

3. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ

УДК 691.11

**М.В. Лукин, Д.А. Чибрикин, В.А. Мартынов, О.А. Куницкая,
А.В. Теппоев, С.И. Рощина**

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА МОДИФИЦИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ПОЛИМЕРНЫМ СОСТАВОМ С УГЛЕРОДНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

Введение. Древесина с давних времен является одним из основных материалов для использования в строительстве [Zelinka и др., 2020; Iždinský и др., 2021]. При правильных условиях эксплуатации древесина способна сохранять свои физико-механические свойства многие десятилетия [Spear и др., 2021].

Одним из способов повышения эксплуатационных и прочностных свойств деревянных конструкций является модифицирование [Van Blokland et al., 2022; Haiyan, 2023]. Структура модифицированной древесины наиболее устойчива к воздействию окружающей среды и механическим воздействиям [Jambreković et al., 2022].

Одним из способов повышения прочностных свойств древесины является термическая модификация [Waßmann et al., 2020; Чибрикин и др., 2022]. Термическая модификация древесины заключается в изменении свойств древесины путем нагрева в неокисляющей среде. В результате у модифицированной древесины повышаются прочностные характеристики к механическим воздействиям [Godinho et al., 2021]. Производство древесно-стружечных плит с использованием переработанной термически модифицированной древесины показывает, что термически модифицированная древесина может обладать остаточным лигноцеллюлозным материалом промышленного производства. Модифицированная древесина должна быть нетоксичной при изготовлении и не должна выделять токсичных веществ в процессе эксплуатации, в конце срока службы, после утилизации

или переработки [Búryová et al., 2021; Шамаев и др., 1976]. В качестве модификатора могут выступать различные полимеры, смолы, полиэфиры, а также полимерные составы на их основе. В ходе исследований [Шамаев и др., 2014; 2018; Nagraik et al., 2023] установлено, что введение в полимерный состав углеродного наполнителя повышает прочностные качества конструкции.

В результате изучения вязкоупругих и тепловых свойств древесины пихты, модифицированной стиролом установлено, что модификация стиролом может значительно изменить механические и тепловые свойства древесины пихты, потенциально расширяя спектр ее применения [Rimshin et al., 2018]. Изучены свойства модифицированной древесины бука, связанные с низким трением и износом. Исследование показывает, что модификация может значительно снизить трение и износ буковой древесины, что потенциально делает ее более подходящей для применения в тех областях, где эти свойства важны [Шамаев, 2025].

Проведено исследование по оценке жизненного цикла деревянных фасадов, выполненных из модифицированных деревянных элементов. Исследование показало, что на такие фасады оказывается менее негативное воздействие атмосферных осадков, чем на деревянные фасады без модифицированных элементов, но на их эксплуатационные характеристики все же могут существенно влиять такие факторы, как тип используемого покрытия и конкретный процесс модификации [Lisyatnikov et al., 2022].

Однако на сегодняшний день модификация древесины изучена не совсем полно, и вопрос повышения прочности, жесткости и эксплуатационных характеристик деревянных конструкций за счет ее использования является востребованной и актуальной научной задачей.

Целью работы является разработка технологии модифицирования элементов деревянных конструкций полимерным составом на основе диметакрилового полиэфира с углеродным наполнителем. Модифицирование древесины заключается в нагнетании полимерной композиции с углеродным наполнителем под избыточным давлением импульсного воздействия.

Материалы и методика исследования. Свойства полимерного состава регулируются соотношением исходных полимеров, добавками инертных и активных минеральных и химических добавок в соответствии с разработанным составом.

Составы-модификаторы корректируют после проведения лабораторных исследований и опытных инъекций в производственных условиях.

Для модификации древесины авторы статьи использовали полимерный состав на основе смолы диметакрилового полиэфира с включением углеродных нанотрубок. Первоначальные экспериментальные испытания разработанного состава модификатора проводили на стандартных образцах. Модуль упругости полимеров определяли по результатам испытаний компрессионных образцов в соответствии с ГОСТ Р 57921–2017. Он составил 636,85 МПа.

Одним из основных показателей качества модифицированной конструкции является способность высокой адгезии к древесине [Рощина и др., 2016]. Последовательность работ по модификации представлена на рис. 1.



Рис. 1. Последовательность работ по технологии модификации деревянных конструкций

Fig. 1. Sequence of works on the technology of modification of wooden structures

Подготовительные мероприятия включают:

- определение места расположения отверстий;
- бурение отверстий;
- очистку поверхности древесины, пробуренных отверстий;
- установку инъекторов;
- устройство, при необходимости, временных креплений для обеспечения устойчивости конструкций в период модификации инъекционного полимерного состава под давлением;
- тампонаж отверстий, пустот, трещин и т. п., через которые возможно нежелательное проникание инъекционного раствора на другие участки деревянной балки.

