

Экспериментальное исследование процесса смачиваемости поверхностей древесины мягких и твёрдых пород, модифицированных лазерным облучением

А.А. Талых^а, О.В. Спирин^б

Петрозаводский государственный университет, просп. Ленина, 33, Петрозаводск, Россия

^а ata_77@mail.ru, ^б olspirin@petsu.ru

^а <http://orcid.org/0000-0002-3750-2608>, ^б orcid.org/0009-0005-8306-5436

Статья поступила 15.12.2025, принята 21.01.2026

В статье рассматриваются возможности развития лазерной обработки древесины и древесных материалов в области исследования процессов модификации древесины. Выполнен анализ различных способов модификации древесины: плазменной обработкой, пропиткой восками и парафинами, обработкой термореактивными смолами, химической модификацией и др. В защитно-декоративной отделке изделий специального назначения из древесины в целях повышения её эффективности необходимо увеличить влагостойкость подложки и обеспечить поверхностную гидрофобизацию. В исследовании рассматривается один из способов снижения гигроскопичности путём модификации древесины с помощью лазерного облучения. Облучение проводилось с применением авторской экспериментальной установки на основе углекислотного лазера. Образцы для исследования из древесины мягких и твёрдых пород (берёзы, ели, сосны) подвергались естественной и искусственной сушке, тщательно шлифовались, а затем облучались с помощью лазера мощностью 10 Вт. Для сравнительного анализа другие образцы из этих же пород покрывались лаками (нитроцеллюлозным, полиуретановым, акриловым) и маслом-воском по дереву. Определение краевого угла смачивания выполнялось с помощью авторской экспериментальной установки методом диаграммы отражённого света. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что значения краевых углов смачивания для подложек из древесины, модифицированных лазерным облучением, значительно выше, чем у обработанных лаками и маслом-воском. Данное обстоятельство указывает на альтернативу предварительной лазерной обработки для снижения гигроскопичности древесины. За счёт высокого коэффициента поглощения древесиной излучения и высокого КПД углекислотного лазера энергозатраты данного процесса оказались незначительными, поэтому рассмотренный метод может быть использован в промышленных целях, например, в технологических процессах обработки заготовок при изготовлении изделий специального назначения.

Ключевые слова: смачиваемость древесины; краевой угол смачивания; модификация древесины; лазерное облучение; целлюлоза; лигнин.

Experimental study of the wettability process of soft and hard wood surfaces modified by laser irradiation

A.A. Talykh^а, O.V. Spirin^б

Petrozavodsk State University; 33, Lenin Ave., Petrozavodsk, Russia

^а ata_77@mail.ru, ^б olspirin@petsu.ru

^а <http://orcid.org/0000-0002-3750-2608>, ^б orcid.org/0009-0005-8306-5436

Received 15.12.2025, accepted 21.01.2026

This article examines the potential for laser processing of wood and wood-based materials in the study of wood modification processes. Various wood modification methods are analyzed, including plasma treatment, wax and paraffin impregnation, thermosetting resin treatment, chemical modification, and others. In order to enhance the effectiveness of protective and decorative finishing of special-purpose wood products, it is necessary to increase the substrate's moisture resistance and ensure surface hydrophobization. This study examines a method for reducing wood hygroscopicity by modifying it with laser irradiation. Irradiation is performed using a proprietary experimental setup based on a carbon dioxide laser. Samples of softwood and hardwood (birch, spruce, and pine) are subjected to natural and artificial drying, carefully sanded, and then irradiated with a 10-watt laser. For comparative analysis, other samples of the same species are coated with varnishes (nitrocellulose, polyurethane, and acrylic) and wood oil-wax. The contact angle is determined using a proprietary experimental setup using the reflected light diagram method. Analysis of the obtained experimental data reveals that the contact angles for wood substrates modified with laser irradiation are significantly higher than those treated with varnishes and oil-wax. This finding suggests an alternative to laser pretreatment for reducing wood hygroscopicity. Due to the high absorption coefficient of wood and the high efficiency of the carbon dioxide laser, the energy consumption of this process is negligible, making this method suitable for industrial applications, such as in the processing of workpieces for the manufacture of special-purpose products.

Keywords: wood wettability; contact angle; wood modification; laser irradiation; cellulose; lignin.

Введение. Древесина – природный конструкционный материал, который не теряет своей актуальности и широкой востребованности в современности. Древесина обладает рядом уникальных для материала свойств: безопасность в использовании; красивая природная текстура; лёгкость в обработке, соединение отдельных деталей из древесины в конструкцию; достаточно высокая механическая прочность при малом весе и др. Особенно ценен данный материал при изготовлении изделий специального назначения, где высоки требования к экологичности, например, в строительстве, производстве мебели, детских игрушек и пр. Для большинства изделий из древесины важен показатель гидрофобности материала, т. е. его способности не впитывать влагу.

