

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/14>

УДК 674-419.32



## Модифицированная многостенными углеродными нанотрубками и ультразвуком карбамидоформальдегидная смола: преимущества использования для производства магнитообработанной композитной фанеры

Екатерина В. Ющенко<sup>1</sup> ✉, [katerina.vgltu@yandex.ru](mailto:katerina.vgltu@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4827-2756>

Лариса И. Бельчинская<sup>1</sup>, [belbom@mail.ru](mailto:belbom@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3921-8018>

Константин В. Жужукин<sup>1</sup>, [kinkon18@yandex.ru](mailto:kinkon18@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7093-3274>

Дмитрий А. Жукалин<sup>2</sup>, [d.zhukalin@mail.ru](mailto:d.zhukalin@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0754-4989>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская пл., 1, г. Воронеж, 394018, Российская Федерация

Исследована роль многостенных углеродных нанотрубок в качестве модификатора карбамидоформальдегидного связующего для производства нанокompозитной фанеры. Углеродные нанотрубки вводили в связующее в количестве 0,5 мас.%, 1,25 мас.% и 2 мас.%. Максимальный эффект установлен при содержании 1,25 мас.% модификатора в смоле: предел прочности при статическом изгибе для модифицированной фанеры относительно немодифицированной возрастает на 58,1% (с 34,57 до 54,64),  $p < 0,05$ , предел прочности при скалывании по клеевому слою – на 80,3% (с 0,66 до 1,19),  $p < 0,05$ . Экологичность наномодифицированной композитной фанеры оценивалась по изменению содержания в ней токсичного формальдегида: снижение массовой доли свободного формальдегида в модифицированной фанере составило 59,9% (с 19,86 до 7,95),  $p < 0,05$ , относительно немодифицированной. Термогравиметрически установлена более высокая термостабильность модифицированного образца фанеры, деструкция которого происходит при более высокой температуре – 238 °С сравнительно с немодифицированной – 200 °С. В технологию получения нанокompозитной фанеры для активации связующего и фанеры включена обработка связующего – в ультразвуковом и фанеры в магнитном импульсном поле. Таким образом установлена роль многостенных углеродных нанотрубок для получения более качественной нанокompозитной фанеры.

**Ключевые слова:** модификация, композитная фанера, многостенные углеродные нанотрубки, импульсное магнитное поле, ультразвуковое поле

**Финансирование:** данное исследование не получало внешнего финансирования.

**Благодарности:** автор благодарит рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

**Конфликт интересов:** автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Модифицированная многостенными углеродными нанотрубками и ультразвуком карбамидоформальдегидная смола: преимущества использования для производства магнитообработанной композитной фанеры / Е. В. Ющенко, Л. И. Бельчинская, К. В. Жужукин, Д. А. Жукалин // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 3 (55). – С. 238–259. – Библиогр.: с. 252–258 (51 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/14>.

Поступила 26.08.2024. Пересмотрена 05.09.2024. Принята 10.09.2024. Опубликовано онлайн 11.11.2024.

Article

**Multi-walled carbon nanotubes and ultrasound modified urea-formaldehyde resins: advantages of using for the production of magnetically processed composite plywood**

Ekaterina V. Yushchenko<sup>1</sup> ✉, katerina.vgltu@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-4827-2756>

Larisa I. Belchinskaya<sup>1</sup>, belbom@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0003-3921-8018>

Konstantin V. Zhuzhukin<sup>1</sup>, kinkon18@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-7093-3274>

Dmitrii A. Zhukalin<sup>2</sup>, d.zhukalin@mail.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-0754-4989>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation

<sup>2</sup>Voronezh State University, University s. 1, Voronezh city, 394018, Russian Federation

