod.ru. – 2025. – URL: <https://les-zavod.ru/blog/raznitsa-mezhdu-drevesinoy-listvennitsy-sosny/> (дата обращения: 12.01.2025).

21. Forest Products Laboratory. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. – USDA, 2010. – 508 p. – URL: [https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl\\_gtr190.pdf](https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf) (дата обращения: 15.05.2025).

22. Почему деревянные дома строят из хвойных пород // Profil-dok.ru. – 2015. – URL: <https://profil-dok.ru/kompanija/novosti/60-pochemu-derevjannye-doma-strojat-iz-hvojnyh-porod.html> (дата обращения: 17.05.2025).

23. Уголев, Б.Н. Проблемы древесиноведения и научные основы лесных технологий / Б.Н. Уголев // Лесной вестник. – 1998. – № 1. – С. 21–28.

24. Выставкина, Е.В. Преимущества и недостатки деревянных конструкций / Е.В. Выставкина // The Scientific Heritage. – 2019. – № 41. – С. 10–12.

25. Древесина и древесные материалы : сборник статей / ред. Б.С. Чудинов. – Красноярск : [б. и.], 1974. – 238 с.

26. Шарастепанова, Д.В. Химический состав древесины и особенности взаимодействия плитных древесных композиционных материалов с водой и ее парами / Д.В. Шарастепанова, О.А. Мищенко // Философия современного природопользования в бассейне реки Амур : материалы VI Международной

научно-практической конференции, Хабаровск, 28 апреля – 4 мая 2017 г. – Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2017. – С. 27–31.

27. Строение и физические свойства древесины : сборник статей / под ред. Ю.М. Иванова. – Москва ; Ленинград : АН СССР, Ленинградское отделение, 1962. – 158 с.

28. Химия древесины / Н.И. Никитин, Л.А. Иванов, С.И. Ванин [и др.] ; Наркомлес СССР. – Ленинград : Гослестехиздат, 1935. – 377 с.

29. Глебов, И.Т. Физика древесины : учебное пособие / И.Т. Глебов. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2018. – 80 с.

30. Асеева, Р.М. Горение и пожарная опасность древесины / Р.М. Асеева, Б.Б. Серков, А.Б. Сивенков // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – № 1. – С. 19–32.

31. Древесина // Энциклопедия пожарной безопасности. – URL: <https://xn--b1ae4ad.xn--plai/enc/drevesina> (дата обращения: 26.11.2023).

32. Современные представления о строении целлюлоз (обзор) / Л.А. Алешина, С.В. Глазкова, Л.А. Луговская [и др.] // Химия растительного сырья. – 2001. – № 1. – С. 5–36.

33. Гемицеллюлозы / М.С. Дудкин, В.С. Громов, Н.А. Ведерников [и др.]. – Рига : Зинатне, 1991. – 488 с.

34. Азаров, В.И. Химия древесины и синтетических полимеров : учебник для вузов / В.И. Азаров, А.В. Буров, А.В. Оболенская. – Санкт-Петербург : СПбЛТА, 1999. – 628 с.

35. Физика древесины : учебное пособие по выполнению лабораторных работ / А.Н. Чубинский, А.А. Тамби, М.А. Чубинский, К.В. Чаузов. – Санкт-Петербург : СПбГЛТУ, [б. г.]. – 67 с.

36. Бойцова, К.Н. Влияние влажности на прочность древесины / К.Н. Бойцова // Фундаментальные и прикладные аспекты развития современной науки : сборник трудов по материалам Международного конкурса научно-исследовательских работ, Уфа, 20 мая 2020 г. – Уфа : ООО «Научно-издательский центр "Вестник науки"», 2020. – С. 302–306.

37. Стенина, Е.И. Защита древесины и деревянных конструкций : учебное пособие / Е.И. Стенина, Ю.Б. Левинский ; Федеральное агентство по образованию, Урал. гос. лесотехн. ун-т. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2011. – 223 с.

38. Морозов, В.И. Технологический процесс заготовки и переработки древесной зелени хвойных пород / В.И. Морозов, Н.А. Петрушева // Лесотехнический журнал. – 2019. – № 3 (35). – С. 131–139.

39. Чернышев, А.Н. Технология аэродинамической сушки древесины хвойных пород без искусственного увлажнения / А.Н. Чернышев // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2011. – № 30. – С. 236–238.

40. Ветошкин, Ю.И. Отделка древесины хвойных пород с повышенным содержанием смолы / Ю.И. Ветошкин, О.Н. Чернышев, А.Н. Ильичева // Известия вузов. Лесной журнал. – 2005. – № 3. – С. 106–113.

41. Щелокова, Т.Н. Современные тенденции улучшения свойств древесины и деревянных строительных конструкций / Т.Н. Щелокова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2018. – № 6. – С. 39–45.

42. Защита древесины // Фансип. – URL: [http://fansip.ru/zaschita\\_drevesiny](http://fansip.ru/zaschita_drevesiny) (дата обращения: 04.12.2023).

43. Волокитин, О.Г. Перспективы технологии создания защитно-декоративных покрытий на поверхности древесины с использованием плазменной технологии / О.Г. Волокитин, Н.А. Цветков, Г.Г. Волокитин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 1. – С. 112–116.

44. Правила пропитки древесины натуральным маслом // Progermetik. – URL: <https://progermetik.ru/articles/naznachenie-i-osnovnye-etapy-propitki-dereva-maslom.html> (дата обращения: 06.12.2023).

45. Выбор и правила нанесения масла для древесины // Гуру красок. – URL: <https://kraska.guru/specmaterialy/zashhita-drevesiny/maslo-dlya-obrabotki.html#tehnologii-propitki> (дата обращения: 06.12.2023).

46. Леонтьев, Н.Л. Влияние температуры на механические свойства древесины сосны / Н.Л. Леонтьев // Вестник инженеров и техников. – 1952. – № 1. – С. 21–23.
47. Расев, А.И. Сушка древесины : учебник для ПТУ / А.И. Расев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1990. – 224 с.
48. Справочник по сушке древесины / Е.С. Богданов, В.А. Козлов, В.Б. Кунтыш, В.И. Мелехов ; под ред. Е.С. Богданова. – Москва : Лесная промышленность, 1990. – 304 с.
49. Чулицкий, Н.Н. Исследование факторов характеристик режимов сушки древесины / Н.Н. Чулицкий // Труды ВИАМ. – Москва : ВИАМ, 1934. – Вып. 13. – 164 с.
50. Дьяконов, К.Ф. Влияние температурных режимов сушки на прочность древесины березы и лиственницы / К.Ф. Дьяконов // Деревообрабатывающая промышленность. – 1965. – № 2. – С. 9–10.
51. Обжиг дерева: материалы, технология, правила проведения // Химсырье. – URL: <https://him-kont.ru/obzhig-dereva-materialy-tehnologiya-pravila-provedeniya/> (дата обращения: 10.12.2023).
52. Leforest Wood Finishing // Leforest company. – URL: <https://leforest.uk/about> (дата обращения: 10.12.2023).
53. Обжиг древесины или как защитить дерево от гниения // Упрораба. – URL: <https://u-proraba.ru/obzhig-drevesiny/#i-3> (дата обращения: 11.12.2023).
54. Термомодификация древесных материалов / Р.Г. Сафин, Д.А. Ахметова, А.В. Сафина, Т.О. Степанова // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – № 22. – С. 112–118.
55. Шарапов, Е.С. Исследование влияния термической модификации на изменение плотности древесины по годичным слоям / Е.С. Шарапов, А.С. Королев, А.Р. Хисамеева // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – № 22. – С. 101–103.

56. Соколов, И.В. Термодревесина, ее отличие от обычной древесины, достоинства и недостатки / И.В. Соколов // Вестник науки. – 2023. – № 8 (65). – С. 194–200.

57. Анализ технологических подходов к термической модификации древесины в России, вопросы повышения и подтверждения качества ТМД / В.Ю. Чернов, М.С. Чернова, Е.М. Мальцева, А.А. Домрачева // Техническое регулирование в едином экономическом пространстве : сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Екатеринбург, 23 мая 2019 г. – Екатеринбург, 2019. – С. 151–157.

58. Сафин, Р.Р. Разработка новой технологии получения термодревесины / Р.Р. Сафин, Е.А. Белякова, Е.Ю. Разумов // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 1. – С. 157–162.

59. Бойко, Н.И. Основные области применения в промышленности плазменных технологий / Н.И. Бойко, В.А. Одарюк, А.В. Сафонов // Технологии гражданской безопасности. – 2015. – № 4 (46). – С. 70–73.

60. Kogelschatz, U. Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications / U. Kogelschatz // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 2003. – V. 23. – P. 1–46.

61. Плазма: четвертое состояние вещества, свойства и применение // Знание. РФ. – URL: <https://znanierussia.ru/articles/Плазма> (дата обращения: 17.12.2023).

62. Баллыев, С.Б. Особенности применения плазменных методов в легкой промышленности / С.Б. Баллыев, Р.Р. Хабиров // Современные проблемы и перспективные направления инновационного развития науки : сборник статей Международной научно-практической конференции, Таганрог, 11 июля 2019 г. – Таганрог : ООО «ОМЕГА САЙНС», 2019. – С. 21–26.

63. Как плазма используется в промышленности // HighTech.FM. – URL: <https://hightech.fm/2024/06/18/plasma-industry> (дата обращения: 18.12.2023).

64. Авторское свидетельство 172663 СССР. Способ обработки строительных изделий : № 883888/29–14 : заявл. 24.02.64 : опубл. 29.06.65 / Корсак Н.Г. – Бюл. №13.

65. Авторское свидетельство № 636115 СССР. Способ отделки облицовочных изделий : № 2162096/29–33 : заявл. 15.09.1975 : опубл. 05.12.1978 / Быков А.С., Резник В.Ю., Титов Ю.А.

66. Авторское свидетельство № 1040754 А1 СССР. Способ получения защитно-декоративного покрытия на силикатных изделиях : № 3380291 : заявл. 14.01.1982 : опубл. 07.07.1993 / Волокитин Г.Г., Романюк Т.Ф., Скрипникова Н.К. [и др.] ; заявитель Томский инженерно-строительный институт.

67. Плазменные технологии создания и обработки строительных материалов / В.А. Власов, Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова [и др.] ; Том. гос. архит.-строит. ун-т. – Томск : Изд-во НТЛ, 2018. – 509 с.

68. Плазменные технологии в строительстве / Г.Г. Волокитин [и др.]. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2005. – 290 с.

