


**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ /
INSTRUMENTS AND METHODS OF EXPERIMENTAL PHYSICS**<https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.204-220>EDN: <https://elibrary.ru/gijsku>

УДК / UDK 674.8:543.4

*Оригинальная статья / Original article***Физико-химические характеристики
древесного наполнителя, прошедшего
двухступенчатую обработку****К. Г. Аникеева** , **Р. Р. Сафин***Казанский национальный исследовательский
технологический университет,**г. Казань, Российская Федерация, <https://ror.org/03shav252>** doomksen@mail.ru**Аннотация*

Введение. Важной проблемой современной промышленности является загрязнение окружающей среды изделиями из пластика, которые накапливаются в экосистемах и обладают высокой стойкостью к разложению. Это создает угрозу для природных ресурсов и требует разработки альтернативных материалов, сочетающих прочность и экологическую безопасность. Перспективный класс биоразлагаемых материалов представляют древесно-полимерные композиты, недостатком которых является сложность в обеспечении прочного взаимодействия между гидрофильным древесным наполнителем и гидрофобной полимерной матрицей, влияющим на физико-механические и эксплуатационные свойства.

Цель исследования. Исследование влияния двухступенчатой обработки древесного наполнителя на структурные изменения в его составе и физико-химические свойства полученных композитов.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования выбраны образцы сосновой древесной муки, подвергнутые двухступенчатой обработке. Для анализа молекулярной структуры и химических изменений применен метод инфракрасной спектроскопии. Используются методы анализа водопоглощения и определения предела прочности при изгибе и растяжении.

Результаты исследования. Определена прочность при изгибе и растяжении, а также степень водопоглощения материала. Термическая обработка привела к деградации целлюлозы и лигнина, уменьшению влажности и улучшению механических свойств. Озонирование повысило содержание оксигенсодержащих групп, усилило адгезию с полимерной матрицей и снизило водопоглощение на 50 %. Прочность при растяжении увеличилась на 17,89 %, при изгибе – на 15,6 %.

Обсуждение и заключение. Предложенный метод модификации древесного наполнителя позволяет значительно улучшить эксплуатационные характеристики древесно-полимерных композитов. Материал может быть использован при производстве биоразлагаемых емкостей для посадки растений, что открывает перспективы его применения в экологических технологиях. Полученные результаты подтверждают эффективность двухступенчатого подхода к трансформации наполнителя и целесообразность его применения в промышленном производстве.

© Аникеева К. Г., Сафин Р. Р., 2026

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Ключевые слова: биокompозиты, физико-химические свойства, инфракрасная спектроскопия, предел прочности на разрыв и изгиб, термопластичный крахмал, древесная мука

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Аникеева К.Г., Сафин Р.Р. Физико-химические характеристики древесного наполнителя, прошедшего двухступенчатую обработку. *Инженерные технологии и системы*. 2026;36(1):204–220. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.204-220>

Physical and Chemical Characteristics of Wood Filler Two-Stage Processing

K. G. Anikeeva ✉, R. R. Safin

Kazan National Research Technological University,
Kazan, Russian Federation, <https://ror.org/03shav252>

✉ doomksen@mail.ru

Abstract

Introduction. An acute problem of modern industry is environmental pollution by plastic products, which are highly resistant to degradation and accumulate in ecosystems. This poses a threat to natural resources and requires the development of alternative materials combining strength and environmental safety. In this context, special attention is paid to wood-polymer composites (WPC), which are a promising class of biodegradable materials. Their drawback is the difficulty in ensuring a strong interaction between the hydrophilic wood filler and hydrophobic polymer matrix that directly affects the physical, mechanical and operational properties.

Aim of the Study. The study is aimed at investigating the effect of two-stage processing of wood filler (thermal modification followed by ozonation) on structural changes in its composition and the physicochemical properties of the obtained composites.

Materials and Methods. The studies were carried out using pine wood flour subjected to two-stage processing. IR spectroscopy was used to analyze the molecular structure and chemical changes. Infrared spectroscopy was used to analyze the molecular structure and chemical changes. There were also used water absorption analysis and determination of bending and tensile strength.

Results. There have been determined the bending and tensile strength, and the degree of water absorption of the material. Thermal treatment resulted in degradation of cellulose and lignin, reduction of humidity and improvement of mechanical properties. Ozonation increased the content of oxygen-containing groups, strengthened adhesion with the polymer matrix and reduced water absorption by 50%. The tensile strength increased by 17.89% and the bending strength by 15.6%.

Discussion and Conclusion. The proposed method of modifying wood filler allows improving significantly the performance characteristics of WPC. The material can be used to produce biodegradable containers for planting that opens up prospects for its application for environmentally friendly technologies. The results obtained confirm the effectiveness of the two-stage approach to filler modification and the feasibility of its use in industrial production.

Keywords: biocomposites, physicochemical properties, IR spectroscopy, tensile and bending strength, thermoplastic starch, wood flour

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation: Anikeeva K.G., Safin R.R. Physical and Chemical Characteristics of Wood Filler Two-Stage Processing. *Engineering Technologies and Systems*. 2026;36(1):204–220. <https://doi.org/10.15507/2658-4123.036.202601.204-220>

ВВЕДЕНИЕ

В условиях роста экологической нагрузки на окружающую среду большее значение приобретает разработка и внедрение биоразлагаемых материалов, способных заменить традиционные синтетические полимеры. Одним из перспективных направлений в этой области является создание древесно-полимерных композитов (ДПК), сочетающих преимущества возобновляемого сырья и высоких эксплуатационных характеристик. Согласно исследованию зарубежных ученых, мировой рынок ДПК демонстрирует стабильный рост, что связано с увеличением спроса на экологически чистые материалы, доступностью исходных компонентов композита и возможностью переработки¹. Однако широкое применение таких материалов сдерживается рядом проблем, основывающихся на низкой совместимости гидрофильного древесного наполнителя и гидрофобной полимерной матрицы, что приводит к слабой адгезии между компонентами, увеличению водопоглощения и снижению прочностных свойств конечного продукта. Решение этих задач имеет важное значение для создания устойчивых и долговечных композитов, способных найти применение не только в упаковочной промышленности, но и в сельском хозяйстве, строительстве и других отраслях.