**Abstract**

The role of multi-walled carbon nanotubes as a urea-formaldehyde binder modifier for the production of nanocomposite plywood has been investigated. Carbon nanotubes were introduced into the binder in an amount of 0.5 wt.%, 1.25 wt.% and 2 wt.%. The maximum effect is set at a content of 1.25 wt.% of the modifier in the resin: the tensile strength under static bending for modified plywood relative to unmodified increases by 58.1% (from 34.57 to 54.64),  $p < 0.05$ , the tensile strength when chipping along the adhesive layer – by 80.3% (from 0.66 to 1.19),  $p < 0.05$ . The environmental friendliness of nanomodified composite plywood was assessed by changes in the content of toxic formaldehyde in it: a decrease in the mass fraction of free formaldehyde in modified plywood was 59.9% (from 19.86 to 7.95),  $p < 0.05$ , relative to unmodified. Thermogravimetrically, a higher thermal stability of the modified plywood sample was established, the destruction of which occurs at a higher temperature – 238 °C compared to the unmodified – 200 °C. The technology for producing nanocomposite plywood for activating the binder and plywood includes the processing of the binder – in an ultrasonic and plywood in a magnetic pulsed field. Thus, the role of multi-walled carbon nanotubes for obtaining higher-quality nanocomposite plywood has been established.

**Keywords:** *modification, composite plywood, multi-walled carbon nanotubes, pulsed magnetic field, ultrasonic field*

**Funding:** this research received no external funding.

**Acknowledgments:** author thank the reviewers for their contribution to the peer review.

**Conflict of interest:** the author declares no conflict of interest.

**For citation:** Yushchenko E.V., Belchinskaya L.I., Zhuzhukin K.V., Zhukalin D.A. (2024). Multi-walled carbon nanotubes and ultrasound modified urea-formaldehyde resins: advantages of using for the production of magnetically processed composite plywood. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 3 (55), pp. 238-259 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/14>.

*Received* 26.08.2024. *Revised* 05.09.2024. *Accepted* 10.09.2024. *Published online* 11.11.2024.

**Введение**

Древесина является одним из наиболее распространенных возобновляемых и устойчивых биоматериалом и широко используется в качестве сы-

рья для производства древесных полимерных конструкционных материалов (ДПКМ). Благодаря улучшенным свойствам и функциональности, по данным O.S.I Fayomi и др. (2021) [1], ДПКМ находят широкое применение в качестве конструкционного

материала в различных отраслях промышленного производства.

В работе А.В. Чуркиной (2019) [2] фанера рассматривается как один из наиболее распространенных видов конструкционного материала. Она используется в различных отраслях народного хозяйства, способствуя повышению технологичности производства и экономии сырья: 1 м<sup>2</sup> фанеры заменяет до 10 м<sup>2</sup> лесоматериалов. По данным И.Н. Назаренко и М.В. Назаренко (2022) [3] в связи с особенностями состава лесов в России наибольшее распространение получило производство берёзовой фанеры. Стоит отметить, что берёзовый шпон характерен высокой устойчивостью к влаге и максимальными показателями прочности при сжатии и изгибе. Согласно Л. В. Пономаренко и др. (2023) [4], а также А.Н. Чубинскому и др. [5], березовая фанера – одна из наиболее востребованных на мировом рынке, ее экспорт оценивается примерно 60 % от произведённой в России.

По данным А. Wagenführ и др. (2023) [6], Keresa Defa Ayana и др. (2024) [7], а также Erik Jungstedt и др. (2024) [8] значительное преимущество композита перед натуральной древесиной заключается в легкости обработки ДПКМ, отсутствии анизотропии, возможности адаптации ДПКМ к требуемым условиям эксплуатации на этапе производства по механическим, физическим, экологическим и др. параметрам. Однако, в современных условиях, на рынке строительных материалов появляются древесные композиции, физико-механические характеристики которых превышают эксплуатационные возможности фанеры. Для повышения конкурентной способности фанеры необходимо комплексное улучшение её эксплуатационных характеристик. В этом случае, как утверждают Ali Dorieh и др. (2022) [9], Е.В. Кантиева и др. (2022) [10], обращаются к наноматериалам.