69. Козлова, В.К. Использование низкотемпературной плазмы для защитно-декоративного покрытия бетона / В.К. Козлова, В.Г. Безбородов, Б.Л. Желнов // Тезисы докладов научно-технической конференции, посвященной 60-летию института, Новосибирск, 1–30 апреля 1990 г. – Новосибирск : Новосибирский инженерно-строительный институт им. В.В. Куйбышева, 1990. – С. 221.

70. Куликова, Г.А. Технология создания защитно-декоративного покрытия на бетонных изделиях с помощью низкотемпературной плазмы : специальность 05.17.11 : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Куликова Галина Адалловна ; Том. политехн. ун-т. – Томск, 1996. – 24 с.

71. Avramidis, G. Wood veneer modification by atmospheric pressure plasma treatment for improved absorption characteristics / G. Avramidis // Proceedings of the fifth European conference on wood modification, Riga, Latvia. – Riga, 2018. – P. 365–373.

72. Применение низкотемпературной плазменной обработки для повышения механических показателей клееных конструкций / Р.Р. Хасаншин, К.В. Саерова, Н.Р. Галяветдинов [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. – 2021. – № 4. – С. 67–74.

73. Gerullis, S. Influence of atmospheric pressure plasma jet and diffuse coplanar surface barrier discharge treatments on wood surface properties: a comparative study / S. Gerullis // Plasma Processes and Polymers. – 2018. – V. 15. – № 10. – Article 1800058.

74. Саерова, К.В. Влияние высокочастотной низкотемпературной плазменной обработки на химический состав термически модифицированного древесного наполнителя / К.В. Саерова, Р.Р. Сафин, Ю.А. Тимошина // Системы. Методы. Технологии. – 2024. – № 3 (63). – С. 173–179.

75. Патент № 2185283 С2 Российская Федерация, МПК В27К 3/15, В27К 3/34, В27М 3/16. Способ обработки древесины для музыкальных инструментов : № 2000100656/04 : заявл. 10.01.2000 : опубл. 20.07.2002 / Гавриленко И.Б., Ерузин А.А., Цой Ю.И. [и др.] ; заявитель Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет). – EDN: CRNSBE

76. Онегин, В.И. Плазмохимическая обработка поверхности древесины для улучшения ее резонансных свойств / В.И. Онегин. – Москва : ВИНТИ, 1997. – 10 с. – № 1414–В97.

77. Патент № 2484951 С1 Российская Федерация, МПК В27К 5/00. Способ получения защитно-декоративного покрытия на древесине : № 2012104467/13 : заявл. 08.02.2012 : опубл. 20.06.2013 / Волокитин О.Г., Черкашина Н.А., Волокитин Г.Г., Цветков Н.А.

78. Распределение температурных полей при плазменной обработке поверхности древесины / Г.Г. Волокитин, О.Г. Волокитин, В.В. Шеховцов [и др.] // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 3. – С. 120–127.



79. Эркинов, Р.Н. Плазменная технология обработки древесины / Р.Н. Эркинов, П.В. Балобанов // Избранные доклады 64-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых, Томск, 24 апреля 2018 г. – Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. – С. 413–415.

80. Модификация поверхности древесины при помощи плазменной обработки / О.А. Кунц, Г.Г. Волокитин, В.В. Шеховцов [и др.] // Инвестиции, градостроительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения : материалы XI Международной научно-практической конференции, Томск, 2–4 марта 2021 г. – Томск : Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2021. – С. 359–365.

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

82. Резак плазменный (плазмотрон) ВПР-410 // Шторм. – URL: <https://shtorm.ru/catalog/plazmotron-vpr-410/> (дата обращения: 27.12.2023).

83. Власов, А.И. Оптическая микроскопия / А.И. Власов, К.А. Елсуков, И.А. Косолапов. – Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 184 с.

84. Сканирующий электронный микроскоп Quanta 200 3D // ЦКПНО «Диагностика микро- и наноструктур». – URL: <http://nano.yar.ru/equipment/Quanta3D200i/> (дата обращения: 05.01.2024).

85. Цветовой каталог RAL: история возникновения // ПулверСПб. – URL: <https://pulverspb.ru/articles/cvetovoj-katalog-ral-istorija-vozniknovenija/> (дата обращения: 06.01.2024).

86. Колориметр RAL ColorReader – руководство пользователя // RAL colours. – URL: <https://ral-farben.ru/kolorimetr-ral-colorreader-rukovodstvo-polzovatelja/> (дата обращения: 07.01.2024).

87. ГОСТ 16483.10–73. Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон. – Москва : Изд-во стандартов, 1999. – 6 с.

88. ГОСТ 16483.3–84. Древесина. Метод определения предела прочности при статическом изгибе. – Москва : Изд-во стандартов, 1999. – 7 с.

89. ГОСТ 33120–2014. Конструкции деревянные клееные. Методы определения прочности клеевых соединений. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 18 с.

90. ГОСТ 9012–86. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю. Взамен ГОСТ 9012–73 : введ. 01.01.1987. – Москва : Изд-во стандартов, 1987. – 15 с.

91. Instron. 3380 Series Universal Testing Systems up to 100 kN (22,500 lbf) Force Capacity // Instron. – URL: <https://www.instron.com/en/products/testing-systems/universal-testing-systems/high-force-universal-testing-systems/3380-floor-model/> (дата обращения: 09.01.2024).

92. Техническое описание трибометров CSEM Instruments. – Санкт-Петербург : ООО «Ниеншанц-Сайнтифик», 2011. – 30 с. – URL: [https://lab-nnz.ru/wp-content/uploads/1-TRB\\_TS\\_2011-RUS.pdf](https://lab-nnz.ru/wp-content/uploads/1-TRB_TS_2011-RUS.pdf) (дата обращения: 11.01.2024).

93. ГОСТ Р 53292–2009. Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на ее основе. Общие требования. Методы испытаний : утвержден Приказом Ростехрегулирования от 18.02.2009 № 68-ст : введен в действие 01.01.2010. – 16 с.

94. Альмяшев, В.И. Термические методы анализа : учебное пособие / В.И. Альмяшев, В.В. Гусаров ; СПбГЭТУ (ЛЭТИ). – Санкт-Петербург, 1999. – 40 с.

95. Kansa, S.E. Mathematical model of Wood Pyrolysis / S.E. Kansa, H.E. Perles, R.F. Chaiken // Combustion and Flame. – 1977. – V. 29. – P. 311–324.

96. Гришин, А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. – Новосибирск : Наука, Сибирское отделение, 1992. – 408 с.

97. Гришин, А.М. Общая физико-математическая модель зажигания и горения древесины / А.М. Гришин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2010. – № 2. – С. 60–70.

98. Годунов, С.К. Разностные схемы (введение в теорию) / С.К. Годунов, В.С. Рябенский. – Москва : Наука, 1977. – 440 с.

99. Полежаев, Ю.В. Тепловая защита / Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юревич. – Москва : Энергия, 1976.

100. Гришин, А.М. Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред / А.М. Гришин, В.М. Фомин. – Новосибирск : Наука, 1985.

101. Физические величины : справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

102. Тепловые свойства древесины // Большая Российская Энциклопедия. – URL: <https://bigenc.ru/c/teplovye-svoistva-drevesiny-1e0a39> (дата обращения: 14.01.2024).

103. Пилюгин, Н.Н. Динамика ионизованного излучающего газа / Н.Н. Пилюгин, Г.А. Тирский. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 1989. – 309 с.

104. Гришин, А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. – Новосибирск : Наука, Сибирское отделение, 1992. – 408 с.

105. Плазменная обработка древесины / Г.Г. Волокитин, Н.К. Скрипникова, В.А. Сеницын, О.Г. Волокитин // Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Т. 23. – № 1. – С. 125–130.

106. Пиролиз древесины // Большая Российская Энциклопедия. – URL: <https://bigenc.ru/c/piroliz-drevesiny-db4847> (дата обращения: 16.01.2024).

107. Термодинамические свойства индивидуальных веществ : справочное издание. Том. I. Книга 2. – Москва : Наука, 1978. – 328 с.

108. Термодинамические свойства индивидуальных веществ : справочное издание. Том. II. Книга 2. – Москва : Наука, 1979. – 344 с.
109. Термодинамические свойства индивидуальных веществ : справочное издание. Том. I. Книга 1. – Москва : Наука, 1978. – 496 с.
110. Общая химия в формулах, определениях, схемах / И.Е. Шиманович, М.Л. Павлович, В.Ф. Тикавый, П.М. Малашко. – Москва : Полымя, 1996. – 510 с.
111. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – Москва : Энергия, 1977.
112. Лунев, В.В. Течения реальных газов с большими скоростями / В.В. Лунев. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 760 с.
113. Таблицы термодинамических функций воздуха (для температур от 200 до 6000 К и давлений от 0,00001 до 100 атмосфер) / А.С. Предводителев, Е.В. Ступоченко, А.С. Плешанов [и др.]. – Москва : Вычислительный центр АН СССР, 1962. – 268 с.
114. Самарский, А.А. Введение в теорию разностных схем / А.А. Самарский. – Москва : Наука, 1971. – 552 с.
115. Меркулова, Н.Н. Методы приближенных вычислений : учебное пособие / Н.Н. Меркулова, М.Д. Михайлов. – Томск : Издательский Дом ТГУ, 2014. – 764 с.
116. О математической модели взаимодействия высокотемпературного потока плазмы с поверхностью древесины / **В.А. Черемных**, В.Д. Гольдин, Г.Г. Волокитин, А.А. Клопотов [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2024. – № 88. – С. 138–148. – DOI: 10.17223/19988621/88/11
117. Теплофизические процессы при эксплуатации и в технологии производства энергоэффективного деревянного бруса с поперечными коннекторами / Г.Г. Волокитин, А.А. Клопотов, Н.А. Цветков, А.В. Толстых, **В.А. Черемных** // Енисейская теплофизика : тезисы докладов I Всероссийской научной конференции с международным участием, Красноярск, 28–31 марта 2023 г. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2023. – С. 96–98.

118. Глебов, И.Т. Резание древесины : избранные лекции / И.Т. Глебов. – Екатеринбург : Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2005. – 98 с.

119. Фридрих, А.П. Влияние упруго-вязких свойств древесины и режимов обработки на шероховатость поверхности при фрезеровании / А.П. Фридрих, А.П. Клубков, А.И. Санкович // Механическая технология древесины : республиканский межведомственный сборник. Вып. 5. – Минск : Высшэйшая школа, 1975. – С. 138–143.