Основной этап работ модификации древесины заключается в приготовлении и нагнетании инъекционного полимерного состава (табл. 1).

Таблица 1

**Технологические операции по приготовлению и нагнетанию
полимерного состава**

Technological operations on preparation and injection of polymer composition

п/п	Наименование операции	Используемые материалы	Используемое оборудование
1	Подготовка полимерного состава	Полимерный состав на основе диметакрилового полиэфира с введением углеродного наполнителя	Емкость для полимерного состава,
2	Установка инжекторов	-	Инжекторы для модификации, линейки, рулетка
3	Подготовка вакуумно-роторного насоса	Моторное масло	Вакуумно-роторный насос, клеешалка, шланги полиуретановые
4	Нагнетание модификатора в тело конструкции под избыточным давлением древесины	-	

При модификации балки поверхность делят на зоны, в которых устраиваются инжекторы. Перед устройством инжектора отверстие необходимо очистить от пыли. Инжектор устанавливается с шагом 200 мм, диаметр отверстий 5 мм. Шаг инжекторов был определен опытным путем, исходя из «способности» поглощения древесины полимерного состава. Выполнение отверстий для установки инжекторов производится методом сверления перпендикулярно поверхности. Влажность древесины должна соответствовать 12–15%.

Пробуренные отверстия тщательно продувают сжатым воздухом под давлением 0,2 МПа. В отверстия вставляют патрубки. Поверхность деревянной балки предварительно шлифуют.

Инъекционный раствор подают под давлением от 0,2 до 0,6 МПа. Давление инъекционного раствора регулируется путем проб на отдельных участках.

Для производства работ по модификации древесины применяют мобильную установку. Вакуумно-ротаторный насос для модификации древесины предназначен для создания и поддержания остаточного давления при модификации древесины методом избыточного давления. Мобильная установка включает емкость, компрессор, тележку, электронный блок управления, датчик давления, армированный шланг, коннекторы. Оборудование снабжено электронным блоком управления для автоматического поддержания заданного остаточного давления, которое осуществляется включением и отключением компрессора (рис. 2).

Установка для модификации позволяет осуществлять нагнетание полимерного состава в автоматическом режиме с поддержанием заданного давления. Установка работает следующим образом: с помощью компрессора создается избыточное давление, которое подается в емкость с полимерным составом. Далее полимерный состав под воздействием избыточного давления выходит из емкости по магистралям из полиуретановых шлангов. Магистраль соединяется с инжекторами. Через инжекторы происходит нагнетание полимерного состава в структуру древесины. Инжектор состоит из сменных игл, входного штуцера для импрегнирования полимерного состава, металлического корпуса. Емкость для компонентного состава объемом 5 литров закрепляется фиксирующим креплением, для регулирования нагнетания полимерного состава встроен кран с манометром.

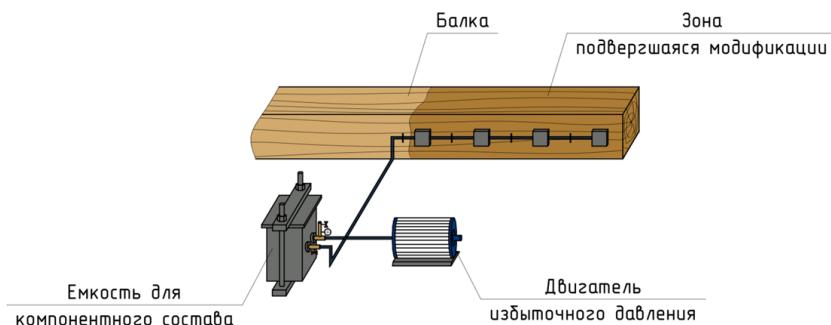


Рис. 2. Схема модифицирования участка деревянной балки

Fig. 2. Scheme of modification of a wooden beam section

По результатам проведенных предварительных испытаний было решено применять состав на основе диметакрилового полиэфира с отвердителем – перекись метилэтилкетона (ПМЭК), для ускорения отверждения применен октоат кобальта (ОК). В качестве наноструктурной добавки

применены углеродные нанотрубки «Таунит- М», для исключения их оседания и равномерного распределения в теле матрицы использовано поверхностно-активное вещество ПАВ – смачиватель ОП-10 (100 масс. ч. раствора диметакрилового полиэфира; 2 масс. ч. 8,9% ПМЭК; 4 масс. ч. 1% ОК; 0,5 масс. ч. ОП-1 и 0,5 масс. ч. Таунит-М).