Исследования, связанные с древесиной как материалом для конструкций, направлены, в первую очередь, на повышение её механических (прочность, твёрдость, упругость и др.) и эксплуатационных (влагостойкость, биостойкость, акустические характеристики и т. д.) свойств [1–5]. Подобного рода изменения происходят в модифицированной древесине.

Экспериментально установлено, что дополнительная обработка ультрафиолетом значительно увеличивает пропитывающую способность термически обработанной древесины [6]. Озон может быть использован для расщепления лигнина и гемицеллюлозы в древесине [7].

Одним из способов защиты древесины от воды является её поверхностная гидрофобизация. Данный метод основан на блокировании возможностей взаимодействия между поверхностными гидроксильными группами и адсорбированной влагой из воздуха, благодаря наличию в химических компонентах древесины функциональных (гидроксильных групп). Существует два основных метода поверхностной гидрофобизации, которые получили широкое распространение в связи с относительной простотой применения и высокой эффективностью водо- и влагозащиты. Это:

- использование гидрофобных покрытий;
- плазменная обработка поверхности древесины.

Метод поверхностной гидрофобизации древесины (рис. 1) заключается в создании супергидрофобного покрытия, имеющего краевой угол смачивания водой поверхности древесины более 150° и углами скольжения менее 10° [8]. Данный результат достигается за счёт создания поверхности с высокой шероховатостью на микро- и мезоуровнях и последующей её модификации материалом с низкой поверхностной энергией [9, 10].

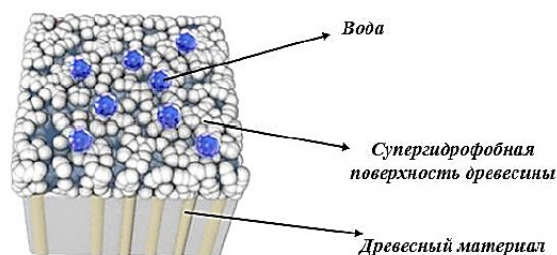


Рис. 1. Схема получения покрытия методом поверхностной гидрофобизации

Например, пропитка древесины восками и парафинами является эффективным и распространённым методом улучшения качества древесины и расширения областей её применения. Использование пропиток для модификации древесины позволяет улучшить формоустойчивость, стойкость к атмосферным воздействиям и к грибкам белой и коричневой гнили, а также повышает физико-механические показатели. Тем не менее, воск и парафин могут способствовать росту грибка в условиях высокой влажности [11–15].

Пропитка термореактивными смолами (карбамидоформальдегидная, феноло-формальдегидная, меламиноформальдегидная) представляет собой эффективный метод осаждения и образования водонерастворимого слоя в структуре клеточных стенок древесины. Данный процесс значительно повышает водостойкость и формоустойчивость натуральной и прессованной древесины. Однако после полимеризации термореактивные смолы становятся хрупкими, а, следовательно, сужаются области применения древесины, используемой при ударных нагрузках [9].

Химическая модификация древесины осуществляется в результате реакции модификатора с полимерными компонентами древесины (лигнин, гемицеллюлоза или целлюлоза). На рис. 2 представлена схема процесса ацетилирования (как одного из возможных вариантов химической модификации).



Рис. 2. Процесс ацетилирования древесины уксусным ангидридом

Химическая модификация способствует улучшению стойкости к гниению, влаге, огню, насекомым, улучшению стабильности размеров, превращая древесину в композитный материал, более долговечный и функциональный. Основными недостатками такой модификации является токсичность применяемых реагентов, вред для здоровья и окружающей среды [9].

Относительно новым методом модификации поверхности древесины является плазменная обработка. Преимуществом использования данного метода является интенсивное прохождение процесса с выделением большого количества ионов, создаваемых во время разряда. Кроме того, применение данного метода позволяет модифицировать поверхность без увлажнения и использования токсичных и едких химических веществ. Вводя различные органические газы или жидкие вещества в качестве прекурсоров, можно создавать на поверхности слои пластика или даже алмазоподобного углерода. Но такая технология получения является сложной и многоэтапной, в связи с этим целесообразность её применения ограничена [9, 16, 17].