Свойства наночастиц заметно отличаются от свойств более крупных частиц того же вещества. Поскольку типичный диаметр атома составляет от 0,15 до 0,6 нм, большая часть материала наночастицы находится в пределах нескольких атомных диаметров ее поверхности. Следовательно, свойства этого поверхностного слоя могут домини-

ровать над свойствами основного материала. Наиболее характерные свойства наноразмерных дисперсных систем определяются поверхностными явлениями. Особенности наноразмерных объектов связаны с уменьшением размеров частиц твердого вещества ниже некоторого порога, что приводит к значительному изменению их свойств отмечают Ibrahim Khan и др. (2019) [11]. Граничный размер частиц, при котором происходит скачкообразное изменение свойств вещества варьируется в диапазоне 1 – 100 нм и носит название «размерный эффект». Молекулы, атомы или ионы, находящиеся на поверхности раздела, обладают избыточной поверхностной энергией по сравнению с такими же элементами системы в её объеме. Электронные эффекты определяют высокую химическую активность наночастиц, т. к. большое количество атомов на поверхности даёт возможность перекрытия электронных плотностей, т. е. образования химической связи. Доля этой поверхностной энергии в общей энергии системы тем больше, чем меньше размер частиц, т.е. больше дисперсность вещества. Этот эффект особенно выражен для наночастиц, диспергированных в матрице полимера. María Alejandra Macías-Silva и др. (2024) [12] подчеркивают особые свойства наноматериалов, которые обуславливаются повышенной удельной поверхностью, ускоряющей взаимодействие между ними и средой, в которую они помещены.

Разработка конструкций из экологически чистых и прочных древесных наноматериалов является актуальной, перспективной и не простой задачей. Необходимы новые решения, к которым относятся, например, добавление функциональных неорганических наночастиц в связующее при производстве фанеры.

Свойства получаемой фанеры во многом определяет тип связующего, используемого для её производства. Карбамидоформальдегидная смола (КФС), благодаря доступности, низкой стоимости и бесцветному клеевому слою, наиболее широко используется в производстве древесных композиционных материалов отмечают G. Xu и др. (2021) [13]. По данным Ali Dorieh и др. (2022) [9] в мировом производстве более восьмидесяти процентов древесных

композитов получают с использованием КФС. Однако этот тип смол обладает токсичностью из-за содержания свободного формальдегида, аргументирует N. T. Subasi (2020) [14], что является, по данным S. Gao и др. (2020) [15], существенным ограничением применения композитов на основе КФС.

Наиболее часто для получения композита с требуемыми улучшенными характеристиками прибегают к модификации связующего: замене КФС альтернативными смолами, например, аминсолой Yifan Xu и др. (2024) [16], смолами на основе лигнина Hamed Younesi-Kordkheili, Antonio Pizzi (2023) [17] или белка, натурального каучука, карбоновой кислоты и т.д. M. Hazwan Hussin и др. (2022) [18]. А также применению органических наполнителей: отходов сельскохозяйственных производств Anurag Wahane и др. (2023) [19], волокон конопли Ramesh Karri (2022) [20], скорлупы камелии масличной в сочетании с пальмовядровой мукой Zhengyong Yang и др. (2024) [21]; или неорганических, таких, как цеолита Ayfer Dönmez Çavdar (2020) [22], сепиолита X. Li и др. (2019) [23], модифицированного силановым связующим гидроксипатита Wenyu Zheng и др. (2024) [24], продуктов сульфитно-целлюлозного производства Д.С. Русаков и др. (2019) [25]. Однако, как правило, эти меры имеют одностороннюю направленность: способствуют улучшению либо физико-механических характеристик, либо экологических показателей.

Для комплексного повышения качества фанеры по нескольким параметрам необходимы новые эффективные решения. Как утверждают Furqan Choudhary и др. (2024) [26], в последнее время наночастицы вызывают большой интерес при использовании их в промышленном производстве в качестве модификатора. М. Лишних (2022) [27] отмечает: существенно малое количество нанонаполнителя в составе композиционного материала (КМ) достаточно для получения материала, обладающего новыми функциональными свойствами. Физико-химические явления в системах с наноразмерными объектами и в самих нанобъектах характеризуются специфическими особенностями: наноразмерные частицы наполнителя влияют на свойства полимерной матрицы (в частности, способствуют ее структурированию), а, следовательно, на свойства полимерного

нанокпозиционного материала, что отражено в нашей предыдущей работе Е.В. Ющенко и др. (2024) [28], а также подтверждается G.L. Devnani и Shishir Sinha (2022) [29].