Модификатор должен находиться в рабочей зоне и храниться с соблюдением технических условий. Процесс модификации рекомендуется проводить при температуре не ниже 23 °С. В качестве инициатора полимеризации (отвердителя) всех поставляемых марок используется Бутанокс, представляющий собой раствор перекиси метилэтилкетона.

В отвешенное количество полиэфира вводится навеска ускорителя и после тщательного перемешивания навеска отвердителя, после чего смесь снова тщательно перемешивается. На окончательном этапе вводится ПАВ и нанотрубки. Затем следует процесс формования, который как правило должен быть завершен до наступления момента потери текучести, который наступает при 23 °С через 50–120 мин после введения отвердителя и ускорителя. Время затвердевания можно сократить путем повышения температуры или увеличения концентрации ускорителя. Жизнеспособность модификатора с введенным отвердителем составляет 12–24 часа. Жизнеспособность смолы с введенным ускорителем – 3 месяца.

Отверждение происходит в основном за первые сутки. Однако нарастание прочности отвержденного полимерного состава при комнатной температуре продолжается в течение двух недель и иногда даже более. Поэтому для ускорения процесса и/или для достижения максимальной прочности рекомендуется проводить термообработку изделий при температуре 80 °С.

Результаты исследования. Экспериментальным путем установлен режим модификации древесины полимерным составом с наноструктурным наполнителем (10-5-10-5-10 мин). В течение 10 мин образец подвергается нагнетанию полимерной композиции, затем образец «отдыхал» 5 мин, далее повторялось нагнетание полимерного состав в течение 10 мин. Чередование повторяется до полного насыщения древесины композицией (табл. 2).

Методом оптической микроскопии оценивались насыщение древесины полимерным составом и равномерность диспергации наполнителя в объеме матрицы модификатора. Оптическая микроскопия проводилась на цифровом оптическом микроскопе Raztek MRX9-D (Россия), который позволяет произвести визуальное наблюдение микроструктуры непрозрачных объектов (рис. 3).

Таблица 2

Технологические режимы**Technological modes**

Режим	Параметры режима			
	влажность, %	температура, °С	давление, кПа	продолжит., мин
1	45–55	19–22	2	10 мин
2	—”—	—”—	атм	5 мин
3	—”—	—”—	2	10 мин
3	—”—	—”—	атм	5 мин
4	—”—	—”—	2	10 мин

Рис. 3б и 3в показывают, что трахеиды древесины при модификации полимерной композицией заполнены равномерно. Введение в состав композиции углеродных нанотрубок способствует еще более глубокому заполнению трахеид. В конечном итоге древесина превращается в композит с более упорядоченным строением на клеточном уровне, анизотропия свойств снижается.

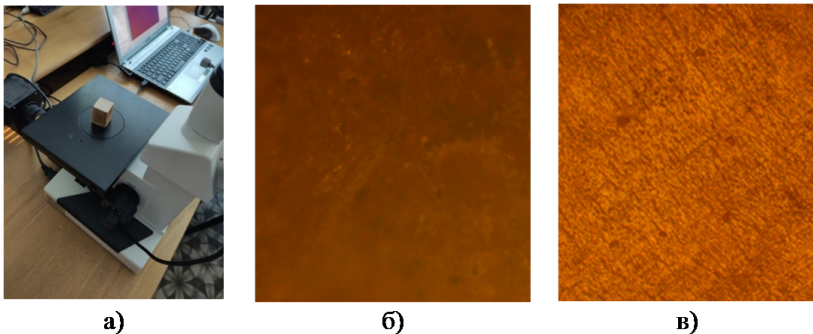


Рис. 3. Проведение микроскопии образцов модифицированной древесины: а) проведение испытаний; б) результаты микроскопии образцов древесины поперек волокон; в) результаты микроскопии образцов древесины вдоль волокон

Fig. 3. Microscopy of modified wood samples: a) conducting tests; b) results of microscopy of wood samples across the hair; c) results of microscopy of wood samples along the fibers

Для оценки прочности характеристик модифицированной древесины провели испытания образцов на сжатие. Перед началом проведения механических испытаний образцы взвешивали и определяли их плотность. Среднее значение плотности по образцам древесины без модификации составило 482 кг/м^3 , а полимерной композиции с наноструктурным наполнителем – 646 кг/м^3 . Таким образом, плотность древесины при ее полимеризации возрастает в среднем на 34%. Введение нанотрубок в полимерную композицию плотность древесины практически не повышает [Zuo et al., 2023].