Современные исследования демонстрируют, что модификация древесного наполнителя позволяет значительно повысить качество получаемых композитов. Так, термическая обработка древесины при температуре 180–220 °С приводит к снижению содержания гидроксильных групп за счет деградации гемицеллюлозы, что подтверждается данными инфракрасной спектроскопии (ИК-спектроскопии) [1]. Озонирование, в свою очередь, способствует образованию новых оксигенсодержащих функциональных групп на поверхности древесной муки, улучшая ее химическую активность и взаимодействие с полимерной матрицей [2].

Комбинированное применение термической обработки и озонирования открывает новые возможности для оптимизации структуры и свойств ДПК. Двухступенчатая модификация позволяет снизить водопоглощение древесного наполнителя на 40–50 % и увеличить прочность на растяжение на 20–25 %, что объясняется улучшением межфазного взаимодействия между компонентами композита [3].

Актуальной научной задачей становится всестороннее изучение физико-химических трансформаций, происходящих в структуре древесного наполнителя на каждом этапе двухступенчатой модификации. Особый интерес представляет выявление закономерностей, связывающих структурные изменения наполнителя с формированием ключевых эксплуатационных свойств конечного композита: перестройка поверхности, изменение функциональных групп и межфазного взаимодействия. Понимание этих взаимосвязей может позволить целенаправленно управлять характеристиками материала, повышая его механическую прочность, адгезию с матрицей и устойчивость к внешним воздействиям.

Целью данного исследования является изучение влияния двухступенчатой модификации, включающей в себя озонирование с последующей термической обработкой, на физико-химические свойства древесного наполнителя и характеристики ДПК на его основе.

¹ Fabiyi J.S., McDonald A.G., Stark N.M. Surface Characterization of Weathered Wood-Plastic Composites Produced from Modified Wood Flour. In: 9th International Conference on Wood & Biofiber Plastic Composites. Madison: Forest Products Society. 2007. p. 271–275.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В последние годы значительно возрос интерес к разработке биоразлагаемых материалов, в частности ДПК, в связи с чем увеличилось количество как отечественных, так и зарубежных научных публикаций по тематике модификации древесного наполнителя: улучшения его совместимости с полимерной матрицей и повышения эксплуатационных характеристик получаемых композитов.

Одним из ключевых направлений в области создания ДПК является физико-химическая модификация для повышения адгезии с полимерной матрицей. По мнению ряда исследователей, основная проблема заключается в плохой совместимости гидрофильной древесины с гидрофобными термопластичными матрицами, такими как полиэтилен или полипропилен [4–6].

Рассмотрев различные методы поверхностной обработки древесины, включая щелочную обработку, озонирование и плазменную обработку, можно сделать вывод, что комбинированные подходы дают наибольший эффект в улучшении свойств ДПК [7; 8]. Аналогичные выводы представлены исследователями из США, которые показали, что химическая модификация целлюлозных волокон позволяет снизить водопоглощение и повысить механические свойства композита [9].

В ряде работ зарубежных ученых также подчеркивается важность двухступенчатой обработки: термической и последующей химической модификации [10]. А. Р. Могэ показал, что сочетание термической обработки и озонирования способствует снижению содержания свободных ОН-групп и увеличению полярности поверхности наполнителя, что положительно сказывается на прочностных характеристиках материала [11].

Одной из основных трудностей при создании эффективных ДПК является необходимость сохранить экологичность материала при одновременном обеспечении высоких эксплуатационных свойств. Сложность заключается в том, что большинство традиционных методов модификации требуют использования химических реагентов, которые могут быть токсичными или противоречить принципам «экологически чистых материалов» [12; 13]. Кроме того, существует проблема масштабируемости лабораторных методов для промышленного производства. Некоторые исследователи указывают на то, что, хотя многие технологии показывают хорошие результаты в лабораторных условиях, их реализация в промышленных масштабах затруднена из-за высокой энергоемкости и сложности контроля параметров процесса [14–16]. Еще одной актуальной задачей является прогнозирование поведения композита в различных условиях эксплуатации, особенно в условиях повышенной влажности, перепадов температур и воздействия микроорганизмов [17–19]. Отечественные работы сфокусированы на доступных и легко внедряемых технологиях, таких как термическая и озонная обработка, что делает их более применимыми для реализации на производствах [20].

Таким образом, несмотря на значительный прогресс в области модификации древесного наполнителя, задача разработки экологически безопасных методов, способных одновременно улучшить адгезию наполнителя к полимерной матрице и снизить гигроскопичность композита остается нерешенной. Настоящее

исследование направлено на изучение двухступенчатой обработки как перспективного альтернативного метода обработки древесного наполнителя перед введением его в состав композиционного материала.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования

В рамках исследования были проанализированы два образца сосновой муки: исходный, не подвергавшийся обработке, и модифицированный, прошедший последовательно термическую обработку и озонирование.

Методы, оборудование материалы исследования

Для исследования молекулярной структуры веществ использовался метод ИК-спектроскопии, который позволил зарегистрировать на каких частотах поглощалось инфракрасное излучение. Поглощение связано с колебательными переходами в химических связях, что сделало метод особенно чувствительным к функциональным группам и структурным особенностям образца. Измерения выполнены на ИК-Фурье-спектрометре Frontier (PerkinElmer) с использованием приставки, основанной на принципе нарушенного полного внутреннего отражения. Полученные спектры интерпретировались по характерным волновым числам, позволяя отслеживать изменения в химическом составе после обработки.

Для оценки гигроскопичности образцов применялся метод, регламентированный ГОСТ 16483.19-72². Образцы предварительно высушивались в вакуумной сушильной камере при 103 °С в течение 72 часов, после чего помещались в эксикатор с дистиллированной водой. Динамика поглощения влаги фиксировалась путем последовательного взвешивания: первое – через 24 часа, далее – на 2, 3, 6, 9, 13, 20 и 30 сутки.

Прочностные характеристики при изгибе определялись в соответствии с ГОСТ 4648-2014³ на универсальной испытательной машине. Образцы подвергались изгибающей нагрузке с постоянной скоростью 2 мм/мин до момента разрушения.