Однако низкая межфазная прочность между молекулами нанонаполнителя и полимерными цепочками связующего приводит к плохой диспергируемости наночастиц. Улучшение реакционной способности компонентов полимерной системы зависит от способа распределения наночастиц по матрице, приводящее к более интенсивному межфазному взаимодействию нанонаполнителя со смолой и древесиной, а также общей однородности композита Zahed Ahmadi (2019) [30] и Minjin Cai и др. (2024) [31]. Для эффективного диспергирования используются различные методы перемешивания: механическое S. Iftikhar и др. (2023) [32], перемешивание с высоким уровнем сдвига Nanjun Chen и др. (2023) [33], ультразвуковое перемешивание А.Е. Kolosov и др. (2019) [34], S.A. Mirsalehi и др. (2021) [35]. Однако, более высокий результат достигается при воздействии на комплексное связующее ультразвуковым полем, а дополнительное улучшение свойств композиционного материала – воздействием на него импульсным магнитным полем подтверждают Е.В. Ющенко (2024) [36], В.А. Шамаев и др. (2021) [37].

Известны примеры использования наномодификаторов смол в производстве ДПКМ, например, нанокристаллической целлюлозы Hossein Khanjanzadeh и др. (2019) [38] и Ющенко Е.В. (2024) [36], наноглины Eko Setio Wibowo (2020) [39], оксида алюминия Pedro Henrique Gonzalez de Cademartori и др. (2019) [40].

Особый интерес к получению ДПКМ с высокими механическими характеристиками и экологическими показателями вызывают углеродные нанотрубки (УНТ), т.к., с одной стороны, данный наномодификатор обладает выраженным армирующим свойством, благодаря малому весу и высокому модулю упругости, и в составе композита способствует укреплению матрицы полимера, а также регуляции механической прочности и жесткости КМ отмечают O.S.I Fayomi и др. (2021) [2] и S. Daud (2023) [41]. С другой стороны, по данным W. Gul и др. (2021) [42], взаимодействие УНТ с компонентами композита

способно привести к снижению эмиссии формальдегида. В соответствии с данными D. Łukawski и др. (2023) [43] исследования в области производства древесных композитов показали, что углеродные наноматериалы, интегрированные в ДПКМ, способны улучшать свойства композитов.

Одним из видов УНТ являются многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ), состоящие из нескольких слоев графена и имеющие протяженную структуру (полые цилиндры). Диаметры МУНТ составляют 20—200 нм (обычно 50—60 нм), длина варьируется от одного микрометра до нескольких сантиметров приводят данные в работе Е.В. Ющенко и К.В. Жужукин (2023) [44]. Важным фактором, влияющим на механические характеристики композитов, является возможность передачи нагрузки от матрицы к МУНТ. По данным Hessameddin Yaghoobi и Abdolhossein Fereidoon (2019) [45] поверхность МУНТ обычно гладкая, поэтому при добавлении их в полимерные композиции наблюдается низкая адгезия модификатора к подложке. В случае незначительной адгезии между МУНТ и матрицей, последняя будет недостаточно прочной по отношению к высоким нагрузкам, и прочностные преимущества МУНТ, как наномодификатора, утрачиваются. Для улучшения межфазного взаимодействия прибегают к обработке поверхности МУНТ (функционализации), что приводит к образованию на поверхности МУНТ кислородсодержащих групп, которые могут реагировать с полимером, т.е. происходит повышение реакционной способности поверхности нанонаполнителя отмечают E. Abohamzeh и др. (2022) [46] и S. Salehi и др. (2021) [47].