Испытания на сжатие вдоль волокон производились на стандартных образцах по ГОСТ 16483.10–73 «Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон». Разрушающая нагрузка модифицированных образцов составила 43,19 кН, без модификации – 26,05 кН. Прирост прочности при модификации образцов полимерной композицией с наноструктурным наполнителем составил 39,69% по сравнению с образцами без модификации. Таким образом, проведенные испытания показывают, что использование полимерного состава на основе диметакрилового полиэфира с углеродным наполнителем для модификации древесины с научной точки зрения возможно.

Обсуждение. Таким образом, техническое решение для усиленных деревянных балок заключается в модификации опорной зоны компонентным составом, содержащим углеродный наполнитель, путем импульсного воздействия избыточного давления и состоит из следующих процессов: подготовительного, основного и заключительного. Обоснованность результатов базируется на достаточном объеме теоретических и экспериментальных исследований с использованием таких методов, как математическое моделирование, теория проектирования многофакторных экспериментов и статистическая обработка экспериментальных результатов, причем полученные экспериментальные результаты хорошо сходятся с теоретическими значениями.

Согласно результатам исследований, применение углеродных нанотрубок действительно улучшает физико-механические свойства материала. В результате применения получают композиционные материалы с уникальными свойствами. Применение углеродных нанотрубок в качестве наполнителя в составе компонентов создает равномерное распределение в структуре материала и заполняет имеющиеся пустоты.

Структурная модификация является одним из способов не только улучшения прочностных характеристик, создания новых конструкций зданий и сооружений, но и продления срока службы существующих кон-

струкций, а также сохранения уникальных конструкций в объектах культурного наследия. В данной работе исследован новый метод восстановления конструкций. Метод заключается в создании нового технического режима с определенными параметрами. В результате многофакторных экспериментов были установлены параметры давления и времени, что привело к улучшению прочностных характеристик древесины. Особенностью усовершенствованного метода является то, что технология может применяться как непосредственно на строительных площадках, так и на производственных объектах. Благодаря малой занимаемой площади оборудования, данный технический прием может широко применяться для усиления конструкций.

Согласно результатам исследования, состав компонентов для модификации показал хорошие результаты. Количественный состав композиции для модификации древесины был установлен в результате испытаний на образцах древесины. В качестве основы была выбрана термореактивная смола (диметакрилполиэфир) (производство г. Дзержинск, Россия), так как она обладала наибольшим проникновением в структуру древесины по сравнению с другими составами при модификации. Для заполнения пустот в структуре древесины использовались углеродные нанотрубки (производство г. Тамбов, Россия). Для активации компонентного состава в структуре древесины использовался органический пероксид метилэтилкетона. Через несколько часов после модификации проникновение в структуру древесины приводило к отверждению и закреплению композиции в матрице древесины.

Модификация структуры бруса проводилась с помощью устройства, специально подобранного для достижения желаемых результатов. Основными компонентами этого оборудования являются компрессионный двигатель и инжектор. Компрессионный двигатель подбирался с учетом давления, необходимого для вырыска компаунда в структуру древесины (0,2–0,3 МПа). Инжектор подбирался таким образом, чтобы обеспечить равномерное распределение компонентного состава в теле древесины.

Методами оптической микроскопии и компьютерной томографии были исследованы способы модификации, которые показали равномерное распределение компонентного состава в структуре древесины, подтвердили степень наполнения компонентным составом и применимость выбранного технического режима.

Были проведены численные и экспериментальные исследования. При численном исследовании была разработана модель для изучения напря-

женно-деформированного состояния. Эксперименты проводились на гидравлическом стенде, создающем статические нагрузки. Результаты численных и экспериментальных исследований имеют незначительные расхождения, что свидетельствует о хорошей сходимости.

В настоящее время ведутся исследования в аналогичном направлении. Например, в работе [Nagraik et al., 2023] авторы исследовали характер распределения углеродных нанотрубок в структурах с композицией на основе метилметакрилата. Были приготовлены стандартные образцы и испытаны образцы, модифицированные этим составом. Результаты испытаний показали, что прочность увеличилась на 25–30% по сравнению с немодифицированными образцами. Другое исследование касалось армирования опорных зон балок эпоксидными стекловолокнами, замешанными на углеродных нанотрубках [Rimshin et al., 2018]. Образцы были подвергнуты испытаниям на растяжение, и результаты показали, что прочность модифицированных образцов в два раза выше, чем немодифицированных. Разрушение носило пластический характер. Другая работа была направлена на изучение устойчивости древесных композитов к воздействию вредителей [Zelinka et al., 2020]. Результаты исследования показали, что обработка древесных композитов снизила воздействие вредителей на 75%. Некоторые исследования были направлены на восстановление прочностных свойств древесины [Spear et al., 2021]. Для модификации использовались составы на основе этиленгликоля, которыми обрабатывалась ель. Изучались и другие методы модификации древесины [Waßmann et al., 2020]. Химическая модификация влияет на гидрофобность, гигроскопичность, цвет и долговечность. Поверхность может быть обработана специальными покрытиями для повышения влагостойкости и создания экологически чистого материала, который можно использовать на открытом воздухе. Исследовалась также возможность создания углеродных нанотрубок со специфическими свойствами [Búgyová et al., 2021]. С помощью сильного магнитного поля происходят структурное выравнивание углеродных нанотрубок в растворе мономера и последующая химическая полимеризация матрицы.