120. Клубков, А.П. Исследование шероховатости поверхности при фрезеровании древесины острым и затупленным инструментом / А.П. Клубков, А.И. Санкович // Механическая технология древесины. Вып. 1. – Минск, 1971. – С. 94.

121. Тарбеева, Н.А. Механизм формирования модифицированного поверхностного слоя заготовок из древесины / Н.А. Тарбеева, О.А. Рублева // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века : труды XVI Международного евразийского симпозиума, 21–24 сентября 2021 г. – Екатеринбург, 2021. – С. 23–28.

122. Чубинский, А.Н. Влияние строения и свойств древесины на прочность ее склеивания / А.Н. Чубинский, А.А. Тамби, А.А. Федяев // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2010. – № 190. – С. 155–162.

123. Горбунов, Д.Е. Влияние условий пиролиза на выход жидких продуктов / Д.Е. Горбунов, Д.В. Цыбаев // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2010. – № 27. – С. 46–48.

124. Орлов, А.А. Исследование свойств термомодифицированной древесины и параметров сформированных лакокрасочных покрытий на ее поверхности / А.А. Орлов, Г.А. Логинова, Н.А. Романова // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 2 (30). – С. 138–144. – DOI: 10.18324/2077-5415-2016-2-138-144

125. Костюкевич, В.М. Термомодифицированная древесина как строительный материал / В.М. Костюкевич // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2013. – № 4 (133). – С. 79–83.

126. Moving towards sustainable manufacturing by extending the tool life of the pine wood planing process using the AlCrBN coating / K. Nadolny, W. Kapłonek, M. Sutowska [et al.] // *Sustainable Materials and Technologies*. – 2021. – V. 28. – Article e00259. – DOI: 10.1016/j.susmat.2021.e00259

127. Korkut, S. The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood / S. Korkut, M. Akgül, T. Dündar // *Bioresource Technology*. – 2008. – V. 99. – № 6. – P. 1861–1868. – DOI: 10.1016/j.biortech.2007.03.038

128. Cai, C. Effects of environmental conditions on physical and mechanical properties of thermally modified wood / C. Cai, H. Heräjärvi, A. Naapala // *Canadian Journal of Forest Research*. – 2019. – V. 49. – № 11. – P. 1434–1440. – DOI: 10.1139/cjfr-2019-0180.

129. Кузнецов, В.В. Экспериментальные исследования механических свойств термомодифицированной древесины / В.В. Кузнецов, П.С. Иванов, Е.А. Смирнова // *Вестник науки и образования*. – 2021. – № 12. – С. 45–52.

130. Смирнов, Д.В. Модифицирование древесины микроволновой энергией с повышением твердости и упругости / Д.В. Смирнов, И.М. Козлова // *Современные технологии в деревообработке : материалы конференции*. – 2022. – С. 78–84.

131. Иванова, Т.С. Термообработка древесины – технология и преимущества, включая повышение твердости и прочности / Т.С. Иванова // *Stanki.ru*. – URL: [https://www.stanki.ru/articles/stati\\_po\\_derevoobrabotke/termo-obrabotka\\_drevesiny\\_tekhnologiya\\_kamery\\_i\\_preymushchestva/](https://www.stanki.ru/articles/stati_po_derevoobrabotke/termo-obrabotka_drevesiny_tekhnologiya_kamery_i_preymushchestva/) (дата обращения: 25.01.2024).

132. Korkut, S. The effects of heat treatment on some technological properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood / S. Korkut, M. Akgul, T. Dundar // *Bioresource Technology*. – 2008. – V. 99. – № 6. – P. 1861–1868. – DOI: 10.1016/j.biortech.2007.03.038

133. Korkut, D.S. The effects of heat treatment on physical properties and surface roughness of red-bud maple (*Acer trautvetteri* Medw.) wood / D.S. Korkut, B. Güller // *Bioresource Technology*. – 2008. – V. 99. – № 8. – P. 2846–2851.

134. Sandberg, D. Wood modification technologies - a review / D. Sandberg, A. Kutnar, G. Mantanis // *iForest*. – 2017. – V. 10. – P. 895–908. – DOI: 10.3832/ifor2380-010

135. Шарапов, Е.С. Исследование влияния термической модификации на изменение плотности древесины по годичным слоям / Е.С. Шарапов, А.С. Королёв, А.Р. Хисамеева // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2013. – № 22. – С. 101–103.

136. Орлов, А.А. Исследование свойств термомодифицированной древесины и параметров сформированных лакокрасочных покрытий на ее поверхности / А.А. Орлов, Г.А. Логинова, Н.А. Романова // *Системы. Методы. Технологии*. – 2016. – № 2 (30). – С. 138–144.

137. Скуратов, Н.В. Снижение прочности и потемнение древесины при камерной сушке / Н.В. Скуратов // *Вестник МГУЛ – Лесной вестник*. – 2010. – № 4. – С. 125–128.

138. Никифоров, Е.П. Клееная древесина: технология изготовления, свойства, преимущества и недостатки, области применения / Е.П. Никифоров // *Современные научные исследования и инновации*. – 2019. – № 7 (99). – С. 6.

139. Иванов, А.А. Технология производства, свойства, преимущества и недостатки клееной древесины / А.А. Иванов // *Современные научные исследования и инновации*. – 2021. – № 6 (122). – URL: <https://web.snauka.ru/issues/2021/06/95651>

140. Рыкунин, С.Н. Влияние изменения параметров сосновых пиломатериалов на формирование качества стенового клееного бруса / С.Н. Рыкунин, Н.В. Кривощёков // *Лесной вестник*. – 2017. – Т. 21. – № 6. – С. 50–53.

141. Surface free energy and dynamic wettability of wood simultaneously treated with acidic dye and flame retardant / X. Wang, F. Wang, Z. Yu [et al.] // *Journal of Wood Science*. – 2017. – V. 63. – P. 271–280. – DOI: 10.1007/s10086-017-1621-8

142. Demir, A. Surface free energy, wettability and bonding of plywood after fire-retardant treatment with various chemicals / A. Demir, I. Aydin // *Journal of Adhesion Science and Technology*. – 2022. – V. 37. – № 2. – P. 284–295. – DOI: 10.1080/01694243.2022.2030574

143. Криворотова, А.И. Исследование свойств клееных материалов на основе термически модифицированного шпона / А.И. Криворотова, А.А. Орлов // *Хвойные бореальной зоны*. – 2018. – № 6. – С. 548–554.

144. Поверхностные энергетические характеристики композитов на основе природных полимеров / С.С. Глазков, В.А. Козлов, А.Е. Пожидаева, О.Б. Рудаков // *Сорбционные и хроматографические процессы*. – 2009. – Т. 9. – Вып. 1. – С. 58.

145. Ломакин, А.Д. Определение паропроницаемости и водопроницаемости защитных покрытий на древесине / А.Д. Ломакин // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2013. – № 10. – С. 36–39.

146. Стородубцева, Т.Н. Защита древесины от влаги и гниения / Т.Н. Стородубцева, А.А. Аксомитный, Т.С. Донских // *Воронежский научно-технический вестник*. – 2014. – Т. 3. – № 4 (10). – С. 68–73.

147. Девятникова, Л.А. Влияние условий эксплуатации на разрушение конструкций жилых домов из древесины / Л.А. Девятникова, А.А. Симонова // *Resources and Technology*. – 2020. – Т. 17. – № 3. – С. 36–49. – DOI: 10.15393/j2.art.2020.5242

148. Егорова, А.Д. Характерные особенности термодревесины как строительного материала / А.Д. Егорова // *Тенденции развития науки и образования*. – 2024. – № 106–10. – С. 38–43. – DOI: 10.18411/trnio-02-2024-549

149. Бондарцев, А.С. Пособие для определения домовых грибов / А.С. Бондарцев ; Акад. наук СССР, Ботан. ин-т им. В.Л. Комарова. – Москва ; Ленинград : Изд-во Акад. наук СССР, 1956. – 80 с.

150. Влияние термической обработки на механические свойства разных сортов древесины / **В.А. Черемных**, Г.Г. Волокитин, А.А. Клопотов [и др.] // *Новые материалы и технологии : сборник научных статей IX Российско-*



Казахстанской молодежной научно-технической конференции. – Барнаул : Изд-во Алт. гос. ун-та, 2021. – С. 110.

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

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

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

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

155. Перспективы использования древесины, обработанной низкотемпературной плазмой в машиностроении / **В.А. Черемных**, И.Г. Волокитин, Ю.А. Власов, А.А. Клопотов // Современные проблемы

машиностроения : сборник трудов XV Международной научно-технической конференции, Томск, 22–25 ноября 2022 г. – Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2022. – С. 162–163.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

166. Влияние воздействия высокоэнтальпийным плазменным пучком на поверхность древесины / Г.Г. Волокитин, А.А. Клопотов, **В.А. Черемных** [и др.]

// Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование : материалы XXII Всероссийской научной конференции, Хабаровск, 30 сентября – 4 октября 2024 г. – Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2024. – С. 141–145.

167. Патент № 2822045 С1 Российская Федерация, МПК В27К 5/00. Установка для обработки поверхности изделий из древесины низкотемпературными потоками плазмы : № 2023127759 : заявл. 27.10.2023 : опубл. 28.06.2024 / Волокитин Г.Г., **Черемных В.А.**, Сизов Н.В. ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет».

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

169. Рентгенография и электронная микроскопия материалов : учебное пособие / В.Д. Андреева, Е.В. Новиков, И.К. Боричева, А.Б. Спешилова. – Санкт-Петербург : Политехнический университет, 2008. – 180 с.

170. Романенко, А.В. Углеродные материалы и их физико-химические свойства / А.В. Романенко, П.А. Симонов ; под общ. ред. А.С. Носкова. – Москва : Калвис, 2007. – 109 с.

171. Нанотрибология кластеров меди / А.А. Кужаров, А.А. Милов, Ю.С. Герасина [и др.] // Российские нанотехнологии. – 2016. – Т. 11. – № 9–10. – С. 69–75.

172. Polymer Composites: from Nano- to Macroscale / ed. by K. Friedrich, S. Fakirov, Z. Zhang. – Berlin : Springer, 2005. – 368 p.

173. Sokolov, V.I. The fullerenes - new allotropic forms of carbon: molecular and electronic structure, and chemical properties / V.I. Sokolov, I.V. Stankevich // Russian Chemical Reviews. – 1993. – V. 62. – № 5. – P. 419–435.