Известны работы, отражающие влияние функционализированных МУНТ (ф-МУНТ) на механические, термические и экологические характеристики КМ. Например, в работе В. Kord и др. (2021) [48] отмечается положительное влияние ф-МУНТ на прочностные характеристики модифицированного композита, увеличение прочности составило от 11,4% до 15,6% в зависимости от исследуемого параметра при добавлении модификатора в количестве 1 мас.%. М. Farsi и др. (2024) [49] рассмотрено использование МУНТ и ф-МУНТ в качестве модификатора при получении ДПКМ, где отмечается, что

наиболее эффективным является модификация связующего 2 мас.% наномодификатора в обоих случаях. Ali Dorieh и др. (2022) [9] подчеркивает значительное влияние 3,5 мас.% ф-МУНТ на механические характеристики наномодифицированных плит МДФ. О положительном влиянии ф-МУНТ на свойства МДФ свидетельствуют W. Gul и др. (2021) [42]: при введении в связующее 5 мас.% наномодификатора наблюдается увеличение предела прочности при скалывании по клеевому слою на 24,15%, модуля упругости – на 30,2%, предела прочности при изгибе – на 28,3%, снижение эмиссии формальдегида на 59,4%. Положительное влияние МУНТ на свойства композита отмечают S.A. Mirsalehi и др. (2021) [35]: введение в смолу 1 мас.% МУНТ позволило увеличить предел прочности КМ при изгибе на 15%. Важно отметить, что в данном случае диспергирование МУНТ по матрице достигалось механически и ультразвуковым воздействием без дополнительной химической обработки наномодификатора.

Однако, функционализация МУНТ требует значительных экономических затрат и наличия вспомогательных трудовых ресурсов, а также включение в технологический процесс дополнительных операций, что влечет за собой увеличение продолжительности производства фанеры и повышение себестоимости продукции. Также незначительное упоминание в литературных данных о влиянии МУНТ на экологические показатели древесных композитов и применении нефункционализированных МУНТ в производстве ДПКМ не позволяют в полной мере оценить их влияние на свойства получаемых композитных материалов.

Таким образом, целью работы является исследование прочностных, термогравиметрических и экологических показателей клея на основе карбамидоформальдегидной смолы марка КФЖ, модифицированного нефункционализированными МУНТ при дополнительной обработке клея ультразвуком и фанеры в импульсном магнитном поле.

### Материалы и методы

#### *Объект и предмет исследований*

Объектом исследования является связующее на основе КФС, модифицированное многослойными углеродными нанотрубками, и фанера марки ФК, изготовленная из шпона березы (*Betula pendula* L.).

В реализации эксперимента использовали образцы модифицированного и немодифицированного связующего, а также фанеру на их основе.

Предмет исследования – многостенные углеродные нанотрубки в качестве модифицирующей добавки к связующему в виде смолы КФ-Ж и установление влияния наноуглеродного наполнителя на прочность, термоустойчивость и экологические показатели клея и фанеры марки ФК.

*Дизайн эксперимента*

Дизайн эксперимента основан на методике, отраженной в работе Е.В. Ющенко и др. (2024) [28], включающей введение нанонаполнителя в карбамидоформальдегидную смолу, обработку полученной клеевой композиции в ультразвуковом поле и производство на ее основе методом горячего прессования фанерного нанокompозита с последующей его обработкой в импульсном магнитном поле.

В качестве сырья для производства трехслойной фанеры использовали лущеный шпон березы (*Betula pendula* L.), произведенный ООО «ГаличЛес» (г. Галич, Россия); смолу КФС марки КФ-Ж (ПАО «Уралхимпласт», г. Н.Тагил, Россия); МУНТ (Nanocyl Technology, Sambreville, Belgium), хлористый аммоний (ООО «Компонент-Реактив», г. Москва, Россия). Шпон лущеный имел следующие характеристики: размер листа 500×500×4 мм с предельным отклонением по толщине ±0,1 мм, влажность 6±2%, без видимых дефектов.