Таким образом, рассмотренные методы и способы поверхностной гидрофобизации древесины способны обеспечить высокое значение угла контакта с водой. Однако из-за морфологического строения древесины остаются непокрытые места достаточно большой пло-

щади, через которые может адсорбироваться влага. Это приводит к необходимости создавать толстые, непроницаемые покрытия, гидрофобизирующие древесину полностью со всех сторон, тем самым предотвращая проникновение влаги. В итоге это значительно влияет на стоимость и сложность технологического процесса.

В защитно-декоративной отделке изделий специального назначения из древесины в целях повышения её эффективности необходимо увеличить влагостойкость подложки и обеспечить поверхностную гидрофобизацию [18].



Рис. 3. Пример изделия специального назначения из древесины: струнный народный музыкальный инструмент кантеле

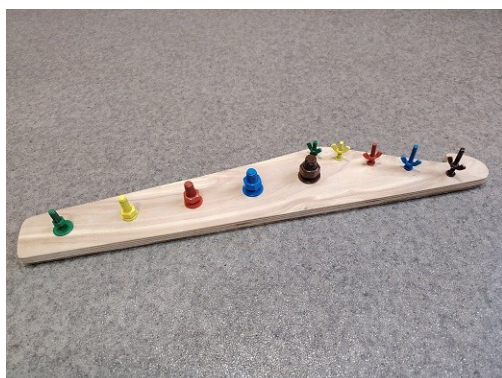


Рис. 4. Пример изделия специального назначения из древесины: настольная развивающая игра-тренажёр

Среди изделий специального назначения из древесины, где важное значение приобретает влагозащита, можно выделить музыкальные инструменты (рис. 3) и детские игрушки (рис. 4). Создание поверхностной гидрофобизации деревянной поверхности особенно актуально для музыкальных инструментов, эксплуатирующихся как в помещениях с различной степенью влажности, так и при атмосферной влажности на открытом воздухе. Для детских деревянных игрушек необходимо создавать поверхности, стойкие не только к влаге, но и к воздействию слюны, пота, влажной санитарной обработке.

Для этих целей в настоящее время используется технология модификации древесины путём пропитки маслами на натуральной основе (льняное, тунговое масло и т. п.), а также маслом-воском по дереву. Но, как описывалось выше, после подобного вида обработки могут оставаться непокрытые места, где может

скапливаться влага. Одним из путей устранения данного недостатка является предварительная модификация поверхности древесины лазерным облучением.

Целью исследования является экспериментальная проверка показателя смачиваемости поверхности древесины мягких и твёрдых пород, модифицированных лазером.

Объектом исследования выступает процесс модификации древесины лазером.

Предметом исследования – экспериментальное исследование процесса смачивания модифицированной лазером древесины.

В исследовании решались следующие основные задачи:

1. Вырезать подложки из древесины мягких и твёрдых пород.
2. Обеспечить необходимую влажность и шероховатость поверхности подложек.
3. Часть образцов подвергнуть лазерному облучению.
4. Для сравнительного анализа обработать другие образцы лакокрасочными покрытиями.
5. Выполнить измерения краевого угла смачивания.
6. Сформулировать общие выводы и дать рекомендации по использованию лазерного облучения для модификации древесины.

Материалы и методы исследования. Образцы для исследования представляют собой бруски размером $30 \times 30 \times 10$ мм из древесины берёзы, ели и сосны (рис. 5).



Рис. 5. Образцы из древесины берёзы, ели, сосны (слева направо)

Выбор представленных пород древесины для исследования связан с большой распространённостью их использования при изготовлении изделий специального назначения из древесины.

Подложки вырезались из древесины, предварительно высушенной до эксплуатационной влажности (8–12 %) для повышения точности экспериментальных исследований. Измерение влажности производилось цифровым гигрометром ЕМТ01.

Затем образцы тщательно шлифовались и подвергались лазерному облучению мощностью 10 Вт. Облучение проводилось с помощью авторской экспериментальной установки на основе углекислотного лазера, представленной на рис. 6. Подробное описание конструкции установки описывается в работах авторов [19, 20].

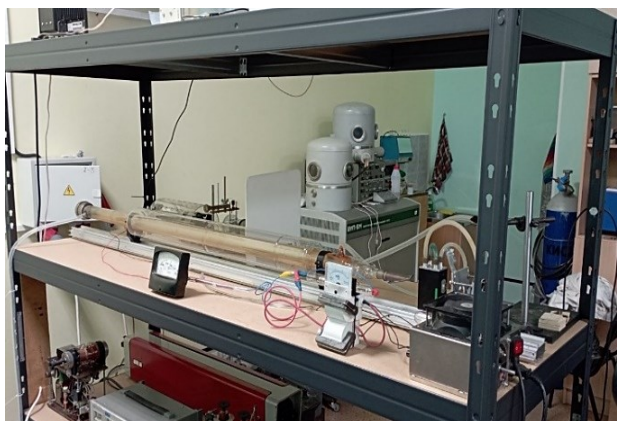


Рис. 6. Общий вид экспериментальной установки на основе CO₂ лазера на трубке ГЛ-501

Для сравнительного анализа другие образцы покрывались лаками (нитроцеллюлозным, полиуретановым, акриловым) и маслом-воском по дереву. Выбранные лаки и пропитки широко применяются при отделке современных изделий и конструкций из древесины.