Предел прочности при растяжении древесно-полимерных композитов измеряли по методике ГОСТ 11.262-2017⁴. Испытания проводились на двухколонной машине GOTECH AI-7000M, оснащенной датчиком на 5 кН и установленным расстоянием между зажимами 60 мм. Образцы, отлитые в форме «лопаток», растягивались со скоростью 50 мм/мин до разрыва, что позволяло зафиксировать максимальное напряжение, выдерживаемое материалом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рисунке 1 изображен инфракрасный спектр пропускания в графическом виде. По горизонтальной оси X отложены волновые числа (см^{-1}) – величина,

² ГОСТ 16483.19-72. Древесина. Метод определения влагопоглощения. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294852/4294852264.htm> (дата обращения: 21.05.2025).

³ ГОСТ 4648-2014. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200110853> (дата обращения: 21.05.2025).

⁴ ГОСТ 11.262-2017. Пластмассы. Метод испытания на растяжение URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200158280/titles/65C0IR> (дата обращения: 30.05.2025).

обратная длине волны и напрямую связанная с частотой колебаний химических связей в молекулах. По вертикальной оси Y указано процентное пропускание $\% T$, т. е. доля инфракрасного излучения, прошедшего сквозь образец без поглощения. Чем ниже значение T в определенной области спектра, тем интенсивнее поглощение, что указывает на присутствие соответствующих функциональных групп.

На спектре, представленном на рисунке 1, наблюдаются характерные полосы поглощения, каждая из которых соответствует определенным функциональным группам в составе исследуемого образца.

Широкий и выраженный максимум вблизи 3330 см^{-1} обусловлен валентными колебаниями гидроксильных связей (O–H). Такое поглощение типично для соединений с OH-группами – в первую очередь, воды, спиртов и фенолов. В случае сосновой муки основными носителями этих групп выступают целлюлоза и лигнин, входящие в состав клеточных стенок древесины.

Пик в области 1736 см^{-1} связан с колебаниями карбонильных групп (C=O), характерных для органических соединений, таких как карбоновые кислоты, кетоны, альдегиды или эфиры. Его присутствие может свидетельствовать о наличии окисленных структур или сложных эфиров в образце.

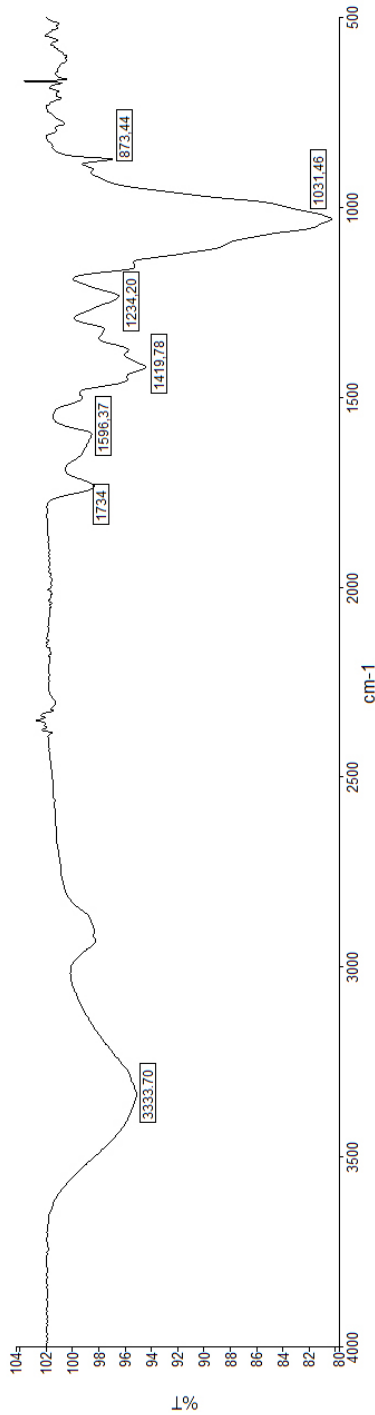
Полосы в диапазоне $1600\text{--}1500 \text{ см}^{-1}$, как правило, отражают колебания ароматических систем – в частности, бензольных колец, входящих в структуру лигнина. Эти сигналы являются маркерами ароматической компоненты биополимеров древесины.

Ярко выраженный пик около 1050 см^{-1} соответствует деформационным и валентным колебаниям связей C–O и C–O–H, которые преобладают в полисахаридах – прежде всего, в целлюлозе и гемицеллюлозе.

На рисунке 2 приведен ИК-спектр сосновой муки, прошедшей двухэтапную модификацию: сначала термическую обработку, затем озонирование. Сравнение спектров позволяет выявить изменения в химическом составе и структуре образца под влиянием этих воздействий.

На представленном ИК-спектре образца сосновой муки, подвергнутого двухступенчатой модификации, наблюдаются характерные изменения в интенсивности и положении полос поглощения, отражающие структурные и функциональные трансформации биополимеров древесины.

Пик при 3338 см^{-1} интерпретируется как валентные колебания гидроксильных групп O–H, локализованных в структуре целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Пик в области $\sim 1730 \text{ см}^{-1}$ соответствует валентным колебаниям карбонильных групп C=O, что может указывать на присутствие сложных эфиров, альдегидов или карбоновых кислот, образовавшихся, вероятно, в результате окислительных процессов при озонировании. Полосы при 1317 см^{-1} и 1233 см^{-1} обусловлены деформационными колебаниями связей C–H и C–O, характерных для углеводных и ароматических фрагментов. Пик при 1031 см^{-1} ассоциируется с валентными колебаниями эфирных связей C–O–C в полисахаридных цепях целлюлозы и гемицеллюлозы. Поглощение в области $\sim 601 \text{ см}^{-1}$ может быть связано с деформационными колебаниями ароматических или гетероциклических фрагментов.