174. ГОСТ 20799–2022. Масла индустриальные. Технические условия. Взамен ГОСТ 20799–88 : введен в действие 01.07.2023 г. – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – 12 с.

175. ГОСТ 520–2011. Подшипники качения. Общие технические условия : введен в действие 01.07.2012. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 66 с.

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

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

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



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

пл. Соляная, 2, г. Томск, 634003, телефон (3822) 65-32-61, факс (3822) 65-24-22, e-mail: cano@tsuab.ru  
ОКПО 02069295690001, ОГРН 1027000882886 ИНН/КПП 702000080/701701001



### Справка

#### О внедрении научно-исследовательских результатов в учебный процесс

Теоретические и экспериментальные результаты исследований, полученные при выполнении диссертационной работы В.А. Черемных «Строительные изделия из древесины хвойных пород, модифицированные низкотемпературной плазмой» используются в учебном процессе ФГБОУ ВО Томского государственного архитектурно-строительного университета при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство», профиль «Материалы для строительства и эксплуатации объектов нефтегазовой отрасли». Это отражено в рабочей программе дисциплины «Неметаллические строительные материалы и изделия».

Зав. кафедрой ПМиМ,  
д.т.н., профессор

Г.Г. Волокитин

### **Математическая модель теплового режима древесины при плазменной обработке её поверхности**

Рассматривается деревянная пластина, которая подвергается обработке струей низкотемпературной плазмы конечной ширины, направленной параллельно поверхности и перемещающейся вдоль неё с постоянной скоростью. При этом предполагается, что параметры струи не меняются по ширине пластины.

Под действием конвективного теплового потока от струи плазмы в тонком приповерхностном слое древесины при высоких температурах происходит её термическое разложение (пиролиз) с изменением структуры и образованием газообразных продуктов. В разделе 3.1 на основе термогравиметрического анализа предложена модель разложения древесины, учитывающая 4 стадии пиролиза, и определены кинетические параметры каждой стадии для образцов из лиственницы. Согласно этой модели, в произвольный момент времени материал представляет собой шестикомпонентную смесь, состоящую из газообразных продуктов пиролиза и 5 компонентов в твердом состоянии, соответствующих отдельным стадиям пиролиза.

Для описания теплового поля внутри древесины используется математическая модель пористого реагирующего тела [95, 96], в которой учитываются следующие процессы:

- 1) передача тепла во внутренних областях за счёт механизма теплопроводности;
- 2) пиролиз древесины с изменением её структуры и образованием газообразных продуктов;
- 3) фильтрация газообразных продуктов пиролиза к внешней поверхности тела и перенос тепла за счёт этого механизма.

Температурное поле внутри деревянной пластины описывается уравнением энергии:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y}(G_g h_g) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y}\right). \quad (11)$$

Здесь

$t$  – время, с;

$x, y$  – геометрические координаты, отсчитываемые вдоль и вглубь пластины, м;

$U$  – энтальпия единицы объема материала, Дж/м<sup>3</sup>, которая вычисляется по значениям удельных энтальпий компонентов;

$h_g$  – удельная энтальпия газовой компоненты, Дж/кг;

$G_g$  – удельный расход газообразных продуктов разложения в направлении нагреваемой поверхности, кг/(м<sup>2</sup>·с) ( $G_g < 0$ );

$T$  – температура, К;

$\lambda_{eff}$  – эффективный коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К).

Следует отметить, что теплопроводность древесины анизотропна – коэффициент теплопроводности вдоль волокон превышает соответствующий коэффициент поперек волокон в 2–3 раза [97, 98]. Однако ориентация волокон не всегда параллельна длинной стороне доски. С другой стороны, при больших температурах после термического разложения следует ожидать, что анизотропность распространения тепла будет снижаться. Кроме того, градиенты температуры по глубине материала гораздо больше, чем вдоль его поверхности. По этим причинам в уравнении (11) используется только один эффективный коэффициент теплопроводности.

В уравнение (11) неявно входят значения плотности компонентов материала, которые определяются из уравнений кинетики пиролиза. В соответствии с моделью, приведенной в разделе 3.1, эти уравнения берутся в виде

$$\frac{d\rho_1}{dt} = -w_1,$$

$$\frac{d\rho_2}{dt} = -w_2,$$



$$\frac{d\rho_3}{dt} = v_2 w_2 - w_3, \quad (12)$$

$$\frac{d\rho_4}{dt} = v_3 w_3 - w_4,$$

$$\frac{d\rho_5}{dt} = v_4 w_4.$$

Здесь  $\rho_i$  – плотность  $i$ -го компонента, кг/м<sup>3</sup>,  $i = 1-5$ ; остальные обозначения совпадают с введенными в разделе 3.1. Там же приведены кинетические параметры реакций разложения.

В начальный момент времени плотность материала  $\rho = \rho_0 = \rho_1 + \rho_2$ , причем  $\rho_1 = \varphi \cdot \rho_0$ ;  $\rho_2 = \rho_0 - \rho_1$ ;  $\rho_3 = \rho_4 = \rho_5 = \rho_g = 0$ , где  $\varphi$  – начальное значение массовой доли легколетучих компонентов.

Суммарная плотность твердого остатка в любой момент времени

$$\rho_s = \sum_{i=1}^5 \rho_i,$$

текущая плотность материала  $\rho = \rho_g + \rho_s \approx \rho_g$ ; ( $\rho_g \ll \rho_s$ ). Как следует из системы уравнений (12), скорость убывания плотности твердого остатка равна

$$W = -\frac{\partial \rho_s}{\partial t} = w_1 + \sum_{i=2}^4 (1 - v_i) w_i.$$

Для определения скорости фильтрации газообразных компонентов необходимо рассмотреть закон сохранения массы твердого каркаса и материала в целом:

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} = -W, \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s + \rho_g) + \frac{\partial G_g}{\partial y} = 0.$$

Вообще говоря, скорость фильтрации газов и соответствующий их расход являются векторными величинами и должны, в соответствии с законом Дарси,

определяться по градиенту давления газов внутри материала. Однако поскольку процессы пиролиза происходят в тонком приповерхностном слое, градиент давления поперек которого много больше продольного градиента, то в законе сохранения массы и в уравнении энергии (11) можно учитывать только один компонент этих векторов, направленную к нагреваемой поверхности. Отсюда следует, что если дополнительно пренебречь плотностью газов по сравнению с плотностью твердого остатка, то величину  $G_g$  можно определять из уравнения

$$\frac{\partial G_g}{\partial y} = W \quad (14)$$

Энтальпия единицы объема материала ( $U$ ) вычисляется следующим образом:

$$U = \rho_g h_g + \sum_{i=1}^5 \rho_i h_i \approx \sum_{i=1}^5 \rho_i h_i, \quad (15)$$

где:

$h_i$  – удельная энтальпия  $i$ -компонента, Дж/кг:

$$h_i = \int_0^T c_i dT + h_{i0}$$

$c_i$  – удельная теплоемкость  $i$ -го компонента, Дж/(кг·К);

$h_{i0}$  – удельная энтальпия образования компонента, связанная с тепловым эффектом соответствующей реакции, Дж/кг.

В силу того, что плотность газа много меньше плотности любого твердого компонента, в формуле (15) опущено слагаемое, соответствующее энтальпии газа.

В соответствии с теорией химически реагирующих смесей ([96 с. 9], [99 глава 8, §13]) левую часть уравнения (11) можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \rho_g h_g + \sum_{i=1}^5 \rho_i h_i \right) + \frac{\partial}{\partial y} (G_g h_g) = \rho_g \frac{\partial h_g}{\partial t} + \sum_{i=1}^5 \rho_i \frac{\partial h_i}{\partial t} + \\ + h_g \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \sum_{i=1}^5 h_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + G_g \frac{\partial h_g}{\partial y} + h_g \frac{\partial G_g}{\partial y} = \rho c_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + G_g c_{pg} \frac{\partial T}{\partial y} - Q_s, \end{aligned} \quad (16)$$

где:

$c_{eff}$  – эффективная теплоемкость материала:

$$c_{eff} = c_{pg} \frac{\rho_g}{\rho} + \sum_{i=1}^5 c_i \frac{\rho_i}{\rho} \approx \sum_{i=1}^5 c_i \frac{\rho_i}{\rho}, \quad (17)$$

$c_{pg}$  – средняя удельная теплоёмкость газовых компонентов при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

$Q_s$  – суммарный тепловой эффект реакций разложения:

$$Q_s = -h_g \left( \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial G_g}{\partial y} \right) - \sum_{i=1}^5 h_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} = w_1 Q_1 + \sum_{i=2}^4 (1 - v_i) w_i Q_i, \quad (18)$$

$Q_i$  – тепловой эффект  $i$ -й реакции, Дж/кг,  $i = 1-4$  ( $Q_i > 0$  – для экзотермической реакции,  $Q_i < 0$  – для эндотермической).

Как известно, термическое разложение древесины может проходить как с поглощением, так и с выделением тепла с большим тепловым эффектом. В книге А.М. Гришина [100] приводится обзор работ, посвященных анализу тепловыделения при этих процессах. В [100] указано, что экзотермический эффект при пиролизе наблюдается при высоких температурах, больших 593 К (с. 178). По измерениям в дериватографе, приведенным в разделе 3.1, эти температуры соответствуют последней стадии пиролиза, которая идет с малой скоростью. Использование в расчетах значений теплового эффекта, приведенных в [100], и скорости реакции на этой стадии показывает, что тепловыделение на этом этапе слабо влияет на температурное поле (в пределах нескольких градусов) и практически не сказывается на глубине разложения. Этот факт можно объяснить слишком коротким временем теплового воздействия струи плазмы на древесину в рассматриваемой задаче.

Реакции пиролиза на других стадиях считаются эндотермическими в используемой математической модели. При этом тепловой эффект реакции выделения летучих компонентов не учитывается, поскольку их концентрация в сухой древесине мала. В результате в выражении для  $Q_s$  остаются только слагаемые, соответствующие второй и третьей стадии разложения. В настоящей работе принято  $Q_2 = Q_3 = Q = -370$  кДж/кг [100, с. 178]. В результате формула для вычисления суммарного теплового эффекта всех реакций принимает вид

$$Q_s = Q[(1-v_2)w_2 + (1-v_3)w_3] \quad (19)$$

В конечном итоге уравнение (11) приводится к виду

$$\rho c_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + G_g c_{pg} \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q_s \quad (20)$$

Рассмотрим граничные условия для системы уравнений (14), (20).