Мерой смачивания жидкостью твёрдых тел является краевой угол (рис. 7). Краевой угол смачивания θ образуется векторами сил поверхностного натяжения, направленными по касательной к поверхностям раздела «твёрдое тело – жидкость» и «жидкость – воздух». При полном смачивании $\theta = 0^\circ$, при полном несмачивании угол равен 180° .



Рис. 7. Смачиваемость жидкостью твёрдых тел

Определение краевого угла смачивания производилось с помощью авторской экспериментальной установки, состоящей из гелий-неонового лазера (справа), экрана (слева), юстируемой платформы с образцом, установленной между лазером и экраном (рис. 8).

Для мгновенного измерения краевого угла смачивания на экран устанавливался транспортер (рис. 9).

Экспериментальное исследование процесса смачиваемости поверхности древесины может быть выполнено с помощью следующих процедур:

1. Методом проекции капли [21].
2. Методом диаграммы отражённого света [21].

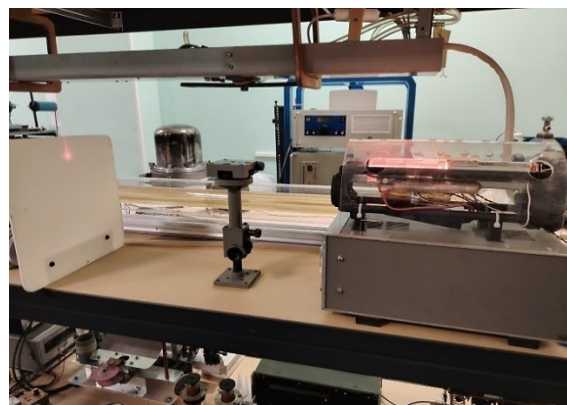


Рис. 8. Установка для определения краевого угла смачивания

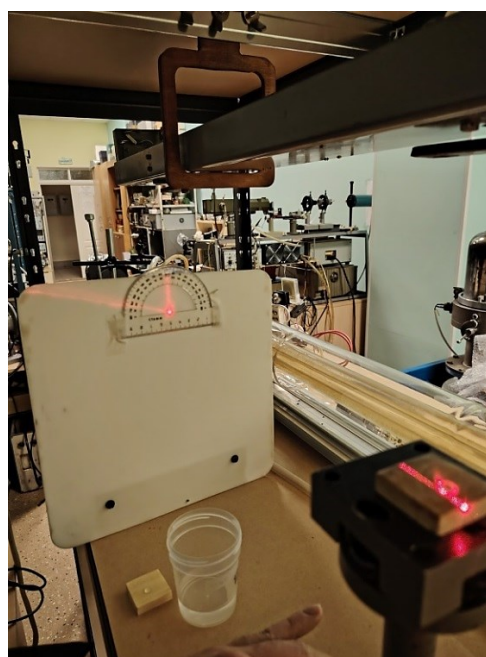


Рис. 9. Процесс измерения краевого угла смачивания

Метод проекции капли заключается в том, что каплю жидкости на горизонтальной исследуемой поверхности проецируют на экран и по фотографии или рисунку определяют угол между касательной к капле в точке соприкосновения трёх фаз и поверхностью образца. Точность такого определения оценивается в 1–5%. θ определяют по высоте (h) капли и радиусу площади контакта капли с исследуемой поверхностью r_k (рис. 10), используя формулы 1 и 2.

$$\cos(\theta) = (r_k^2 - h^2)/(r_k^2 + h^2), \text{ при } \theta < 90^\circ \quad (1)$$

$$\cos(\theta) = 1 - h/r_k, \text{ при } \theta > 90^\circ, \quad (2)$$

где: h – высота капли, мм; r_k – радиус площади контакта капли с исследуемой поверхностью, мм.