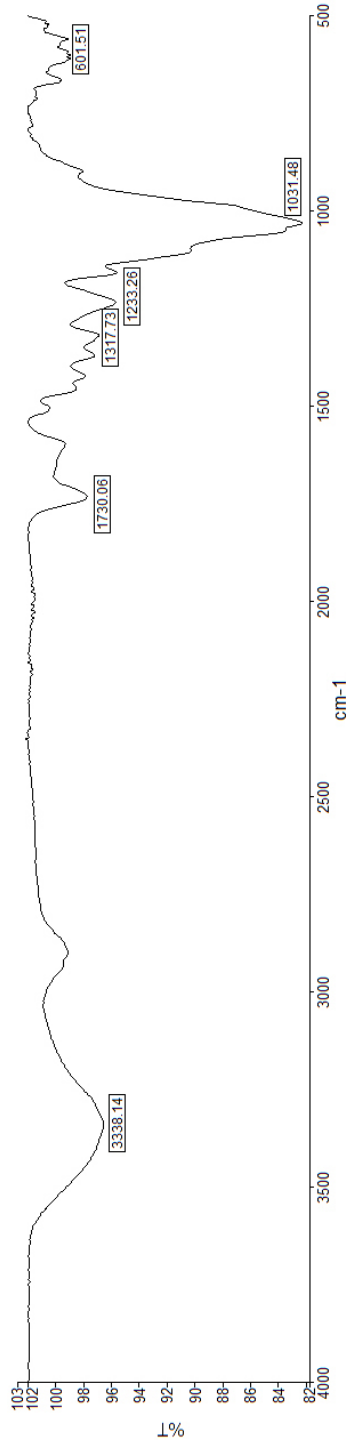


Р и с. 1. ИК-спектры пропускания контрольного образца

Fig. 1. Protocol for studying the IR transmission spectra of a control sample

Источник: рисунок 1 взят из [26].

Source: the figure 1 is taken from [26].



Р и с. 2. ИК-спектры пропускания озонированного и термически модифицированного образца

Fig. 2. Protocol for studying the IR transmission spectra of an ozonized and thermally modified sample

Источник: рисунок составлен авторами статьи.

Source: the graph is compiled by the authors of the article.

Сравнительный анализ спектров контрольного (необработанного) и модифицированного образцов выявляет значительные различия в профиле поглощения. Спектр исходной древесной муки демонстрирует выраженные полосы, характерные для нативных биополимеров: интенсивный максимум при $3330,70 \text{ см}^{-1}$ отражает высокую концентрацию гидроксильных групп, присущих целлюлозе, гемицеллюлозе и лигнину. В ходе озонирования происходит окислительная деструкция органических структур, сопровождающаяся трансформацией гидроксильных и фенольных групп в карбонильные и карбоксильные функции.

У модифицированного образца наблюдается снижение интенсивности полос при $1596,37 \text{ см}^{-1}$ и $1419,78 \text{ см}^{-1}$. Поглощение при $1596,37 \text{ см}^{-1}$ связано с валентными колебаниями ароматических $\text{C}=\text{C}$ связей в лигнине; его ослабление свидетельствует о деструкции ароматических ядер под действием термической обработки и озонлиза. Пик при $1419,78 \text{ см}^{-1}$ отражает деформационные колебания $\text{C}-\text{H}$ и $\text{O}-\text{H}$, а также колебания $\text{C}-\text{OH}$ групп в углеводных компонентах. Снижение его интенсивности указывает на частичную деградацию целлюлозы и гемицеллюлозы, сопровождающуюся уменьшением концентрации гидроксильных и метиленовых групп, а также их окислением до карбонильных и карбоксильных производных.

Полоса при $1234,26 \text{ см}^{-1}$, характерная для $\text{C}-\text{O}$ в эфирных и спиртовых структурах полисахаридов, также демонстрирует снижение интенсивности, что согласуется с разрушением гемицеллюлозных и целлюлозных цепей при термическом воздействии. Пик при $873,44 \text{ см}^{-1}$, связанный с деформационными колебаниями в β -глюкозидных звеньях и метильных/метиленовых группах, ослабевает вследствие термоиндуцированного и озонлитического расщепления гликозидных связей $\text{C}-\text{O}-\text{C}$. Одновременно наблюдается усиление поглощения при $1317,73 \text{ см}^{-1}$ – вероятно, за счет накопления карбонильных групп, образующихся при окислении.

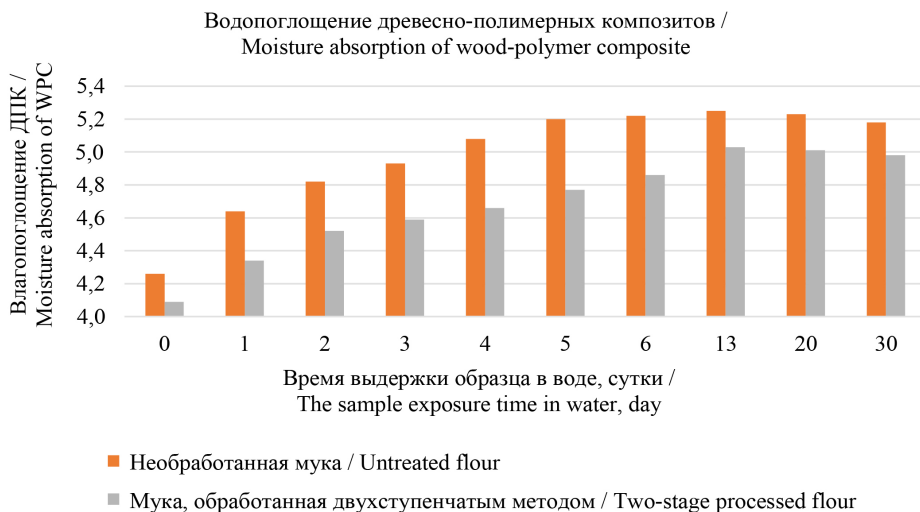
Рост интенсивности полосы при $601,51 \text{ см}^{-1}$ может быть обусловлен деформационными колебаниями в остаточных фенольных структурах лигнина, подвергшихся частичной модификации в ходе озонирования, что указывает на сохранение некоторых ароматических фрагментов, но в измененной, окисленной форме.

На рисунке 3 представлены данные по гигроскопичности ДПК на основе термопластичного крахмала, армированных двумя типами наполнителя: необработанной древесной мукой и мукой, прошедшей двухступенчатую модификацию. График отражает кинетику влагопоглощения, позволяя оценить влияние предварительной обработки наполнителя на гидрофильные свойства конечного материала.