Характеристика многостенных углеродных нанотрубок, используемых в эксперименте, представлена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика многостенных углеродных нанотрубок

Table 1

Characteristics of multi-walled carbon nanotubes

Параметр   Parameter	Величина   Value
Средний диаметр, нм   Average Diameter, nm	9,5
Средняя длина, мкм   Average Length, μm	1,5
Чистота углерода, %   Carbon Purity, %	90

Оксид металла, %   Metal Oxide, %	10
Площадь удельной поверхности, м <sup>2</sup> /г   Surface Area, m <sup>2</sup> /g	250-300

Источник: <https://www.nanocyl.com/product/nc7000/>

Source: <https://www.nanocyl.com/product/nc7000/>

Характеристика смолы КФ-Ж соответствовала ГОСТ 14231–88, хлористого аммония – ГОСТ 3773–72. Количество связующего рассчитывалось из расхода 155 г/м<sup>2</sup>.

Суспензию МУНТ в водном растворе ПАВ получали методом ультразвукового диспергирования при постоянном охлаждении в течение 30 минут на ультразвуковом диспергаторе УЗД-0,1/22 мощностью 100 Вт, частотой 22 кГц. Концентрация дисперсной фазы в суспензии составляла 4,5%.

Для получения клеевой композиции КФС/МУНТ компоненты механически смешивали в течении 10 минут с добавлением следующих концентраций МУНТ: 0,5 мас.%; 1,25 мас.%; 2,0 мас.%. Ультразвуковое диспергирование клеевой композиции в системе смола – наполнитель осуществляли при постоянном охлаждении в течение 3 минут в ультразвуковой установке УЗК 1,3 частотой 24 кГц, мощностью 80 Вт. Охлаждение проводилось на водяной бане до температуры 20°C во избежание полимеризации клеевой композиции. Отвердитель добавляли в количестве 1 мас.%.

В лабораторных условиях связующее наносили на шпон ручным способом: на одну сторону листов шпона, используемых для наружных слоев, и на обе поверхности шпона для среднего слоя. Шпон укладывали в стопу под прямым углом, направление волокон в каждом последующем слое было перпендикулярно относительно предыдущего.

Для горячего прессования использовали гидравлический пресс ПД476 с обогреваемыми плитами (усилие 160 тнс, производство ОАО «Гидропресс», г. Оренбург, Россия). Параметры прессования фанеры зависят от породы древесины шпона, применяемой смолы и толщины пакета. Для проведения эксперимента определены параметры прессования: температура 115 °С, время 8,3 мин., давление

прессования 2 МПа. После прессования и извлечения фанеры из пресса для завершения реакции полимеризации плиты 24 часа выдерживали при комнатной температуре и влажности  $65\pm 5\%$ , далее плиты торцевались и кроились на заготовки для проведения физико-механических испытаний (образцы отбирали по ГОСТ 9620–94). Затем образцы фанеры в течение одной минуты обрабатывали импульсным магнитным полем (ИМП) сериями симметричных однополярных импульсов треугольной формы длительностью 10 мкс, частотой следования 100 Гц, и амплитудой 0,3 Тл. Образцы в соленоиде располагались таким образом, чтобы волокна древесины наружных слоев шпона были ориентированы параллельно силовым линиям поля. Так как используемая катушка имела длину 100 мм, образец перемещался внутри катушки на 100 мм с интервалом в одну минуту. Обработку проводили при комнатной температуре. Согласно Е.В. Ющенко и др. (2024) [28] воздействие ИМП на ДПКМ приводит к активации системы «модифицированное связующее – шпон» и является причиной более интенсивного взаимодействия на межфазной границе активных функциональных групп клея и фанеры.

Методом ИК-спектроскопического анализа определялась возможность сохранения функциональных групп компонентов комплексного связующего в модифицированном клее. ИК-спектроскопический анализ смолы КФ-Ж, наполнителя МУНТ и клеевой смеси МУНТ с КФ-Ж проводили на спектрометре VERTEX 70 (Bruker, Германия) с преобразованием Фурье методом нарушенного полного внутреннего отражения с использованием алмазной призмы в диапазоне частот от  $400\text{--}4000\text{ см}^{-1}$  с разрешением  $2\text{ см}^{-1}$  в режиме передачи.