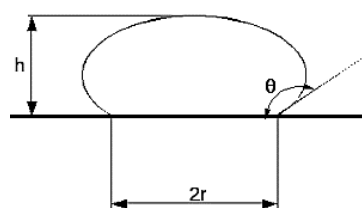


Рис. 10. Метод проекции капли

Принципиальная схема измерений с помощью метода диаграммы отражённого света приведена на рис. 11. Плоская плёнка располагается горизонтально, капля смачивающей жидкости на её поверхности имеет круглое сечение, угол смачивания не превышает 90° . Параллельный пучок света распространяется горизонтально, параллельно поверхности плёнки, частично срезаясь ею, и падает нормально на вертикальный экран. При освещении капли излучение отражается её выпуклой поверхностью. Пространственная диаграмма отражённого света частично отображается на экране в виде световой картины, параметры которой связаны с величиной краевого угла. Искомый краевой угол равен в этом случае углу между вертикалью и периметром световой картины. Он может быть непосредственно измерен на экране или на скопированной с экрана световой картине. Последний способ и применялся в представленном в статье исследовании. В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода.

Процедура измерений заключается в следующем (рис. 12). На горизонтальный столик 2 устанавливается подложка 3, на которую из пипетки наносится капля жидкости (воды). На экране 4 закрепляют лист бумаги. Вращая винты, устанавливают столик таким образом, чтобы луч лазера от лазерной установки 1 проходил строго по поверхности подложки, чуть её касаясь. На экране появляется изображение отражённого луча в виде вертикальной линии (рис. 11 (справа)).

Далее подложку с каплей перемещают так, чтобы луч шёл по касательной к капле. На экране появляется световая картина, являющаяся отражением луча от периметра капли. Она представляет собой линию, идущую под углом к вертикали (рис. 11 (справа)). Этот угол равен углу смачивания. Изображение отмечается на закреплённой бумаге карандашом, а угол измеряется транспортиром.

Расстояния от лазера до места капли и от капли до экрана не имеют значения. Главное, чтобы они были не слишком велики. В противном случае начинает проявляться естественная дифракционная расходимость луча гелий-неонового лазера. Для точности измерений в ходе эксперимента важно следить, чтобы луч гелий-неонового лазера касался примерно половиной своего сечения на протяжении всей поверхности древесины.



Рис. 11. Метод диаграммы отражённого света

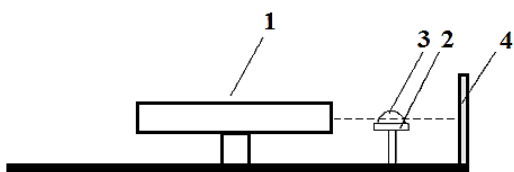


Рис. 12. Принципиальная схема эксперимента: 1 – лазерная установка; 2 – горизонтальный столик; 3 – образец из древесины (подложка) с нанесённой каплей дистиллированной воды; 4 – экран

Результаты и обсуждения. Результаты проведённых экспериментальных исследований представлены в табл. 1–5 (в табл. 1–4 – для лаков и масла-воска, в табл. 5 – для лазерного облучения). Усреднение производилось по нескольким точкам периметра касания капли с поверхностью исследуемой древесины. Измерение среднего значения краевого угла смачивания образцов, обработанных лазерным излучением, было осложнено неравномерным распределением интенсивности последнего, вследствие чего периметр в плоскости касания имел далеко не круглую форму. Приходилось усреднять измерения в нескольких местах облучения той же дозой на одном и том же образце. Если при нанесении с пипетки часть капли касалась необлучённой части поверхности древесины, то там наблюдался процесс интенсивного впитывания, и измерение производилось заново.

Таблица 1. Значение краевого угла на подложках, обработанных нитроцеллюлозным лаком

Порода древесины подложки	Краевой угол смачивания, град.
ель	73
сосна	61
берёза	76

Таблица 2. Значение краевого угла на подложках, обработанных полиуретановым лаком

Порода древесины подложки	Краевой угол смачивания, град.
ель	57
сосна	60
берёза	40

Таблица 3. Значение краевого угла на подложках, обработанных акриловым лаком

Порода древесины подложки	Краевой угол смачивания, град.
ель	68
сосна	40
берёза	52

Таблица 4. Значение краевого угла на подложках, обработанных маслом-воском по дереву

Порода древесины подложки	Краевой угол смачивания, град.
ель	65
сосна	58
берёза	82

В табл. 5 представлены значения краевых углов смачивания для подложек, модифицированных различными дозами лазерного облучения.