Согласно результатам исследования, представленным на рисунке 3, масса контрольных образцов увеличивается с увеличением времени эксперимента. Композиционный материал с необработанным наполнителем в составе имеет максимальный показатель влагопоглощения из-за наличия открытых пор и гидрофильных групп в структуре древесины. Эти группы образуют водородные связи с молекулами воды, что приводит к значительному увеличению массы образца.

При проведении термической модификации происходит разрушение гемицеллюлозы и частичная деполимеризация лигнина, что снижает количество гидрофильных групп в структуре древесины. Воздействие температуры позволяет снизить гигроскопичность материала, в то время как вторая ступень обработки,

озонирование, воздействует на поверхность древесины, окисляя органические компоненты, такие как лигнин и экстрактивные вещества. Таким образом, двухступенчатая обработка обеспечивает наименьшее влагопоглощение благодаря комбинированному воздействию термической модификации, сопровождающейся снижением количества гидрофильных групп и озонирования, которое способствует устраниению их остатков на поверхности.

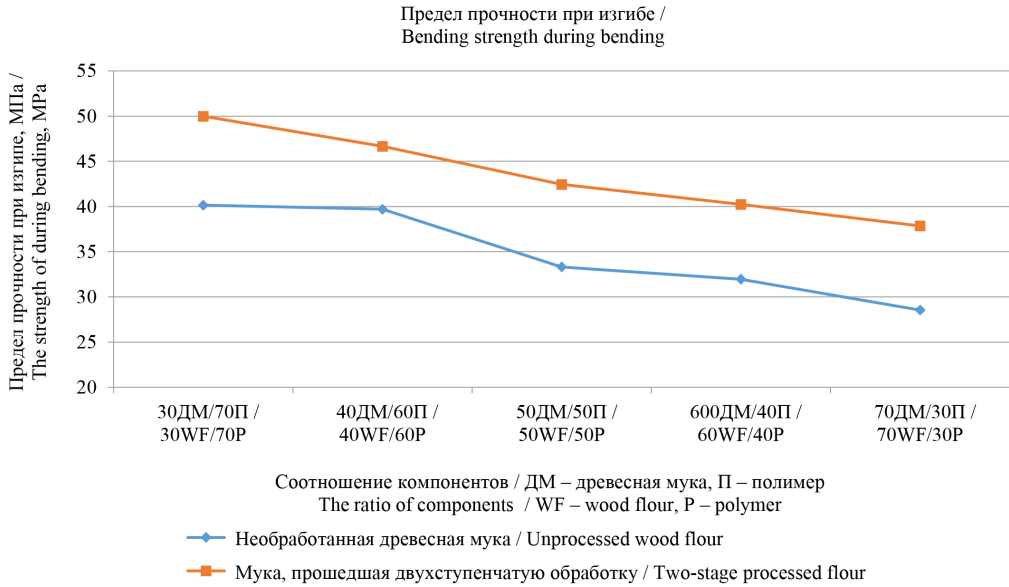


Р и с. 3. Определение влагопоглощения древесно-полимерных композитов
F i g. 3. Determination of water absorption of wood-polymer composites

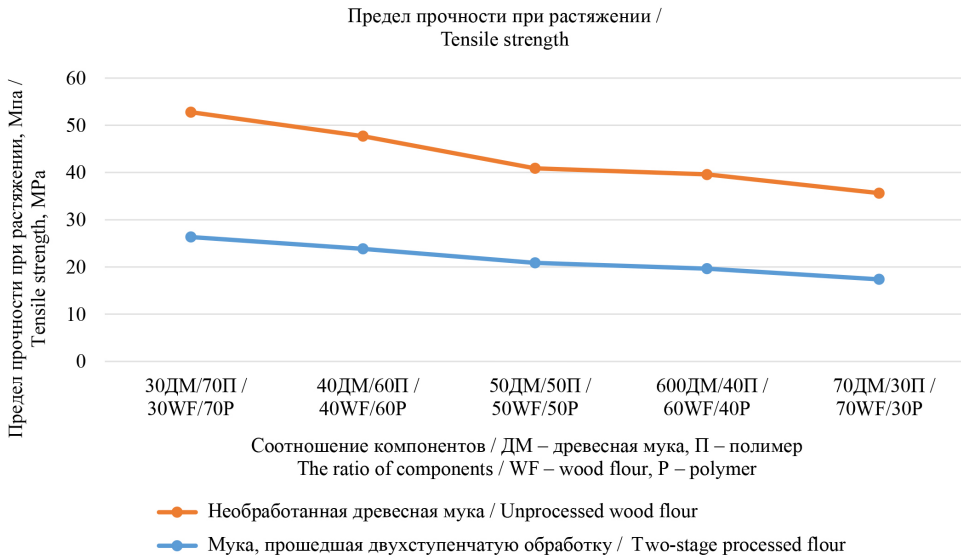
Источник: графики для рисунков 3–5 составлены авторами статьи в программе *Microsoft Excel*.
Source: the graphs 3–5 are compiled by the authors of the article in the program *Microsoft Excel*.

По результатам проведения исследования предела прочности при изгибе (рис. 4) для ДПК на основе термопластичного крахмала и двух видов муки установлено, что с увеличением содержания древесной муки в составе композита предел прочности постепенно снижается. Это связано с тем, что площадь контакта между частицами муки и матрицей увеличивается и приводит к формированию слабых границ раздела фаз. Двухступенчатая обработка муки способствует повышению показателя, максимальная прочность достигается при минимальном содержании муки в композите – 30 %. Так, термическая модификация увеличивает полярность муки, озонирование способствует окислению органических соединений с образованием функциональных групп, которые улучшают адгезию между компонентами смеси.

Анализируя данные, показанные на рисунке 5, можно утверждать, что образцы с мукой, прошедшей двухступенчатую обработку, демонстрируют наилучшие показатели предела прочности при растяжении. Это объясняется тем, что необработанная древесная мука имеет менее развитые межфазные связи с полимерной матрицей, что приводит к меньшей эффективности передачи нагрузки между компонентами.