Эти исследования показывают, что ориентация нанотрубок имеет значение. В изученных исследованиях модификация увеличивала и восстанавливала несущую способность древесины. Заслуживает внимания использование углеродной ленты для повышения несущей способности в зонах сжатия и растяжения балок. Однако следует отметить некоторые приемы модификации образцов древесины и их недостаточную применимость в условиях строительной площадки.

Дальнейшие направления исследований в рамках данной работы включают:

- Применимость метода к реальным зданиям и сооружениям.
- Разработка методики модификации для других типов строительных конструкций.
- Возможность применения данной методики для других типов материалов (бетон, кирпич).
- Исследование модифицированных балок для длительного нагружения.
- Проведение дополнительных исследований влияния пожара, изменения влажности и действия биологических вредителей.

Заключение. По результатам исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Разработана технологическая последовательность и основные принципы модифицирования деревянных конструкций полимерным составом на основе диметакрилового полиэфира с введением углеродного наполнителя под избыточным давлением импульсного воздействия.

2. Предложена и обоснована схема зондирования и топографии отверстий для нагнетания полимерного состава. Шаг инжекторов был определен опытным путем, исходя из «способности» поглощения древесины полимерного состава.

3. Разработанная технология модифицирования повышает прочностные свойства древесины. В ходе испытаний установлено, что предел прочности модифицированной древесины при испытаниях на сжатие вдоль волокон возрастает на 39,69%, а деформативность снижается на 7,7%.

Сведения о финансировании исследования. Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВлГУ).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Рощина С.И., Лукина А.В., Сергеев М.С. [и др.]. Восстановление деревянных конструкций импрегнированием полимерной композицией на примере промышленных зданий легкой и текстильной промышленности // ИВУЗ. Технология текстильной промышленности. 2016. № 5(365). С. 76–80.

Чибрикин Д.А., Лукин М.В., Лукина А.В., Тюрикова Т.В., Рощина С.И. Численное исследование напряженно-деформированного состояния модифицированной деревянной балки // ИВУЗ. Лесной журнал. 2022. № 3(387). С. 167–178.

Шамаев А.В., Попова Н.И., Берзиньш Г.В. Химические изменения древесины при модифицировании ее мочевиной // Химия древесины. 1976. № 4. С. 34–38.

Шамаев В.А. Проблемы изготовления модифицированной древесины // ИВУЗ. Лесной журнал. 2005. № 6. С. 88–91.

Шамаев В.А., Медведев И.Н. К вопросу модифицирования древесины для производства столбов ЛЭП // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2014. Т. 2. № 2-1(7-1). С. 192–197.

Шамаев В.А., Шакирова О.И., Куницкая О.А. Производство модифицированной древесины // Леспроектинформ. 2018. № 5(135). С. 92–97.

Bűryová D., Sedlák P. Life Cycle Assessment of Coated and Thermally Modified Wood Façades // Coatings. 2021.

Godinho D., Araújo S.d.O., Quilhó T., Diamantino T., Gominho J. Thermally Modified Wood Exposed to Different Weathering Conditions // Forests. 2021.

Haiyan Yin, Rebecca Ringman, Maziar Sedighi Moghaddam, Mikko Tuominen, Andra Dédinaité, Magnus Wållinder, Agne Swerin, Stig Bardage. Susceptibility of surface-modified superhydrophobic wood and acetylated wood to mold and blue stain fungi // Progress in Organic Coatings. 2023. No. 182.

Ľďinský J., Vidholdová Z., Reinprecht L. Particleboards from Recycled Thermally Modified Wood // Forests. 2021.

Jambreković B., Govorčin Bajsić E., Španić N., Sedlar T., Sinković T. Viscoelastic and Thermal Properties of Styrene Modified Fir Wood // Polymers. 2022.