Исследовали физико-механические и экологические показатели фанеры: предел прочности при статическом изгибе по ГОСТ 9625—2013, предел прочности при скалывании по клеевому слою по ГОСТ 9624–2009, термоустойчивость фанеры и эмиссию формальдегида из фанеры. Механические характеристики фанеры устанавливали на испытательной машине марки УМ-5А с максимальным разрушающим усилием до 5000 Н (500 кгс) по ГОСТ 28840-90.

Испытание на определение предела прочности при статическом изгибе проводили на шести образцах: три образца располагали верхней пластью вниз и три – верхней пластью вверх. За результат испытания принимали среднее арифметическое показателей по испытаниям шести образцов.

Определение предела прочности при скалывании по клеевому слою осуществляли на 10 образцах. Перед испытанием образцы выдерживали в воде в течение 24 ч при комнатной температуре. За результат предела прочности при скалывании по клеевому слою принимали средний показатель по всем полученным значениям.

Проводили термогравиметрический анализ смолы и фанеры в газообразном азоте на анализаторе (Netzsch STA449F3, Германия) при скорости нагрева 10 К/мин до температуры 1000 °С в соответствии с Zhuzhukin К. и др. (2024) [50]. Данный метод анализа позволяет оценить термическую стабильность, а также изменение тепловых эффектов в процессе деструкции, что важно при использовании композиционной фанеры в качестве конструкционного материала.

Экологичность фанеры оценивали по степени эмиссии формальдегида из плит. Класс эмиссии фанеры определяли в соответствии с ГОСТ 3916.1 – 2018. Использовали наиболее распространенный на практике метод WKI, чувствительность метода составляет 0,005 мг/мл раствора. Содержание свободного формальдегида в фанере определяли йодометрическим способом. В качестве контрольного образца использовали фанеру без наномодификатора, полученную стандартным методом.

Морфологию клеевого слоя исследовали с применением инвертированного тринокулярного флуоресцентного просвечивающего микроскопа Zeiss AxioVert.A1 (Китай). С целью получения более качественных микрофотографий образцов фанеры для контраста был применен инертный индикатор.

### *- Анализ данных*

Полученные прочностные, термостабильные и экологические свойств клея и фанеры анализировали статистически с использованием R. Сравнение показателей проводилось с помощью теста Стьюдента с уровнем значимости 0,05.

Результаты

На рис. 1 Отображены три ИК-спектра: МУНТ, КФС марки КФ-Ж и связующего на их основе.