Р и с. 4. Предел прочности древесно-полимерного композита при изгибе
F i g. 4. Bending strength of wood-polymer composite



Р и с. 5. Предел прочности древесно-полимерного композита при растяжении
F i g. 5. Tensile strength of wood-polymer composite

Установлена четкая корреляция между содержанием древесной муки в составе ДПК и его механическими свойствами: с увеличением массовой доли наполнителя наблюдается снижение предела прочности при растяжении для композитов

и с необработанной, и с модифицированной мукой. Однако степень снижения прочности существенно выше в системах с необработанным наполнителем, что указывает на недостаточную совместимость древесной муки с полимерной матрицей.

Предварительная термическая модификация способствует активации поверхности древесного наполнителя за счет частичной деструкции аморфных компонентов и экспонирования функциональных групп, что повышает его реакционную способность и улучшает межфазное взаимодействие с матрицей. Дополнительное озонирование индуцирует формирование на поверхности частиц новых кислородсодержащих функциональных групп (карбонильных, карбоксильных, гидроксильных), способных к образованию водородных и ковалентных связей с полимерной фазой. Данные процессы подтверждены спектроскопическими исследованиями (ИК-Фурье), выявившими характерные изменения в функциональном составе поверхности модифицированного наполнителя.

Экспериментальные данные демонстрируют значительное улучшение механических характеристик ДПК при использовании двухступенчато модифицированной древесной муки. В частности, предел прочности при растяжении увеличился на 17,89 %, а прочность при изгибе – на 15,6 % по сравнению с композитами на основе необработанной муки. Указанное улучшение механических свойств обусловлено оптимизацией адгезионного взаимодействия на границе «наполнитель – матрица». Термическая обработка повышает поверхностную полярность древесных частиц, способствуя более эффективному смачиванию и распределению в полимерной фазе. Озонирование, в свою очередь, обеспечивает химическую функционализацию поверхности, создавая дополнительные центры взаимодействия, которые способны участвовать в межмолекулярных и химических связях с компонентами матрицы. Совокупный эффект данных модификаций приводит к формированию более однородной и прочной композитной структуры.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено комплексное физико-химическое исследование ДПК на основе термопластичного крахмала, армированных двумя типами древесного наполнителя: необработанной древесной мукой и мукой, подвергнутой последовательной двухступенчатой модификации – термической обработке с последующим озонированием.

Представлен инновационный метод повышения совместимости древесного наполнителя с полимерной матрицей, основанный на комбинированном воздействии. На первом этапе, термической модификации, происходит селективная деструкция термолабильных компонентов древесины, в частности гемицеллюлозы и аморфных фрагментов лигнина, что сопровождается снижением концентрации гидрофильных функциональных групп и, как следствие, уменьшением гигроскопичности композита. На втором этапе, озонолитизе, реализуется поверхностная окислительная функционализация наполнителя, приводящая к образованию дополнительных карбонильных ($C=O$) и карбоксильных ($-COOH$) групп, способных к формированию межмолекулярных и химических связей с матрицей, что существенно усиливает межфазную адгезию.

Данные, полученные методом ИК-Фурье-спектроскопии, подтверждают структурные и функциональные трансформации, происходящие в древесной муке

в результате двухступенчатой обработки. Отмечено снижение интенсивности характерных полос поглощения, ассоциированных с ароматическими фрагментами лигнина и кристаллическими доменами целлюлозы, что свидетельствует о частичной деструкции данных компонентов. Одновременно фиксируется появление или усиление полос, соответствующих карбонильным и карбоксильным группам, что подтверждает успешную поверхностную окислительную модификацию. Совокупность этих изменений указывает на повышение реакционной способности и полярности поверхности наполнителя, что способствует более эффективному молекулярному взаимодействию с полимерной матрицей и, как следствие, улучшению механических и физико-химических свойств конечного композитного материала.

Одним из важнейших преимуществ двухступенчатой модификации является значительное снижение водопоглощения ДПК. По итогам 30-дневного испытания по ГОСТ 16483.19-72 водопоглощение композита с необработанной мукой составило 5,25 %, тогда как у композита с двухступенчато модифицированной мукой – 4,98 %, что соответствует снижению на 50 % в начальной фазе влагопоглощения и на 5,1 % по конечному значению. Это связано с разрушением гемицеллюлозы и лигнина, а также с окислением гидрофильных групп на поверхности древесины. Уменьшение содержания гидроксильных групп и увеличение доли карбонильных соединений снижают гидрофильность материала, что делает его более устойчивым к воздействию влаги. Снижение водопоглощения материала особенно важно при использовании композита в качестве материала для изготовления биоразлагаемых емкостей для посадки растений, где материал подвергается длительному контакту с водой.

Полученные результаты демонстрируют высокий потенциал двухступенчатой обработки древесной муки для создания качественных биокомпозитов с заданными свойствами. Модифицированный древесный наполнитель позволяет получить материал, сочетающий в себе высокие механические характеристики, устойчивость к воздействию воды и экологическую безопасность. Это открывает новые возможности применения ДПК в различных отраслях промышленности, таких как строительство, производство упаковочных материалов и сельское хозяйство.

Настоящее исследование вносит значительный вклад в развитие технологий создания биокомпозитов на основе древесной муки и термопластичного крахмала. Авторами предложен и экспериментально обоснован инновационный метод двухступенчатой модификации древесного наполнителя перед введением его в состав композиционного материала. Данный метод позволяет достичь оптимального баланса между механическими свойствами и устойчивостью к воздействию воды.