Таблица 5. Значение краевого угла на подложках, модифицированных лазерным облучением с соответствующими дозами

Порода древесины подложки	Значение краевого угла смачивания (в градусах) при дозах облучения (Дж / см ²):			
	24	32	40	48
ель	90	70	70	80
сосна	90	50	90	90
берёза	90	–	–	–

Во всех случаях облучение производилось при постоянной мощности лазера 10 Вт, диаметре пятна на облучаемой поверхности 5 мм, но различном времени экспонирования: 600 мс, 800 мс, 1000 мс и 1200 мс. Соответствующие дозы облучения D (24, 32, 40, 48) в единицах измерения Дж/см² были определены по формуле 3 и представлены в табл. 5.

$$D = \frac{4 \cdot P_{\text{л}} \cdot t}{\pi \cdot d^2}, \quad (3)$$

где: $P_{\text{л}}$ – мощность лазерного излучения, заранее определённая по калориметру ИМО-2Н, Вт; t – время экспозиции, мс; d – диаметр пятна, мм.

Энергозатраты на обработку единицы поверхности исследуемых пород древесины для указанных доз облучения составили $33 \cdot 10^{-6}$ кВт · ч, $44 \cdot 10^{-6}$ кВт · ч, $56 \cdot 10^{-6}$ кВт · ч, $67 \cdot 10^{-6}$ кВт · ч, соответственно. Расчёт производился по формуле 4:

$$W = \frac{D}{\eta \cdot 3.6 \cdot 10^6}, \quad (4)$$

где D – доза облучения, Дж/см²; η – коэффициент полезного действия углекислотного лазера.

Значения для подложки из древесины берёзы указаны только для дозы 24 Дж/см². При меньших дозах облучения место обрабатываемой поверхности слабо карбонизируется и почти не меняет цвет. Поэтому его почти не видно невооружённым глазом, что затрудняло точно определить место для нанесения капли. При увеличении дозы до значений 32 Дж/см² и более происходит возгорание в месте облучения поверхности древесины, образование вогнутого рельефа из-за неравномерного распределения интенсивности лазерного излучения по сечению пучка. Это связано с особенностью конструкции лазерного резонатора авторской установки, имеющего длину около двух метров и сечение разрядного пучка 5 мм². Вышеперечисленное приводит к малому значению числа Френеля, большим дифракционным потерям для поперечных типов колебаний высших порядков, невозможностью получения спектра и, как следствие, равномерного распределения интенсивности по сечению пучка. Поэтому для твёрдых пород древесины рекомендуется производить обработку излучением ещё более малой мощности, меньшим диаметром пучка (но не в точке фокуса) и с применением программного управления (ПУ).

Полученные экспериментальным путём и представленные в табл. 1–5 данные указывают, что значения краевых углов смачивания для подложек из древесины,

модифицированных лазерным облучением, значительно выше, чем у обработанных лаками и маслом-воском. Это обстоятельство, а также низкие энергозатраты позволяют говорить о перспективах предварительной лазерной обработки для снижения гигроскопичности древесины.

Заключение. Проведённое исследование позволяет сделать следующие обобщающие выводы:

1. Модификация древесины является перспективным направлением в области обработки древесины, так как позволяет значительно повысить её механические и эксплуатационные свойства.

2. Модификация древесины – это процесс изменения физических свойств для улучшения эксплуатационных качеств, таких как водостойкость и долговечность, а также для повышения защиты от вредителей и гниения.

3. Наиболее распространёнными способами модификации древесины являются пропитка восками и парафинами, обработка термореактивными смолами, химическая модификация и др.

4. Среди перспективных способов модификации поверхности древесины можно выделить плазменную обработку, термообработку, науглераживание, создание на поверхности слоёв пластика и пр.

5. При проектировании и изготовлении изделий специального назначения из древесины (музыкальные инструменты, мебель, детские игрушки и др.) особое внимание необходимо уделять вопросам увеличения показателя влагостойкости подложки и обеспечения поверхностной гидрофобизации. Для этих целей одним из возможных способов модификации может являться лазерное облучение.

6. Полученные экспериментальным путём значения краевых углов смачивания для подложек из древесины, модифицированных облучением углекислотного лазера, оказались значительно выше, чем у образцов, обработанных лаками и пропитками. Это указывает на то, что модификация излучением углекислотного лазера позволяет снизить показатель гигроскопичности древесины процессом контролируемой поверхностной карбонизации. За счёт высокого коэффициента поглощения древесиной излучения этой длины волны и высокого коэффициента полезного действия (КПД) углекислотного лазера, энергозатраты процесса невелики, поэтому рассмотренный метод может быть использован в промышленности.

Таким образом, проведённое исследование позволило выделить перспективные направления в развитии методов модификации древесины и расширить спектр возможностей применения лазеров в области обработки древесины.