Lisyatnikov M.S., Lukina A.V., Chibrikov D.A., Labudin B.V. The Strength of Wood-Reinforced Polymer Composites in Tension at an Angle to the Fibers // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 182. P. 523–533.

Nagraik P., Shukla S.R., Kelkar B.U., Paul B.N. Wood modification with nanoparticles fortified polymeric resins for producing nano-wood composites: a review // Journal of the Indian Academy of Wood Science. 2023. № 20(1). С. 1–11

Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.I. [et al.]. Improvement of strength and stiffness of components of main struts with foundation in wooden frame buildings // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Vol. 13, no. 11. С. 3851–3856.

Spear M.J., Curling S.F., Dimitriou A., Ormondroyd G.A. Review of Functional Treatments for Modified Wood // Coatings. 2021.

Van Blokland J., Adamopoulos S. Electrical resistance characteristics of thermally modified wood // Eur. J. Wood Prod. 2022. No. 80. С. 749–752.

Waßmann O., Ahmed S.I.U. Slippery Wood: Low Friction and Low Wear of Modified Beech Wood // Tribol. 2020.

Zelinka S.L., Passarini L., Matt F.J., Kirker G.T. Corrosiveness of Thermally Modified Wood // Forests. 2020.

Zuo Y., Feng J., Soyol-Erdene T.-O., Zhang Y., Tang W. Recent advances in wood-derived monolithic carbon materials: Synthesis approaches, modification methods and environmental applications // Chemical Engineering Journal. 2023.

References

- Búryová D., Sedlák P. Life Cycle Assessment of Coated and Thermally Modified Wood Façades. *Coatings*, 2021.
- Borisov A.N., Ivanov V.V., Petrenko A.E. The estimation of pine stand's response to thinning in Krasnoyarsk forest-steppe. *Forest Science*, 2014, no. 4, pp. 22–27.
- Chibrikin D.A., Lukin M.V., Lukina A.V., Tyurikova T.V., Roshchina S.I. Numerical investigation of the stress-strain state of a modified wooden beam (in Russian). *IVUZ. Forest journal*, 2022, no. 3(387), pp. 167–178. (In Russ.)
- Dancheva A.V., Gurskaya M.A., Zalesov S.V., Mukanov B.M. Assessment of cleaning cuttings efficiency in pine forests of Kazakhstan hillocks based on forestry and annual rings analyses. *Forest Science*. 2020, no. 6, pp. 503–514.
- Dubenok N.N., Kuzmichev V.V., Lebedev A.V. Forest area dynamics of the Forest experimental district of Russian Timiryazev State Agrarian University over a period of 150 years. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*, 2018, no. 4, pp. 5–19.
- Godinho D., Araújo, S.d.O., Quilhó, T., Diamantino T., Gominho, J. Thermally Modified Wood Exposed to Different Weathering Conditions. *Forests*, 2021.
- Haiyan Yin, Rebecca Ringman, Maziar Sedighi Moghaddam, Mikko Tuominen, Andra Dédinaïtè, Magnus Wälinder, Agne Swerin, Stig Bardage. Susceptibility of surface-modified superhydrophobic wood and acetylated wood to mold and blue stain fungi. *Progress in Organic Coatings*, 2023, no. 182.
- Iždinský J., Vidholdová Z., Reinprecht L. Particleboards from Recycled Thermally Modified Wood. *Forests*, 2021.
- Jambreković B., Govorčin Bajsić E., Španić N., Sedlar T., Sinković T. Viscoelastic and Thermal Properties of Styrene Modified Fir Wood. *Polymers*, 2022.
- Lisyatnikov M.S., Lukina A.V., Chibrikin D.A., Labudin B.V. The Strength of Wood-Reinforced Polymer Composites in Tension at an Angle to the Fibers. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2022, vol. 182, pp. 523–533.
- Nagraik P., Shukla S.R., Kelkar B.U., Paul B.N. Wood modification with nanoparticles fortified polymeric resins for producing nano-wood composites. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 2023, no. 20(1), pp. 1–11.
- Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.I. [et al.]. Improvement of strength and stiffness of components of main struts with foundation in wooden frame buildings. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2018, vol. 13, no. 11, pp. 3851–3856.
- Roshchina S.I., Lukina A.V., Sergeev M.S. [et al.] Restoration of wooden structures by impregnation with polymer composition on the example of industrial buildings of light and textile industry. *IVUZ. Technology of textile industry*, 2016, no. 5(365), pp. 76–80. (In Russ.)
- Shamaev A.V., Popova N.I., Berzins G.V. Chemical changes in dre-vein when modifying it with urea. *Wood Chemistry*, 1976, no. 4, pp. 34–38. (In Russ.)
- Shamaev V.A. Problems of production of modified wood. *IVUZ. Lesnoy zhurnal*, 2005, no. 6, pp. 88–91. (In Russ.)