Наибольший прирост прочности при изгибе (15,6 %) и растяжении (17,89 %) достигнут при содержании модифицированного наполнителя 30 % от массы, что также сопровождалось минимальным водопоглощением – 4,98 % через 30 суток. Таким образом, данное исследование подтверждает целесообразность применения двухступенчатой модификации древесной муки для получения высококачественных биокомпозитов, обладающих уникальными физико-химическими и эксплуатационными свойствами. Результаты работы могут быть использованы для разработки новых экологически чистых материалов, что имеет важное значение для современного производства и решения экологических проблем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Esteves B., Pereira H. Wood Modification by Heat Treatment: A Review. *BioResources*. 2008;(4):370–404. <https://doi.org/10.15376/biores.4.1.370-404>
2. Safiullina A., Safin R., Mukhametzyanov S., Sabirova G., Shaikhutdinova A. Ozone Processing as a Method for Increasing Adhesional Properties of Wood. In: 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings SGEM: STEF92 Technology. 2020. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/6.1/s26.053>
3. Аникеева К.Г., Сафин Р.Р. Влияние двухступенчатой обработки наполнителя на свойства древесно-полимерного композита. *Аграрный научный журнал*. 2024;(6):88–98. <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i6pp88-98>
4. Eder A., Carus M. Global Trends in Wood-Plastic Composites. *Bioplastics Magazine*. 2014;(8):16–17. URL: https://www.researchgate.net/publication/284779431_Global_trends_in_wood-plastic_composites (дата обращения: 09.03.2025).
5. Аникеева К.Г., Кайнов П.А., Сафин Р.Р., Петров В.И. Влияние физико-химической модификации древесного наполнителя на механические свойства биоразлагаемого древесно-полимерного композита. *Деревообрабатывающая промышленность*. 2024;(3):62–67. URL: https://dop1952.ru/catalogue-statue_id-577.html (дата обращения: 15.04.2025).
6. Rabbi M.S., Islam T., Islam G.M.S. Injection-Molded Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites – a Review. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2021;16(15). <https://doi.org/10.1186/s40712-021-00139-1>
7. Akter M., Uddin M.H., Anik H.R. Plant Fiber-Reinforced Polymer Composites: a Review on Modification, Fabrication, Properties, and Applications. *Polymer Bulletin*. 2024;(81):1–85. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04733-5>
8. Khan S.H., Rahman Md.Z., Haque M.R., Hoque Md.E. Characterization and Comparative Evaluation of Structural, Chemical, Thermal, Mechanical, and Morphological Properties of Plant Fibers. *Annual Plant: Sources of Fibres, Nanocellulose and Cellulosic Derivatives*. 2023:1–45. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2473-8_1
9. Li M., Pu Y., Thomas V.M., Yoo C.G., Ozcan S., Deng Y. и др. Recent Advancements of Plant-Based Natural Fiber – Reinforced Composites and Their Applications. *Composites Part B: Engineering*. 2020;(200). Article no. 108254. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108254>
10. Akter M., Uddin M.H., Tania I.S. Biocomposites Based on Natural Fibers and Polymers: a Review on Properties and Potential Applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2022;41(17–18):705–42. <https://doi.org/10.1177/07316844211070609>
11. More A.P. Flax Fiber-Based Polymer Composites: a Review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2022;(5):1–20. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00246-9>
12. Mahmud S., Hasan K.F., Jahid M.A., Mohiuddin K., Zhang R., Zhu J. Comprehensive Review on Plant Fiber-Reinforced Polymeric Biocomposites. *Journal of Materials Science*. 2021;(56):7231–7264. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05774-9>
13. Sathishkumar G.K., Ibrahim M., Mohamed A.M., Rajkumar G., Gopinath B., Karpagam R. и др. Synthesis and Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Epoxy/Polyester/Polypropylene Composites: a Review. *Journal of Natural Fibers*. 2022;19(10):3718–3741. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848723>
14. Das P.P., Chaudhary V., Ahmad F., Manral A., Gupta S., Gupta P. Acoustic Performance of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites: Influencing Factors, Future Scope, Challenges, and Applications. *Polymer Composites*. 2022;43(3):1221–1237. <https://doi.org/10.1002/pc.26455>
15. Laycock B., Pratt S., Halley P. A Perspective on Biodegradable Polymer Biocomposites – from Processing to Degradation. *Functional Composite Materials*. 2023;4(10). <https://doi.org/10.1186/s42252-023-00048-w>
16. Islam M.Z., Sarker M.E., Rahman M.M., Islam M.R., Ahmed A.F., Mahmud M.S. и др. Green Composites From Natural Fibers And Biopolymers: A Review on Processing, Properties,

- and Applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2022;41(13–14):526–557. <https://doi.org/10.1177/07316844211058708>
17. Kuram E. Advances in Development of Green Composites Based on Natural Fibers: a Review. *Emergent Materials*. 2022;(5):811–831. <https://doi.org/10.1007/s42247-021-00279-2>
 18. Andrew J.J., Dhakal H.N. Sustainable Biobased Composites for Advanced Applications: Recent Trends and Future Opportunities – a Critical Review. *Composites Part C: Open Access*. 2022;(7). Article no. 100220. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100220>
 19. Чернышева А.В., Шкуро А.Е., Кривоногов П.С., Артемов А.В. Исследование возможности химической сшивки древесно-полимерных композитов. *Вестник Технологического университета*. 2019;22(8):99–101. <https://www.elibrary.ru/xssoeb>
 20. Anikeeva K.G., Safin R.R. Evaluation of Properties of Biodegradable Wood-Polymer Composite Based on Ozonized Wood Filler And Polyhydroxybutyrate for Application in Agricultural Industry. *E3S Web of Conferences*. 2024;539. Article no. 02031. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453902031>