Литература

1. Котлярова И.А. ИК-спектроскопия древесины сосны, берёзы и дуба, модифицированных этиламин (n→b)-тригидроксидом // Химия растительного сырья. 2019. № 2. С. 43–49.
2. Котенева И.В. Боразотные модификаторы поверхности для защиты древесины строительных конструкций. М., 2011. 191 с.
3. Стрекалкин А.А., Чибрикин Д.А., Рощина С.И. Способы модификации конструкций из древесины и их соединений // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия «Материалы. Конструкции. Технологии». 2022. № 2 (22). С. 80–89.
4. Покровская Е.Н. Сохранение памятников деревянного зодчества с помощью элементарноорганических соединений. М., 2009. 136 с.
5. Influence of wood modification on parameter settings and treatment results in CO₂ laser structuring of beech veneers / G.A. Doğan, R. Wascher, G. Avramidis [et al.] // Journal of Materials Science: Materials in Engineering. – 2024. – Vol. 19, №. 1. – P. 41. – DOI 10.1186/s40712-024-00192-6.

6. Гирфанов А.А., Сафин Р.Р., Кайнов П.А. Исследование воздействия ультрафиолетового облучения на гигроскопичность и смачиваемость древесины // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2024. № 3. С. 43–50.
7. Сафиуллина А.Х., Мухаметзянов Ш.Р., Сафин Р.Р., Хайруллин Р.З. Влияние озонирования на смачиваемость древесины // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2020. № 1. С. 25–33.
8. Westin M., Sterley M., Rossi F., Hervé J.J. Compreg-type products by furfu-rylation during hot-pressing. *Wood Mater Sci Eng*. 2009; 4(1–2):67–75.
9. Жужукин К.В. Разработка комплексного пропитывающего состава для повышения эксплуатационных показателей древесины : дис. ... канд. техн. наук / Жужукин Константин Викторович, 2023. 177 с.
10. Shanshan Jia, Haibo Chen, Sha Luo, Yan Qing, Songlin Deng, Ning Yan, Yiqiang Wu One-step approach to prepare superhydrophobic wood with enhanced mechanical and chemical durability: Driving of alkali *Applied Surface Science*, Volume 455, 2018, pp. 115–122.
11. Improvement of water resistance, dimensional stability, and mechanical properties of poplar wood by rosin impregnation. Dong, Y., Yan, Y., Wang, K. et al. *Eur. J. Wood Prod.* 74, 2016. pp. 177–184. – DOI 10.1007/s00107-015-0998-6.
12. Preparation of highly hydrophobic and anti-fouling wood using poly(methylhydrogen) siloxane / W. Lin [et al.] // *Cellulose*. 2018. № 25. P. 7341. – DOI 10.1007/s10570-018-2074-y.
13. Wang C., Piao C., Lucas C. Synthesis and characterization of superhydro-phobic wood surfaces // *Journal of Applied Polymer Science*. 2011. Vol. 119, № 3. P. 1667–1672.
14. Bol'shakov A.P. et al. Damping Properties of Sequoia, Birch, Pine, and Aspen under Shock Loading // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001. Vol. 42, № 2. P. 202–210.
15. Rayner A.D.M., Boddy L. *Fungal decomposition of wood: its biology and ecology*. Chichester; New York: Wiley, 1988. 587 p.
16. Liu M.; Zhong H.; Ma E.; Liu R. Resistance to fungal decay of paraffinwax emulsion/copper azole compound system treated wood. *Int. Biodeterior. Bio-degrad.* 2018, 129, 61–66.
17. Liu R.; Liu X.; Zhang Y.; Liu J.; Gong C.; Dong Y.; Li J.; Shi J.; Wu M. Paraffin Pickering Emulsion Stabilized with Nano-SiO₂ Designed for Wood Impregnation. *Forests* 2020, 11, 726.
18. Цой Ю.И., Блинов А.К. К вопросу о смачиваемости древесины разных пород // *Исследования. Инновации. Практика*. 2023. № 5 (10). С. 11–13.
19. Талых А.А., Спиринов О.В., Сяунёв В.С. Применение углекислотных лазерных установок для исследования процессов резания древесины // *Системы. Методы. Технологии*. Братск, 2024. №4 (64). С. 127–133.
20. Талых А.А., Спиринов О.В., Чугин В.П., Сяунёв В.С. Исследование параметров лазерной резки мягких и твёрдых пород древесины с использованием авторской экспериментальной установки на основе углекислотного лазера // *Лесотехнический журнал*. 2024. № 4 (56). С. 208–221.
21. Кротова Г.Д., Дубровин В.Ю., Титов В.А., Шикова Т.Г. *Технология материалов и изделий электронной техники : лабораторный практикум*. Иваново, 2007. 156 с.