В глубине материала ставится условие отсутствия перетока тепла и потока фильтрации газовых компонентов:

$$y = h: \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad G_g = 0, \quad (21)$$

где  $h$  – глубина, до которой за все рассматриваемое время не доходит тепловая волна; в работе принято  $h = 0,005$  м.

Условия отсутствия теплового потока ставятся также на левой и правой границах в продольном направлении:

$$x = 0, \quad x = L: \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad (22)$$

где  $L$  – длина доски.

На поверхности, которая подвергается обработке ( $y = 0$ ), выставляются условия теплообмена с окружающей средой. Каждый участок поверхности проходит следующие этапы теплообмена [101]:

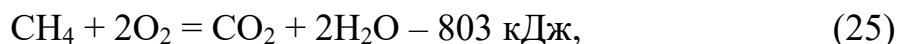
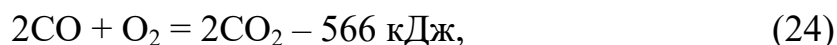
- начальный изотермический этап, когда температура пластины и температура окружающей среды одинаковы и теплообмен отсутствует;
- этап взаимодействия со струей плазмы; здесь происходит интенсивный нагрев древесины, при большой температуре возможно излучение с поверхности; кроме того, осуществляется выдув газообразных продуктов термического разложения дерева, их возможное горение и диффузия навстречу набегающему потоку;
- этап остывания поверхности; на этом этапе температура поверхности больше температуры окружающей среды, поэтому идет охлаждение пластины за счет механизма естественной конвекции; возможно также горение предварительно нагретых газообразных продуктов пиролиза.

В общем случае граничное условие на этой поверхности можно записать в виде:

$$q_w - \varepsilon_w \sigma T_w^4 - G_{gw}(H_w - h_w) = -\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y}. \quad (23)$$

Здесь  $q_w(x, t)$  – тепловой поток от пограничного слоя;  $\varepsilon_w$  – излучательная способность поверхности (степень черноты);  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана;  $H_w$  – значение удельной энтальпии внешнего газового потока на поверхности тела, Дж/кг;  $h_w$  – значение удельной энтальпии газообразных продуктов пиролиза, Дж/кг. В отсутствии горения и при составе вдуваемых газов, близком к составу набегающего потока,  $H_w = h_w$ , соответствующий член в граничном условии исчезает. Однако если на поверхности происходит горение, то разность  $H_w - h_w$  определяется тепловым эффектом реакций горения. Его значение сильно зависит от кинетики реакций, состава газов, а также от их диффузии в пограничный слой. Считается, что газовая смесь состоит главным образом из углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), угарного газа ( $\text{CO}$ ), метана ( $\text{CH}_4$ ) и малой доли других углеводородов. При этом концентрации газов зависят как от материала, так и от температуры [100]. Средние значения объемных концентраций приведены в Большой российской энциклопедии [100]:

$x(\text{CO}_2) = 0,48\text{--}0,60$ ,  $x(\text{CO}) = 0,28\text{--}0,33$ ,  $x(\text{CH}_4) = 0,035\text{--}0,18$ . Основной тепловой эффект вносит горение угарного газа и метана в соответствии с реакциями:



причем в последней реакции продуктом является водяной пар.

Тепловые эффекты получены по значениям энтальпий образования, приведенных в справочниках [103, 104]. В соответствии с законом Гесса [105, 106] тепловой эффект реакции может быть вычислен как разность энтальпий образования продуктов реакции и энтальпий образования исходных веществ. Например, тепловой эффект второй реакции  $\Delta H_2^\circ$  может быть получен по формуле

$$\begin{aligned} \Delta H_2^\circ &= H^\circ(\text{CO}_2) + 2H^\circ(\text{H}_2\text{O}) - H^\circ(\text{CH}_4) - 2H^\circ(\text{O}_2) = \\ &= -393,51 + 2 \cdot (-241,814) - (-74,6) \approx -803 \text{ кДж/моль} \end{aligned} \quad (26)$$

Здесь энтальпии образования при нормальных условиях соответствующих веществ  $H^\circ$  взяты из [103, 104] (при этом  $H^\circ(\text{O}_2) = 0$ ). Поскольку  $\Delta H_2^\circ < 0$ , то при реакции тепло выделяется, реакция является экзотермической.

Для грубой оценки теплового эффекта указанных реакций принято, что на поверхности материала кислород присутствует в избытке, поэтому все газы полностью сгорают в тонком слое около поверхности, диффузия в пограничный слой не учитывается. Кроме того, считается, что влияние вдува продуктов пиролиза в пограничный слой плазмы на значение коэффициента теплообмена мало, и продукты горения дают малый вклад в энтальпию струи. Поэтому при вычислении теплового эффекта можно принять

$$H_w - h_w = c(\text{CO})Q(\text{CO}) + c(\text{CH}_4)Q(\text{CH}_4). \quad (27)$$

Здесь  $c(\text{CO})$ ,  $c(\text{CH}_4)$  – массовые доли угарного газа и метана в продуктах пиролиза,  $Q(\text{CO})$ ,  $Q(\text{CH}_4)$  – соответствующие теплоты сгорания (Дж/кг). Значения массовых долей вычисляются по формулам [96, 99]:

$$c_i = \frac{m_i}{m} x_i, \quad m = m(\text{CO}_2)c(\text{CO}_2) + m(\text{CO})c(\text{CO}) + m(\text{CH}_4)c(\text{CH}_4), \quad (28)$$

где  $i$  принимает значения «CO<sub>2</sub>», «CO», «CH<sub>4</sub>»;  $m_i$  – молярные массы соответствующих веществ (кг/кмоль);  $m$  – молярная масса продуктов пиролиза в целом.

Для приведенных в [101, 102] диапазонов возможных концентраций продуктов пиролиза при разных температурах величина  $H_w - h_w$  может изменяться в 20 раз – от  $0,5 \cdot 10^7$  до  $10^8$  Дж/кг. Для получения более конкретных значений теплового эффекта требуется существенное усложнение модели. Для предварительных оценок термического режима древесины при обработке ее струей плазмы принято промежуточное значение  $H_w - h_w \approx 10^7$  Дж/кг. Полученное значение подставляется в граничное условие (23), при этом соответствующий член вносит положительный вклад в тепловую нагрузку, поскольку  $G_{gw} < 0$ .

Значение конвективного теплового потока  $q_w(x, t)$  в (23) вычисляется по-разному на разных стадиях теплообмена. Пусть  $\Delta$  – полуширина струи плазмы, перемещающейся вдоль поверхности пластины с постоянной скоростью  $V$ ,  $x_*$  – координата её центра,  $x_* = x_0 + Vt$ ,  $x_0$  – значение  $x_*$  в начальный момент времени. Тогда координаты левой и правой границ струи равны:  $x_1(t) = x_*(t) - \Delta$ ,  $x_2(t) = x_*(t) + \Delta$ .

На третьем этапе нагрева, при  $x < x_1(t)$ , конвективный тепловой поток можно вычислить по формуле

$$q_w = \alpha_0 (T_0 - T_w), \quad (29)$$

где  $T_0$  – температура внешней среды, совпадающая с начальной температурой пластины,  $\alpha_0$  – коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\alpha_0 = \frac{\lambda_0}{l} \text{Nu}, \quad (30)$$

где  $\lambda_0$  – коэффициент теплопроводности воздуха при температуре  $T_0$ ;  $l$  – ширина пластины, число Нуссельта  $Nu$  вычисляется по формуле, аппроксимирующей многочисленные экспериментальные данные по естественно конвективному охлаждению вертикально ориентированной пластины [105, с. 96]:

$$Nu = 0.15 (Gr_l Pr)^{0.33}, \quad Gr_l = \frac{\beta (T_w - T_0) g l^3 \rho_{e0}^2}{\mu_0^2}, \quad \beta = 1/T_0, \quad (31)$$

число Прандтля для воздуха  $Pr = 0,7$ ,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\rho_{e0}$ ,  $\mu_0$  – плотность и вязкость воздуха при температуре  $T_0$ . Формула для числа Нуссельта взята для турбулентного режима течения, т. к. характерное число Грасгофа в этой задаче  $Gr_l > 10^9$ .

Эти формулы можно использовать и на первом этапе теплообмена при  $x > x_2(t)$ . Необходимо иметь в виду, что из-за теплопроводности вдоль пластины её прогрев может несколько опережать движение струи плазмы, особенно при малой скорости её перемещения.

Для того, чтобы определить тепловой поток  $q_w(x, t)$  в области взаимодействия струи с поверхностью пластины, при  $x_1(t) < x < x_2(t)$ , нужно решать задачу обтекания плоской поверхности горячей струей конечного диаметра. В работе принят следующий приближенный подход: для вычисления  $q_w$  в задачах обтекания тел высокотемпературным газом вместо формулы (29) используется формула [108]:

$$q_w = \left( \frac{\alpha}{c_p} \right)_e (H_e - H_w), \quad (32)$$

где  $H_e$  – удельная полная энтальпия струи, определяемая параметрами работы плазматрона и смешением струи с окружающим воздухом,  $(\frac{\alpha}{c_p})_e$  – коэффициент конвективного теплообмена,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Эта формула применима в случаях,



когда скорость газа в струе является существенно дозвуковой и выполняется условие  $Le = 1$ . Число Льюиса характеризует соотношение между темпера-туропроводностью газа и диффузией его компонентов:  $Le = \lambda / (\rho \cdot c_p \cdot D)$ . Здесь  $\lambda$ ,  $D$  – коэффициенты диффузии и теплопроводности газа в струе. Вследствие смешения струи с холодным окружающим воздухом  $H_e$  не является постоянной величиной, её значение максимально в центре струи и убывает на её периферии. В настоящей работе этот эффект учитывается с помощью формулы

$$H_e = H_0 + (H_{e0} - H_0) \exp \left[ -A \left( \frac{x - x_*}{\Delta} \right)^2 \right], \quad (33)$$

где  $H_0$  – энтальпия окружающего воздуха;  $H_{e0}$  – энтальпия в центре струи, определяемая параметрами на выходе из сопла плазмотрона;  $\Delta$  – радиус теплового воздействия струи на доску; безразмерный коэффициент  $A$  выбирается так, чтобы на границе струи при  $x = x_* \pm \Delta$  значение теплового потока было малым. Например, если  $A = 3$ , то на границе струи  $H_e - H_0 \approx 0,05 (H_{e0} - H_0)$ . Как следует из (32), тепловой поток при этом тоже падает.