Shamaev V.A., Medvedev I.N. To the question of wood modification. N. To the issue of wood modification for the production of power transmission poles. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2014, vol. 2, no. 2-1(7-1), pp. 192–197. (In Russ.)

Shamaev V.A., Shakirova O.I., Kunitskaya O.A. Production of modified wood. *Lesprominform*, 2018, no. 5(135), pp. 92–97. (In Russ.)

Spear M.J., Curling S.F., Dimitriou A., Ormondroyd G.A. Review of Functional Treatments for Modified Wood. *Coatings*. 2021.

Spear M.J., Curling S.F., Dimitriou A., Ormondroyd G.A. Review of Functional Treatments for Modified Wood. *Coatings*, 2021.

Van Blokland J., Adamopoulos S. Electrical resistance characteristics of thermally modified wood. *Eur. J. Wood Prod.*, 2022, no. 80, pp. 749–752.

Waßmann O., Ahmed S.Iu. Slippery Wood: Low Friction and Low Wear of Modified Beech Wood. *Tribol*, 2020.

Zelinka S.L., Passarini L., Matt F.J., Kirker G.T. Corrosiveness of Thermally Modified Wood. *Forests*. 2020.

Zuo Y., Feng J., Soyol-Erdene T.-O., Zhang Y., Tang W. Recent advances in wood-derived monolithic carbon materials: Synthesis approaches, modification methods and environmental applications. *Chemical Engineering Journal*, 2023.

Материал поступил в редакцию 18.09.2023

Лукин М.В., Чибрикин Д.А., Мартынов В.А., Куницкая О.А., Теплов А.В., Рощина С.И., Исследование технологического режима модифицирования древесины полимерным составом с углеродным наполнителем // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 248. С. 257–273. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.257-273

Исследуемая технология модифицирования древесины полимерным составом с углеродным наполнителем позволяет повысить качество выпускаемой продукции и увеличить прочностные свойства деревянных конструкций. Для модификации древесины использовался полимерный состав, включающий смолу – диметакриловый полиэфир, отвердитель – перекись метилэтилкетона, ускоритель – октоат кобальта, наноструктурную добавку – нанотрубки «Таунит- М», поверхностно-активное вещество. Технология модифицирования деревянных конструкций заключается в нагнетании полимерной композиции с углеродным наполнителем под избыточным давлением импульсного воздействия. Экспериментально установлен режим модификации древесины полимерным составом (10-5-10-5-10 мин): в течение 10 мин образец подвергается нагнетанию полимерной композицией, затем образец «отдыхал» 5 мин, далее повторялось нагнетание полимерного состав в течение 10 мин. Для производства работ по модификации древесины применялась мобильная установка, включающая емкость,

компрессор, тележку, электронный блок управления, датчик давления, армированный шланг, коннекторы. Вакуумно-роторный насос для модификации древесины предназначен для создания и поддержания остаточного давления при модификации древесины методом избыточного давления. Была предложена и обоснована схема зондирования и топографии отверстий для нагнетания полимерного состава. Исходя из способности поглощения древесины полимерного состава опытным путем был определен шаг инжекторов 200 мм. По результатам проведенной микроскопии установлено планомерное внедрение полимерного состава в структуру древесины, при этом плотность модифицированной древесины увеличилась на 34%. Для оценки прочностных свойств модифицированной древесины были выполнены испытания стандартных образцов, отобранных из конструкции, на сжатие. Результаты испытаний показали увеличение предела прочности модифицированной древесины по сравнению с обычной древесиной на 39,69% и уменьшение деформативности на 7,7%.

Ключевые слова: древесина, полимерный состав, прочность, деформативность, модификация, деревянные конструкции.

Lukin M.S., Chibrikin D.A., Martynov V.A., Kunitskaya O.A., Teplov A.V., Roshchina S.I. Investigation of technological mode of wood modification by polymer composition with carbon filler. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 248, pp. 257–273 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.257-273