3. Strekalkin A.A., Chibrikin D.A., Roshchina S.I. Methods for modifying wood structures and their connections // *Bulletin of the Volga State Technological University. Series "Materials. Designs. Technologies"*. 2022. No. 2 (22). P. 80–89.
4. Pokrovskaya E.N. Preservation of wooden architecture monuments using organoelement compounds. Moscow, 2009. 136 p.
5. Influence of wood modification on parameter settings and treatment results in CO₂ laser structuring of beech veneers / G.A. Doğan, R. Wascher, G. Avramidis [et al.] // *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*. – 2024. – Vol. 19, No. 1. – P. 41. – DOI 10.1186/s40712-024-00192-6.
6. Girfanov A.A., Safi R.R., Kaynov P.A. Study of the effect of ultraviolet irradiation on the hygroscopicity and wettability of wood // *Woodworking industry*. 2024. No. 3. P. 43–50.
7. Safiullina A.Kh., Mukhametzyanov Sh.R., Safin R.R., Khairullin R.Z. The influence of ozonation on the wettability of wood // *Woodworking industry*. 2020. No. 1. P. 25–33.
8. Westin M, Sterley M, Rossi F, Hervé JJ. Compreg-type products by furfu-rylation during hot-pressing. *Wood Mater Sci Eng*. 2009; 4 (1–2): 67–75.
9. Zhuzhukin, K.V. Development of a complex impregnating composition to improve the performance of wood: dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Zhuzhukin Konstantin Viktorovich, 2023. 177 p.
10. Shanshan Jia, Haibo Chen, Sha Luo, Yan Qing, Songlin Deng, Ning Yan, Yiqiang Wu One-step approach to prepare superhydrophobic wood with enhanced mechanical and chemical durability: Driving of alkali *Applied Surface Science*, Volume 455, 2018, pp. 115–122.
11. Improvement of water resistance, dimensional stability, and mechanical properties of poplar wood by rosin impregnation. Dong, Y., Yan, Y., Wang, K. et al. *Eur. J. Wood Prod.* 74, 2016. pp. 17–184. DOI 10.1007/s00107-015-0998-6.
12. Preparation of highly hydrophobic and anti-fouling wood using poly (methylhydrogen) siloxane / W. Lin [et al.] // *Cellulose*. – 2018. No. 25. P. 7341. – DOI 10.1007/s10570-018-2074-y.
13. Wang C., Piao C., Lucas C. Synthesis and characterization of superhydro-phobic wood surfaces // *Journal of Applied Polymer Science*. 2011. Vol. 119, No. 3. P.1667–1672.
14. Bol'shakov A.P. et al. Damping Properties of Sequoia, Birch, Pine, and Aspen under Shock Loading // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001. Vol. 42, No. 2. P. 202–210.
15. Rayner A.D.M., Boddy L. *Fungal decomposition of wood: its biology and ecology*. Chichester; New York : Wiley, 1988. 587 p.
16. Liu M.; Zhong H.; Ma E.; Liu R. Resistance to fungal decay of paraffinwax emulsion/copper azole compound system treated wood. *Int. Biodeterior. Bio-degrad.* 2018, 129, 61–66.
17. Liu R.; Liu X.; Zhang Y.; Liu J.; Gong C.; Dong Y.; Li J.; Shi J.; Wu M. Paraffin Pickering Emulsion Stabilized with Nano-Si SiO₂. Designed for Wood Impregnation. *Forests* 2020, 11, 726.
18. Tsoi Yu.I., Blinov A.K. On the wettability of different types of wood // *Research. Innovations. Practice*. 2023. No. 5 (10). P. 11–13.
19. Talykh A.A., Spirin O.V., Syuney V.S. Application of carbon dioxide laser systems for studying wood cutting processes // *Systems. Methods. Technologies*. Bratsk, 2024. No. 4 (64). P. 127–133.
20. Talykh A.A., Spirin O.V., Chugin V.P., Syuney V.S. Study of laser cutting parameters of soft and hard wood species using the author's experimental setup based on a carbon dioxide laser // *Forestry journal*. 2024. No. 4 (56). P. 208–221.
21. Krotova G.D., Dubrovin V.Yu., Titov V.A., Shikova T.G. *Technology of materials and products of electronic equipment: laboratory practical training*. Ivanovo, 2007. 156 p.

References

1. Kotlyarova I.A. IR spectroscopy of pine, birch and oak wood modified with ethylamine (n→b)-trihydroxyborate // *Chemistry of plant raw materials*. 2019. No. 2. P. 43–49.
2. Koteneva I.V. Boron-nitrogen surface modifiers for the protection of wood of building structures. Moscow, 2011. 191 p.