Полная удельная энтальпия струи на выходе из сопла  $H_{e0}$  вычисляется по значениям мощности плазмотрона с поправкой на коэффициент полезного действия (КПД), значение которого считалось равным 0,6:

$$H_{e0} = \eta N / G, \quad (34)$$

где  $N$  – мощность плазмотрона, Вт;  $\eta$  – КПД,  $G$  – массовый расход струи, кг/с. В расчетах принято значение  $G = 2,58 \cdot 10^{-3}$  кг/с, что соответствует объемному расходу 2 л/с.

Для вычисления коэффициента теплообмена используется формула, полученная для случая продольного обтекания пластины турбулентным потоком воздуха [108]:

$$\left(\frac{\alpha}{c_p}\right)_e = 0.0363 \rho_e U_e \text{Re}_e^{-0.2} \quad (35)$$

Здесь число Рейнольдса

$$\text{Re}_e = \frac{\rho_e U_e x}{\mu_e}, \quad (36)$$

где  $\rho_e$ ,  $U_e$ ,  $\mu_e$  – плотность, скорость и вязкость в центре струи;  $x$  – расстояние от передней кромки пластины.

Значения  $\rho_e$ ,  $U_e$  вычисляются по расходу струи и площади поперечного сечения сопла  $S$ :

$$\rho_e U_e = \frac{G}{S}; \quad (37)$$

Вязкость воздуха  $\mu_e$  определяется по температуре (формула Сатерленда); температура вычисляется по значению  $H_e$  с использованием таблиц термодинамических функций равновесного воздуха [109]. Поскольку в модели не учитывается неравномерность нагрева по ширине доски, то вместо  $x$  в формулу для числа Рейнольдса подставляется эффективное среднее значение, дающее ту же величину интегрального по ширине доски теплового потока:  $x_{eff} = 0.956 l$  ( $l$  – ширина доски).

Таким образом, задача определения теплового режима деревянной доски, подвергающейся тепловому воздействию струей плазмы, сводится к решению системы уравнений (12), (14), (20) с граничными условиями (21) – (23). В начальный момент времени задается температура доски  $T_0 = 293$  К, первоначальная плотность древесины и массовая доля легколетучих компонентов; плотность других компонентов твердого материала считается равной 0. Начальное положение оси струи  $x_0 = 2\Delta$ .

### Алгоритм численного решения задачи

Система уравнений (12), (14), (20) численно решается конечно-разностным методом; для построения разностной схемы используется метод конечного объема [110, 111]. Расчетная область  $0 \leq x \leq L$ ,  $0 \leq y \leq h$  покрывается прямоугольной сеткой:

$$\left\{ (x_i, y_j), i = 0, \dots, N_x, j = 0, \dots, N_y \right\}; \quad (38)$$

При этом по оси  $x$  строится равномерная сетка, по оси  $y$  – сгущающаяся к нагреваемой поверхности. Внутри каждой ячейки дифференциальные уравнения заменяются алгебраическими. На рисунке А1 показана типичная ячейка сетки с ближайшими её соседями. Значения температуры и плотностей компонентов твердых веществ определяются в центральной точке ячейки (точки М, N, E, S, W), значения тепловых потоков – в средних точках граней центральной ячейки (точки А, В, С, D), удельный расход газообразных продуктов разложения древесины – в точках В, D. Если ячейка представляет собой область  $[x_i, x_{i+1}] \times [y_j, y_{j+1}]$ , то эти точки имеют координаты:

$$M(x_{i+1/2}, y_{j+1/2}), N(x_{i+1/2}, y_{j+3/2}), E(x_{i+3/2}, y_{j+1/2}), S(x_{i+1/2}, y_{j-1/2}), W(x_{i-1/2}, y_{j+1/2}), \\ A(x_{i+1}, y_{j+1/2}), B(x_{i+1/2}, y_{j+1}), C(x_i, y_{j+1/2}), D(x_{i+1/2}, y_j)$$

где полуцелые индексы означают полусумму ближайших координат, например:

$$x_{i+1/2} = \frac{1}{2}(x_i + x_{i+1}).$$

Для получения разностных уравнений дифференциальные уравнения интегрируются по центральной ячейке, а для интегралов применяются стандартные квадратурные формулы. Производная по времени заменяется конечной разностью первого порядка так, чтобы в результате получилась неявная схема.

В результате для системы уравнений (12) получается схема, аналогичная схеме (8) – (10), приведенной в подразделе 3.1:

$$\frac{\rho_{i,M}^n - \rho_{i,M}^{n-1}}{\tau} = -\rho_{i,M}^n R_i(T_M^n), \quad i = 1, 2; \quad (39)$$

$$\frac{\rho_{i,M}^n - \rho_{i,M}^{n-1}}{\tau} = v_{i-1} \rho_{i-1,M}^n R_{i-1}(T_M^n) - \rho_{i,M}^n R_i(T_M^n), \quad i = 3, 4; \quad (40)$$

$$\frac{\rho_{5,M}^n - \rho_{5,M}^{n-1}}{\tau} = v_4 \rho_{4,M}^n R_4(T_M^n). \quad (41)$$

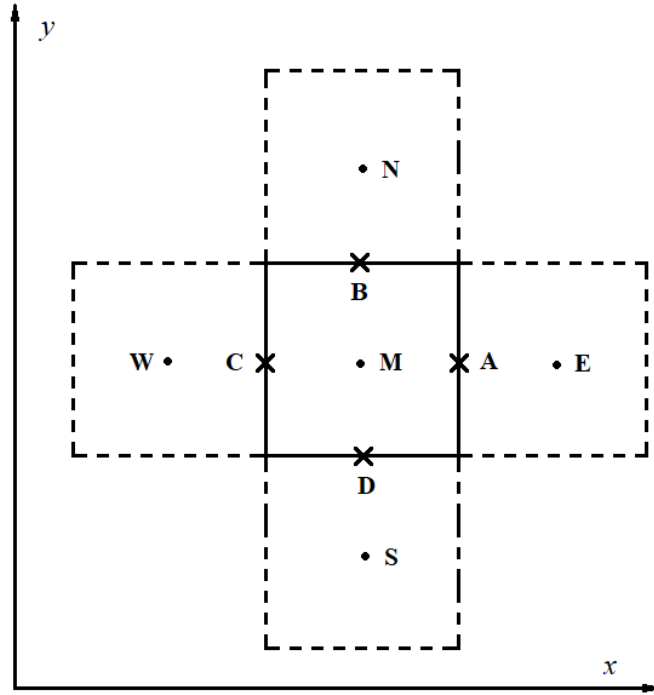


Рисунок Б.1 – Схема сеточного шаблона

Здесь верхний индекс « $n$ » соответствует моменту времени  $t_n$ , нижний индекс « $M$ » – точке, в которой берется неизвестная;  $\tau$  – шаг по времени;

$$R_{i,M}(T_M^n) = k_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT_M^n}\right), \quad i = 1-4.$$

При интегрировании уравнения (13) используется формула центральных прямоугольников, имеющая 2-й порядок аппроксимации по переменной  $y$ :

$$G_{g,D} = G_{g,B} - W_M \Delta_{y,M}, \quad (42)$$

где  $\Delta_{y,M}$  – размер центральной ячейки по оси  $y$  (локальный шаг сетки).

Уравнение (20) является нелинейным, поэтому для его решения необходимо применять итерационный метод. Для улучшения сходимости итераций для члена  $Q_s$ , отвечающего за поглощение тепла в реакциях разложения, применяется линеаризация:

$$Q_s(T) \approx Q_s(T^\circ) + \frac{\partial Q_s}{\partial T}(T - T^\circ) = B - AT, \quad (43)$$

где

$$A = -\frac{\partial Q_s}{\partial T} = -\frac{QR}{T^{\circ 2}} \left[ (1 - v_2) E_2 w_2 + (1 - v_3) E_3 w_3 \right], \quad B = Q_s(T^\circ) + AT^\circ, \quad (44)$$

$T^\circ$  – значение температуры на предыдущей итерации, в формулы для  $w_2, w_3$  подставляется  $T^\circ$  и значения плотностей, полученных из решения системы (39) – (41).

После интегрирования по ячейке уравнения (20), применения квадратурных формул для интегралов и стандартных аппроксимаций производных по времени и геометрическим координатам получается следующее разностное уравнение:

$$\left( \rho c_{eff} \right)_M \frac{T_M^n - T_M^{n-1}}{\tau} = \Lambda_x(T^n) + \Lambda_y(T^n) + B_M. \quad (45)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \Lambda_x(T^n) &= \frac{1}{\Delta_x} \left( \frac{T_E^n - T_M^n}{P_{EM}} - \frac{T_M^n - T_W^n}{P_{MW}} \right), \\ \Lambda_y(T^n) &= \frac{1}{\Delta_{y,M}} \left( \frac{T_N^n - T_M^n}{P_{MN}} - \frac{T_M^n - T_S^n}{P_{MS}} \right) - \\ &\quad - \left( G_g c_{pg} \right)_M \frac{2}{(\Delta_{y,N} + \Delta_{y,M})} (T_N^n - T_M^n) - A_M T_M^n; \end{aligned} \quad (46)$$

тепловые сопротивления между центральными точками соседних ячеек вычисляются по формулам:

$$P_{ME} = \frac{\Delta_x}{2} \left( \frac{1}{\lambda_M} + \frac{1}{\lambda_E} \right), \quad P_{MW} = \frac{\Delta_x}{2} \left( \frac{1}{\lambda_M} + \frac{1}{\lambda_W} \right),$$

$$P_{MN} = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta_{y,M}}{\lambda_M} + \frac{\Delta_{y,N}}{\lambda_N} \right), \quad P_{MS} = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta_{y,M}}{\lambda_M} + \frac{\Delta_{y,S}}{\lambda_S} \right).$$

Значение  $G_{g,M}$ , входящее в формулу для  $\Lambda_y$ , вычисляется следующим образом:

$$G_{g,M} = \frac{1}{2} (G_{g,B} + G_{g,D}) \quad (47)$$

Для аппроксимации граничных условий (21) – (23) вводятся фиктивные ячейки, лежащие за пределами расчетной области, у которых размеры и свойства материала совпадают с соответствующими величинами ближайшей внутренней ячейки. В результате условия (21), (22) преобразуются к виду

$$y = h: T_{i+1/2, N_y+1/2}^n = T_{i+1/2, N_y-1/2}^n, \quad (G_g)_{i+1/2, N_y} = 0, \quad i = 0 - N_x, \quad (48)$$

$$x = 0: T_{-1/2, j+1/2}^n = T_{1/2, j+1/2}^n, \quad j = 0 - N_y,$$

$$x = L: T_{N_x+1/2, j+1/2}^n = T_{N_x-1/2, j+1/2}^n, \quad j = 0 - N_y, \quad (49)$$

где нижние индексы у неизвестных соответствуют номерам сеточных узлов: первый – номер по оси  $x$ , второй – по оси  $y$ .