REFERENCES

1. Esteves B., Pereira H. Wood Modification by Heat Treatment: A Review. *BioResources*. 2008;(4):370–404. <https://doi.org/10.15376/biores.4.1.370-404>
2. Safullina A., Safin R., Mukhametzhanov S., Sabirova G., Shaikhutdinova A. Ozone Processing as a Method for Increasing Adhesive Properties of Wood. In: 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference Proceedings SGEM: STEF92 Technology. 2020. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/6.1/s26.053>
3. Anikeeva K.G., Safin R.R. The Effect of Two-Stage Filler Processing on the Properties of a Wood-Polymer Composite. *Agrarian Scientific Journal*. 2024;(6):88–98. (In Russ., abstract in Eng.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i6pp88-98>
4. Eder A., Carus M. Global Trends in Wood-Plastic Composites. *Bioplastics Magazine*. 2014;(8):16–17. Available at: https://www.researchgate.net/publication/284779431_Global_trends_in_wood-plastic_composites (accessed 09.03.2025).
5. Anikeeva K.G., Kainov P.A., Safin R.R., Petrov V.I. Effect of Physico-Chemical Modification of Wood Filler on the Mechanical Properties of Biodegradable Wood-Polymer Composite. *Derevoobrabativalnaya promishlennost*. 2024;(3):62–67. (In Russ., abstract in Eng.) Available at: https://dop1952.ru/catalogue-statue_id-577.html (accessed 15.04.2025).
6. Rabbi M.S., Islam T., Islam G.M.S. Injection-Molded Natural Fiber-Reinforced Polymer Composites – a Review. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2021;16(15). <https://doi.org/10.1186/s40712-021-00139-1>
7. Akter M., Uddin M.H., Anik H.R. Plant Fiber-Reinforced Polymer Composites: a Review on Modification, Fabrication, Properties, and Applications. *Polymer Bulletin*. 2024;(81):1–85. <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04733-5>
8. Khan S.H., Rahman Md.Z., Haque M.R., Hoque Md.E. Characterization and Comparative Evaluation of Structural, Chemical, Thermal, Mechanical, and Morphological Properties of Plant Fibers. *Annual Plant: Sources of Fibres, Nanocellulose and Cellulosic Derivatives*. 2023:1–45. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2473-8_1
9. Li M., Pu Y., Thomas V.M., Yoo C.G., Ozcan S., Deng Y., et al. Recent Advancements of Plant-Based Natural Fiber – Reinforced Composites and Their Applications. *Composites Part B: Engineering*. 2020;(200). Article no. 108254. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108254>
10. Akter M., Uddin M.H., Tania I.S. Biocomposites Based on Natural Fibers and Polymers: a Review on Properties and Potential Applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2022;41(17–18):705–42. <https://doi.org/10.1177/07316844211070609>
11. More A.P. Flax Fiber–Based Polymer Composites: a Review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2022;(5):1–20. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00246-9>
12. Mahmud S., Hasan K.F., Jahid M.A., Mohiuddin K., Zhang R., Zhu J. Comprehensive Review on Plant Fiber-Reinforced Polymeric Biocomposites. *Journal of Materials Science*. 2021;(56):7231–7264. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05774-9>

13. Sathishkumar G.K., Ibrahim M., Mohamed A.M., Rajkumar G., Gopinath B., Karpagam R., et al. Synthesis and Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Epoxy/Polyester/Polypropylene Composites: a Review. *Journal of Natural Fibers*. 2022;19(10):3718–3741. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1848723>
14. Das P.P., Chaudhary V., Ahmad F., Manral A., Gupta S., Gupta P. Acoustic Performance of Natural Fiber Reinforced Polymer Composites: Influencing Factors, Future Scope, Challenges, and Applications. *Polymer Composites*. 2022;43(3):1221–1237. <https://doi.org/10.1002/pc.26455>
15. Laycock B., Pratt S., Halley P. A Perspective on Biodegradable Polymer Biocomposites – from Processing to Degradation. *Functional Composite Materials*. 2023;4(10). <https://doi.org/10.1186/s42252-023-00048-w>
16. Islam M.Z., Sarker M.E., Rahman M.M., Islam M.R., Ahmed A.F., Mahmud M.S., et al. Green Composites From Natural Fibers And Biopolymers: A Review on Processing, Properties, and Applications. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2022;41(13–14):526–557. <https://doi.org/10.1177/07316844211058708>
17. Kuram E. Advances in Development of Green Composites Based on Natural Fibers: a Review. *Emergent Materials*. 2022;(5):811–831. <https://doi.org/10.1007/s42247-021-00279-2>
18. Andrew J.J., Dhakal H.N. Sustainable Biobased Composites for Advanced Applications: Recent Trends and Future Opportunities – a Critical Review. *Composites Part C: Open Access*. 2022;(7). Article no. 100220. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100220>
19. Chernysheva A.V., Shkuro A.E., Krivonogov P.S., Artyomov A.V. Investigating the Possibility to Chemically Cross-Link Wood-Polymer Composites. *Herald of Technological University*. 2019;22(8):99–101. (In Russ., abstract in Eng.) <https://www.elibrary.ru/xssoeb>
20. Anikeeva K.G., Safin R.R. Evaluation of Properties of Biodegradable Wood-Polymer Composite Based on Ozonized Wood Filler And Polyhydroxybutyrate for Application in Agricultural Industry. *E3S Web of Conferences*. 2024;539. Article no. 02031. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202453902031>

Об авторах:

Аникеева Ксения Геннадьевна, аспирант, ассистент кафедры архитектуры и дизайна изделий из древесины Казанского национального исследовательского технологического университета (420015, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5128-0946>, Scopus ID: 59187925100, Researcher ID: NRB-5416-2025, doomksen@mail.ru

Сафин Руслан Рушанович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой архитектуры и дизайна изделий из древесины Казанского национального исследовательского технологического университета, (420015, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>, Scopus ID: 7003561160, Researcher ID: O-9355-2015, cfaby@mail.ru

Вклад авторов:

К. Г. Аникеева – применение статистических, математических, вычислительных или других формальных методов для анализа или синтеза данных исследования, осуществление научно-исследовательского процесса, включая выполнение экспериментов или сбор данных, критический анализ полученных результатов.

Р. Р. Сафин – контроль, лидерство и наставничество в процессе планирования и проведения исследования, формулирование замысла, идеи исследования, целей и задач.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

*Поступила в редакцию 29.09.2025; поступила после рецензирования 06.11.2025;
принята к публикации 16.12.2025*

About the authors:

Ksenia G. Anikeeva, Post-Graduate Student, assistant of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University (68 Karl Marx St., Kazan 420015, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5128-0946>, Scopus ID: 59187925100, Researcher ID: NRB-5416-2025, doomksen@mail.ru

Ruslan R. Safin, Dr.Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University (68 Karl Marx St., Kazan 420015, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>, Scopus ID: 7003561160, Researcher ID: O-9355-2015, cfaby@mail.ru

Authors contribution:

K. G. Anikeeva – applying statistical, mathematical, computational or other formal techniques to analyze or synthesize the study data, conducting studies, specifically carrying experiments and collecting data; critical analysis of the obtained results.

R. R. Safin – control, leadership and mentoring in the process of planning and conducting the study; formulating the idea, aims and objectives of the study.

All authors have read and approved the final manuscript.

Submitted 29.09.2025; revised 06.11.2025; accepted 16.12.2025