The investigated technology of modifying wood with a polymer compound with a carbon filler makes it possible to improve the quality of products and increase the strength properties of wooden structures. For wood modification, a polymer composition was used, including a resin – dimethacrylic polyester, a hardener – methyl ethyl ketone peroxide, an accelerator – cobalt octoate, a nanostructural additive – nanotubes «Таунит- М», a surfactant. The technology of modifying wooden structures consists in pumping a polymer composition with a carbon filler under excessive pressure of pulsed action. The mode of modification of wood by polymer composition (10-5-10-5-10 min) has been experimentally established: for 10 minutes, the sample was injected with a polymer compound, then the sample «rested» for 5 minutes, then the injection of the polymer composition was repeated for 10 minutes. To carry out work on the modification of the turbine, a mobile installation was used, including a container, a compressor, a trolley, an electronic control unit, a pressure sensor, a reinforced hose, and connectors. The vacuum rotary pump for wood modification is designed to create and maintain residual pressure during wood modification by the overpressure method. A scheme of zonation and topography of holes for injection of polymer composition was proposed and justified. Based on the ability to absorb wood of the polymer composition, the pitch of the injectors was experimentally determined 200 mm. According to the results of microscopy, a systematic introduction of the

polymer composition into the wood structure was established, while the density of the modified wood increased by 34%. To assess the strength properties of the modified wood, compression tests were performed on standard samples selected from the structure. The test results showed an increase in the tensile strength of modified wood compared to conventional wood by 39.69% and a decrease in deformability by 7.7%.

Keywords: wood, polymer composition, strength, deformability, modification, de-wood structures.

ЛУКИН Михаил Владимирович – доцент кафедры строительных конструкций Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, кандидат технических наук. SPIN-код: 6785-0793. ORCID: 0000-0002-2033-3473.

600000, ул. Горького, д. 87, г. Владимир, Россия. E-mail: lukin_mihail_22@mail.ru

LUKIN Mihail V. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Building Structures, Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov. SPIN-code: 6785-0793. ORCID: 0000-0002-2033-3473.

600000. Gorkogo str. 87. Vladimir. Russia. E-mail: lukin_mihail_22@mail.ru

ЧИБРИКИН Данила Александрович – старший преподаватель кафедры строительных конструкций Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, кандидат технических наук. SPIN-код: 1809-6997. ORCID: 0000-0001-9278-4559.

600000, ул. Горького, д. 87, г. Владимир, Россия. E-mail: dachibrikin@outlook.com

CHIBRIKIN Danila A. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Building Structures, Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov. SPIN-code: 1809-6997. ORCID: 0000-0001-9278-4559.

600000. Gorkogo str. 87. Vladimir. Russia. E-mail: dachibrikin@outlook.com

МАРТЫНОВ Владислав Алексеевич – ассистент кафедры строительных конструкций Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых. SPIN-код: 1232-5835. ORCID: 0000-0002-6570-0265.

600000, ул. Горького, д. 87, г. Владимир, Россия. E-mail: martinov3369@gmail.com

MARTYNOV Vladislav A. – Assistant of the Department of Building Structures, A.G. and N.G. Stoletov Vladimir State University. SPIN-code: 1232-5835. ORCID: 0000-0002-6570-0265.

600000. Gorkogo str. 87. Vladimir. Russia. E-mail: martinov3369@gmail.com

КУНИЦКАЯ Ольга Анатольевна – профессор кафедры технологии и оборудования лесного комплекса Арктического государственного агротехнологического университета, доктор технических наук. SPIN-код: 1353-1192. ORCID: 0000-0001-8542-9380.

677008, ш. Сергеляхское, 3 км, д. 3, г. Якутск, Россия. E-mail: ola.ola07@mail.ru

KUNITSKAYA Olga A. – DSc (Technical), Professor of the Department «Technology and Equipment of the forest complex» of the Arctic State Agrotechnological University. SPIN-code: 1353-1192. ORCID: 0000-0001-8542-9380.

677008. Sergelyakhskoye sh. 3 km. 3. Yakutsk. Russia. E-mail: ola.ola07@mail.ru

ТЕППОЕВ Алексей Викторович – заведующий кафедрой автоматизации, метрологии и управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доцент, кандидат технических наук. SPIN-код: 4451-4059. ORCID: 0000-0002-8589-444X

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: avt01@inbox.ru

ТЕРПОВЕВ Aleksei V. – PhD (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Automation, Metrology and Control of technical systems, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 4451-4059. ORCID: 0000-0002-8589-444X.

194021. Institutskiy lane. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: avt01@inbox.ru

РОЩИНА Светлана Ивановна – профессор кафедры строительных конструкций Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, профессор, доктор технических наук. SPIN-код: 4159-8639. ORCID: 0000-0003-0356-1383.

600000, ул. Горького, д. 87, г. Владимир, Россия. E-mail: rsi3@mail.ru

ROSHCHINA Svetlana I. – DSc (Technical), Professor of the Department of Building Structures, Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov. SPIN-code: 4159-8639. ORCID: 0000-0003-0356-1383.

600000. Gorkogo str. 87. Vladimir. Russia. E-mail: rsi3@mail.ru