Для получения аппроксимации граничного условия (23) используем обозначения рисунка А.1: точка М – центр ближайшей к нагреваемой поверхности ячейки, S – центр прилегающей к ней фиктивной ячейки, D – лежащая на границе средняя точка общей их грани. Эти точки имеют координаты:

$$M(x_{i+1/2}, \Delta_{y,1/2}), \quad S(x_{i+1/2}, -\Delta_{y,1/2}), \quad D(x_{i+1/2}, 0).$$

Температуру в точке М с погрешностью  $O(\Delta_y^2)$  можно выразить по формуле

$$T_M = T_D + \frac{\Delta_{y,M}}{2} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_M = T_D - \frac{\Delta_{y,M}}{2\lambda_{eff,M}} \tilde{q}_w = T_D - \tilde{k} \tilde{q}_w, \quad \tilde{k} = \frac{\Delta_{y,M}}{2\lambda_{eff,M}}, \quad (50)$$

где  $\tilde{q}_w$  – правая часть условия (23).

Если в условии (23) произвести линеаризацию:

$$\begin{aligned} T_w^4 &\approx T_w^{\circ 4} + 4T_w^{\circ 3} (T_w - T_w^{\circ}) = 4T_w^{\circ 3} T_w - 3T_w^{\circ 4}, \\ q_w &= \left( \frac{\alpha}{c_p} \right)_e (H_e - H_w) \approx \left( \frac{\alpha}{c_p} \right)_e \left[ H_e - H_w^{\circ} - c_{pg} (T_w - T_w^{\circ}) \right], \end{aligned} \quad (51)$$

то выражение для  $\tilde{q}_w$  примет вид

$$\begin{aligned} \tilde{q}_w &= \tilde{\alpha} T_D + \tilde{\beta}, \\ \tilde{\alpha} &= \left( \frac{\alpha}{c_p} \right)_e c_p + 4\varepsilon_w \sigma T_w^{\circ 3}, \\ \tilde{\beta} &= \left( \frac{\alpha}{c_p} \right)_e (H_e - H_w^{\circ} + c_p T_w^{\circ}) + 3\varepsilon_w \sigma T_w^{\circ 4} - G_{gw} (H_w - h_w), \end{aligned}$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, верхний индекс « $^{\circ}$ » означает значение с предыдущей итерации.

Если для аппроксимации правой части условия (23) использовать конечную разность 2-го порядка

$$\left( \lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y} \right)_M = \lambda_{eff,M} \frac{T_M - T_S}{\Delta_{y,M}},$$

то с учетом полученного выше выражения из (50) следует

$$T_D = T_w = \frac{1}{1 + \tilde{\alpha} \tilde{k}} T_M + \frac{\tilde{\beta} \tilde{k}}{1 + \tilde{\alpha} \tilde{k}}.$$

В результате разностная аппроксимация граничного условия (23) имеет вид

$$T_S + \frac{\tilde{\alpha}\tilde{k}-1}{\tilde{\alpha}\tilde{k}+1}T_M = \frac{2\tilde{\beta}\tilde{k}}{\tilde{\alpha}\tilde{k}+1}. \quad (52)$$

Полученная разностная схема аппроксимирует исходную систему уравнений со вторым порядком по переменной  $x$  и с первым – по времени и переменной  $y$ . Первый порядок по переменной  $y$  обусловлен тем, в (45) производная первого порядка, входящая в член, связанный с фильтрацией газов пиролиза, аппроксимируется односторонней противопотоковой разностью. Поскольку построенная схема является неявной по времени, то она обладает абсолютной устойчивостью.

Решение разностных уравнений (39) – (42) не представляет труда, для решения системы уравнений (45) используется метод расщепления со стабилизирующей поправкой в форме Дугласа – Рекфорда [110].

Система уравнений (45) на интервале времени от  $t_{n-1}$  до  $t_n$  решается в 2 этапа.

На первом этапе ~~решается~~ величина  $T_M^{n-1/2}$  определяется из решения системы уравнений

$$(\rho c_{eff})_M \frac{T_M^{n-1/2} - T_M^{n-1}}{\tau} = \Lambda_y(T^{n-1/2}) + \Lambda_x(T^{n-1}) + B_M \quad (53)$$

с граничными условиями (28), (31).

На втором этапе вычисляется  $T_M^n$  из системы уравнений

$$(\rho c_{eff})_M \frac{T_M^n - T_M^{n-1/2}}{\tau} = \Lambda_x(T^n) - \Lambda_x(T^{n-1}) \quad (54)$$

с граничными условиями (49).

Полученное значение  $T_M^n$  удовлетворяет системе уравнений (45) с первым порядком погрешности по  $\tau$ .



В целом алгоритм решения всей системы уравнений на одном шаге по времени состоит из следующих этапов:

1. При заданном значении поля температуры решаются уравнения (39) – (42), определяются значения плотностей компонентов и массового расхода газов пиролиза.
2. Решаются уравнения первого этапа расщепления (53) с граничными условиями (48), (52). В результате вычисляются значения температуры. Если полученное поле температуры отличается от первоначально заданного, то первый и второй этапы повторяются до сходимости итерационного процесса с необходимой точностью.
3. Решаются уравнения второго этапа расщепления (54) с граничными условиями (53). Решение на следующем шаге по времени считается достигнутым.

Для реализации этого алгоритма составлена программа на языке Pascal. Наиболее трудоемкая часть алгоритма – решение уравнения теплопроводности неоднократно тестировалось путем сравнений численных результатов с аналитическими решениями как для одномерных, так и для двумерных задач параболического типа.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

**Кафедры «Экологии, природопользования и экологической инженерии» НИ  
ТГУ**

Кафедрой Экологии, природопользования и экологической инженерии НИ ТГУ проведен анализ результатов диссертационной работы Черемных В.А. «Модификация свойств поверхности древесины при обработке потоком низкотемпературной плазмы» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В рамках выполнения диссертационной работы Черемных В.А. разработана технология модификации поверхности древесины с помощью энергии низкотемпературной плазмы. Проведены испытания полученного продукта — древесины сосны обработанной потоком низкотемпературной плазмы на стойкость к воздействию плесневых грибов. Установлено, что обработка древесины сосны потоком низкотемпературной плазмы приводит к снижению интенсивности развития плесневых грибов. Также проведено сравнение плазменной обработки с антисептическим защитно-декоративным покрытием для древесины. Определено, что интенсивность развития грибов на поверхности образцов, обработанных потоком низкотемпературной плазмы, ниже, чем на поверхности образцов, обработанных специализированным составом.

На основании полученных результатов, рекомендуем использование данной технологии обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы в производственных целях, в качестве альтернативы защитно-декоративным покрытиям и пропиткам, с целью увеличения стойкости поверхности древесины к образованию плесени и грибов. Поскольку интенсивность развития грибов до плазменной обработки - 5 баллов (по ГОСТ 9.048), а после - 3 балла.

Зав. каф. Экологии, природопользования  
и экологической инженерии БИ ТГУ,  
к.б.н., д.т.н., профессор

А.М. Адам



Подпись удостоверяю  
Ведущий документовед  
Андрюченко И.В.

**Общество с ограниченной ответственностью  
«Тарная база»  
(ООО «Тарная база»)**

Россия, 634063 г.Томск, ул. Торговая, 1 а, ИНН 7017011959, КПП 701701001  
Р/с40702810864030106901 В Томском отделении № 8616 ПАО «Сбербанк» г. Томска, БИК046902606,  
к/с30101810800000000606 E-mail: [sds12@yandex.ru](mailto:sds12@yandex.ru)

**Акт**

**использования результатов диссертационной работы Черемных В.А.  
«Модификация свойств поверхности древесины при обработке потоком  
низкотемпературной плазмы»  
представленной на соискание ученой степени кандидата технических  
наук**

В рамках выполнения диссертационной работы Черемных В.А. разработана технология модификации поверхности древесины с помощью энергии термической плазмы. От ООО «Тарная база» Черемных В.А. была передана партия изделий (досок из древесины сортов осина и береза, общим количеством 50 шт.) для обработки по данной технологии. После обработки, изделия были переданы ООО «Тарная база» для испытаний. По результатам испытаний установлено, что у древесины обработанной потоком низкотемпературной плазмы, снижается водопоглощаемость, а так же увеличивается стойкость поверхности к образованию плесени и грибков.

Предложенная технология принята для опытной эксплуатации в ООО «Тарная база».

Директор ООО «Тарная база»



С.А. Стрельников



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

пл. Соляная, 2, г. Томск, 634003, телефон (3822) 65-32-61, факс (3822) 65-24-22, e-mail: canc@tsuab.ru  
ОКПО 02089295690001, ОГРН 1027000862886 ИНН/КПП 702000080/701701001

Утверждаю  
Проректор по научной работе  
Ефименко С.В.  
20 24 г.



# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ

на производство работ по обработке древесины хвойных пород потоком  
низкотемпературной плазмы

Разработан:  
Научный руководитель:  
Зав. кафедрой ПМиМ,  
д.т.н., профессор  
Волокитин Г.Г.  
«19» 12 20 24 г.  
ассистент  
В.А. Черемных  
«04» 12 20 24 г.

Томск 2024

## **1. Назначение и область применения**

Настоящий технологический регламент (далее – ТР) распространяется на выполнение комплекса работ при производстве работ по поверхностной обработке древесины хвойных пород потоком низкотемпературной плазмы.

ТР предусматривает комплекс работ по поверхностной обработке древесины хвойных пород потоком низкотемпературной плазмы с целью получения защитно-декоративного покрытия, снижающего водопроницаемость и повышающего биостойкость и гидрофобность поверхности обработанных изделий.

Любые отступления от требований настоящего ТР без согласования с разработчиком не допускаются. Разработчик не несет ответственности за дефекты покрытия на поверхности древесины, образовавшиеся вследствие нарушения настоящего ТР, и несогласованные отступления.

Обработанные изделия из древесины хвойных пород предназначены для эксплуатации в различных температурно-влажностных условиях. При использовании древесных изделий, обработанных потоком низкотемпературной плазмы, в местах, где не испытываются воздействия климатических факторов и химически агрессивных сред, срок сохранения свойств покрытия составляет не менее 20 лет.

Область применения изделий устанавливает заказчик (покупатель) согласно дизайн-проекту, в соответствии с положениями действующих строительных, санитарных, пожарных норм и правил.

ТР содержит основные требования к технологии применения, методам контроля и требованиям безопасности при использовании средства.

## **2. Описание технологического процесса**

### **2.1 Подготовка древесины**

Подготовка древесных материалов, подлежащих обработке потоком низкотемпературной плазмы, состоит из следующих этапов:

- освидетельствование поверхностей;
- очистка поверхностей от загрязнений и дефектов.

Освидетельствование древесных материалов заключается в визуальной проверке их качества, определении степени загрязнений их поверхностей и выявлении имеющихся дефектов.

По результатам освидетельствования поверхностей древесных материалов рекомендуется составление акта произвольной формы.

Поверхность древесных материалов перед обработкой потоком низкотемпературной плазмы должна предварительно очищаться от земли, глины, извести, цементного раствора, нефтяных или смолянистых жировых наслоений, старых лакокрасочных покрытий, коры и луба и т. п. При необходимости механической обработки (опиловка, выбор пазов, сверление отверстий и др.) ее следует проводить до обработки потоком низкотемпературной плазмы.

Не допускается обрабатывать потоком низкотемпературной плазмы поверхность изделий, имеющих загрязнения.

## **2.2 Требования к оборудованию**

Древесина обрабатывается с помощью установки для обработки древесины потоком низкотемпературной плазмы, состоящей из плазменного генератора, источника питания, системы подачи обрабатываемых изделий с электродвигателем, воздушного компрессора, системы охлаждения и системы очистки поверхности от сажи.

Основные параметры плазменного генератора:

Род тока постоянный.

Величина рабочего тока – от 100 А.

Плазмообразующий газ – воздух.

Расход плазмообразующего газа – 2,5–8,0 м<sup>3</sup>/ч.

Охлаждение водяное.

Расход охлаждающей воды – от 7,0 л/мин.

Основные параметры источника питания:

Напряжение – 380 В.

Минимальный ток – 100 А.

Зажигание дуги высокочастотное.

Основные параметры системы подачи обрабатываемых изделий:

Мощность электродвигателя – от 2 кВт.

Подача обрабатываемых изделий роликовая.

Скорость подачи изделий – 0,03–0,15 м/с.

Основные параметры воздушного компрессора:

Производительность на выходе – от 400 л/мин.

Давление воздуха на выходе – от 4 кгс/см<sup>2</sup>.

Объем ресивера – от 100 л/мин.

Основные параметры системы охлаждения:

Тип охлаждения – жидкостное.

Охлаждающая жидкость – вода.

Производительность насоса – от 0,5 м<sup>3</sup>/ч.

Давление охлаждающей жидкости – 2,0–4,0 кгс/см<sup>2</sup>.

Объем емкости – от 7000 л.

Предполагается, что используется система охлаждения кольцевого типа. Допускается подключение системы охлаждения к центральному водопроводу. В обоих случаях обязательным требованием к системе охлаждения является установка фильтрующего элемента от механических примесей.

### **2.3 Условия обработки**

Допускается обрабатывать потоком низкотемпературной плазмы древесину хвойных пород, имеющих устойчивую влажность не более 15 %.

Обработку древесных материалов проводить при положительной температуре воздуха окружающей среды (от +5 °С).

На поверхности обрабатываемых изделий не допускается наличие обильной водяной влаги, конденсата, инея, снега или льда.

Перед началом работ необходимо убедиться в наличии и исправности коммуникаций: необходимого напряжения электрической сети, работоспособности источника питания, подачи сжатого воздуха, подачи воды в системе охлаждения, подачи обрабатываемых изделий, работоспособности системы вентиляции, при необходимости систем дополнительного освещения, отопления и т. д.

### **2.4 Характеристика технологического процесса**

Исходная продукция (древесные материалы): нестроганая обрезная доска в пачках доставляется на производственную площадку грузовым автотранспортом и разгружается автопогрузчиками на склад исходной продукции.

Древесина необходимой влажности с помощью автопогрузчиков со склада поступает в цех для плазменной обработки. Перед началом обработки исходная продукция проходит визуальный контроль поверхности на наличие дефектов и/или загрязнений.

Изделия, прошедшие контроль, поступают на линию плазменной обработки. Обработка осуществляется посредством воздействия потоком низкотемпературной плазмы на поверхность древесины. Параметры обработки устанавливаются в зависимости от необходимых характеристик получаемого покрытия в соответствии с таблицей Г1.



После плазменной обработки поверхность изделий очищается от сажи посредством прохода через камеру с вращающимися щетками. Воздух с сажой забирается по воздуховодам и фильтруется. Сажа попадает в бункер-накопитель, откуда выгружается в контейнеры для вывоза с производственной площадки и дальнейшего использования.

После обработки изделия проходят визуальный контроль качества покрытия, покрываются полиэтиленовой пленкой, и формируется транспортная партия готовой продукции, которая перевозится автопогрузчиками на склад готовой продукции. Вывоз готовой продукции осуществляется сторонним автотранспортом потребителей.

Таблица Д.1 – Характеристики режимов обработки

| Удельный тепловой поток $q_{\max}$ , Вт/м <sup>2</sup> | Скорость обработки $V$ , см/с | Характеристика поверхности                                 | Цвет поверхности RAL |
|--------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------------------------|----------------------|
| $1.1 \cdot 10^6$                                       | 9                             | Неравномерная обработка поверхности                        | 1017                 |
| $1.1 \cdot 10^6$                                       | 6                             | Равномерная обработка, глубина 0,5 мм                      | 2001                 |
| $1.5 \cdot 10^6$                                       | 6                             | Равномерная обработка, глубина 0,7 мм                      | 2001                 |
| $1.5 \cdot 10^6$                                       | 3                             | Равномерная обработка, глубина 1 мм                        | 2013                 |
| $1.8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | Равномерная обработка, глубина 0,7 мм                      | 2013                 |
| $1.8 \cdot 10^6$                                       | 3                             | Равномерная обработка, глубина 1,5 мм                      | 2013                 |
| $2.8 \cdot 10^6$                                       | 6                             | Равномерная обработка, глубина 1,3 мм                      | 8011                 |
| $2.8 \cdot 10^6$                                       | 3                             | Равномерная обработка, глубина 1,7 мм, сажа на поверхности | 8016                 |
| $3.2 \cdot 10^6$                                       | 6                             | Равномерная обработка, глубина 1.5 мм, сажа на поверхности | 8017                 |
| $3.2 \cdot 10^6$                                       | 3                             | Равномерная обработка, глубина 2,0 мм, сажа на поверхности | 9011                 |



### **3. Контроль производства работ**

Перед началом работ необходимо контролировать температуру окружающего воздуха.

В процессе производства работ контролировать:

- равномерность покрытия – визуально. Контроль производится рабочим (мастером) в процессе производства работ;
- температуру жидкости, охлаждающей плазменный генератор. Контроль производится рабочим (мастером).

Результаты контроля производства работ и качества сформированного покрытия должны содержать следующие сведения:

- климатические условия в период выполнения работ;
- сведения о входном контроле исходных материалов;
- сведения о способе и качестве подготовки поверхности исходных материалов (если такая подготовка производилась);
- сведения о выходном контроле качества сформированного покрытия.

### **4. Требования к транспортировке и хранению готовой продукции**

Готовая продукция должна отгружаться потребителю, упакованная в полиэтиленовую пленку.

Изделия следует хранить рассортированными по типам и размерам, уложенными таким образом, чтобы исключить провисание и другие деформации.

Допускается транспортировка любыми видами транспорта в соответствии с правилами перевозки грузов, действующими на данном виде транспорта.

При транспортировке и хранении продукция должна быть защищена от увлажнения, загрязнения и механических повреждений.

Укладку продукции в транспортные средства следует производить устойчивыми рядами с надежным закреплением, предохраняющим от смещения и ударов во время перевозки.

Сбрасывание изделий при погрузке, транспортировке и разгрузке запрещается.

### **5. Требования безопасности и охраны окружающей среды**

Производственные помещения, в которых проводятся работы по плазменной обработке древесины, должны быть обеспечены приточно-вытяжной вентиляцией по ГОСТ 12.4.021 и санитарно-бытовыми помещениями.

Производственное оборудование должно быть обеспечено местными воздуховодами, обеспечивающими очистку воздуха рабочей зоны.

Лица, связанные с производством работ по плазменной обработке древесины, должны быть обеспечены специальной одеждой по ГОСТ 12.4.016, а также средствами индивидуальной защиты органов дыхания – респираторами класса FFP3 по ГОСТ Р 12.4.191, а также средствами индивидуальной защиты органов зрения – масками с автоматическим затемнением по ГОСТ 12.4.035.

Работы по обслуживанию оборудования, механизмов и приспособлений следует вести в соответствии с требованиями инструкций и указаний по технике безопасности для данного оборудования.

Покрытие не оказывает вредного воздействия на окружающую среду в процессе эксплуатации.

Сажа, очищаемая с поверхности древесины, должна собираться в накопительный бункер, затем перегружаться в герметичные контейнеры и вывозиться с производственной площадки для дальнейшего использования.

Утилизация отходов осуществляется в соответствии с санитарными правилами накопления, транспортирования, обезвреживания и захоронения производственных отходов.

Обработка древесины не должна противоречить требованиям федеральных законов:

- № 7-ФЗ от 10 января 2002 года «Об охране окружающей среды»;
- № 52-ФЗ от 30 марта 1999 года «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения»;
- № 89-ФЗ от 24 июня 1998 года «Об отходах производства и потребления».

Технологические процессы должны исключать загрязнение воздуха, почвы и водоемов вредными веществами, перерабатываемыми материалами и отходами производства выше норм, утвержденных в установленном порядке.

Контроль содержания вредных веществ в воздухе рабочей зоны должен осуществляться в соответствии с СанПиН 1.2.3685, контроль за соблюдением установленных нормативов выбросов в атмосферу в соответствии с ГОСТ Р 58577, контроль содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений – в соответствии с СанПиН 1.2.3685.