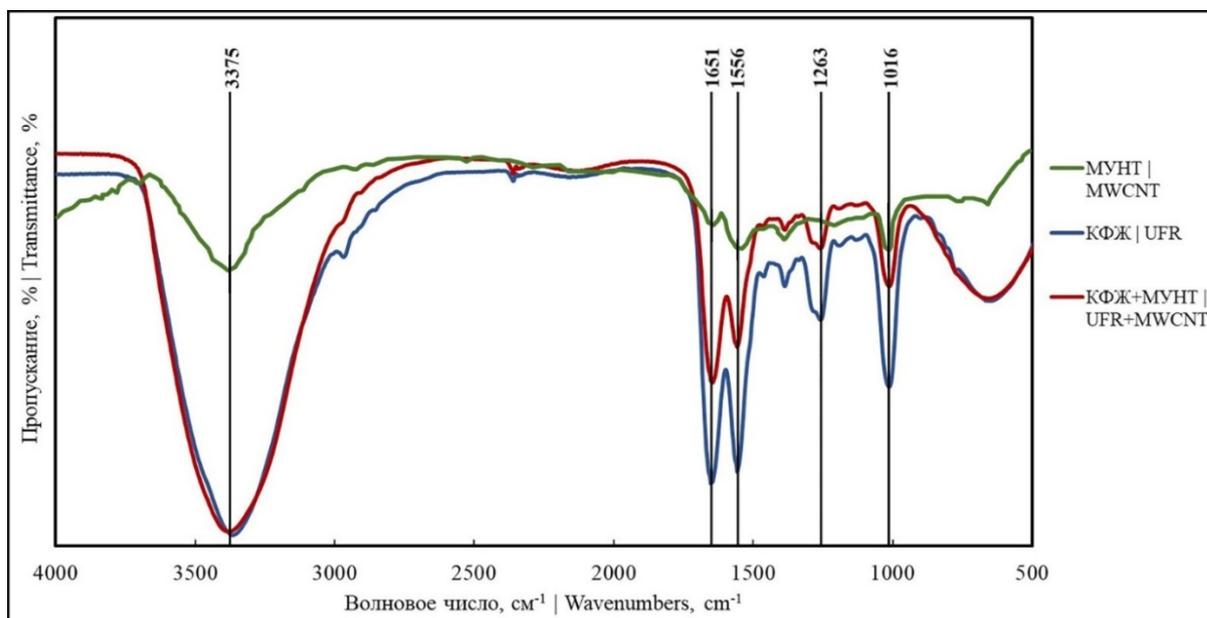


Рисунок 1. Результаты ИК-спектроскопического анализа нанонаполнителя МУНТ, КФС и клея на их основе

Figure 1. The results of IR spectroscopic analysis of the MWCNT nanofillers, UFR and glue based on them

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

ИК-спектр КФС характеризуется наличием широкой полосы поглощения в области 3300-3700 см<sup>-1</sup>, которая соответствует валентным колебаниям гидроксильных групп (-ОН), связанных с существующими водородными связями смолы. В диапазоне 3100 – 3000 см<sup>-1</sup> находится полоса поглощения валентных колебаний ароматических СН-связей, которая может накладываться на широкую полосу валентных колебаний ОН-групп, вовлечённых в водородную связь. Полосы поглощения в интервале длин волн 1800-1400 см<sup>-1</sup> характеризует различные валентные колебания групп с кратными связями: С=О, С=C, С<sub>Аг</sub>-С<sub>Аг</sub>. В этом же интервале находятся полосы поглощения деформационных дельта колебаний С-Н связей и других групп. Интенсивные сигналы полос при 1651 см<sup>-1</sup> и 1556 см<sup>-1</sup> соответствуют амидам в области карбонильного поглощения. Полоса 1651 см<sup>-1</sup> обусловлена сложными колебаниями карбонильной группы, в которой принимают большое участие связь CN и углы C-C-O и C-N-R. Вторая

амидная полоса 1556 см<sup>-1</sup> связана с деформационными колебаниями N-H. Полоса 1263 см<sup>-1</sup> относится к деформационным колебаниям свободных гидроксильных групп, которые входят в гидроксиметильную группу (СН<sub>2</sub>ОН) КФ-Ж. Полоса 1016 см<sup>-1</sup> относится к валентным колебаниям простой эфирной связи (C-O), составной части диметиленэфирной связи в смоле.

При рассмотрении кривых ИК-спектров МУНТ установлено наличие полосы 3300-3400 см<sup>-1</sup>, обусловленная валентными колебаниями ОН группы, участвующей в межмолекулярной водородной связи. При добавлении МУНТ в карбаминоформальдегидную смолу интенсивность полосы 3375 см<sup>-1</sup> практически не изменилась, но она сместилась в сторону меньших частот, что может свидетельствовать об образовании водородной связи между ОН группами нанонаполнителя и смолы. Интенсивность полос 1651 см<sup>-1</sup>, 1556 см<sup>-1</sup> и 1013 см<sup>-1</sup> изменилась, что свидетельствует о возможном межмолекулярном взаимодействии функциональных групп смолы

(C=C, C-N, N-H) и нанотрубок (C=O). Результаты ИК-спектроскопии подтверждаются данными Zhu-zhukin K. и др. (2024) [50].

На рис. 2 представлены результаты испытаний прочностных показателей немодифицированной и модифицированной фанеры, полученной с добавлением МУНТ в различных массовых долях.

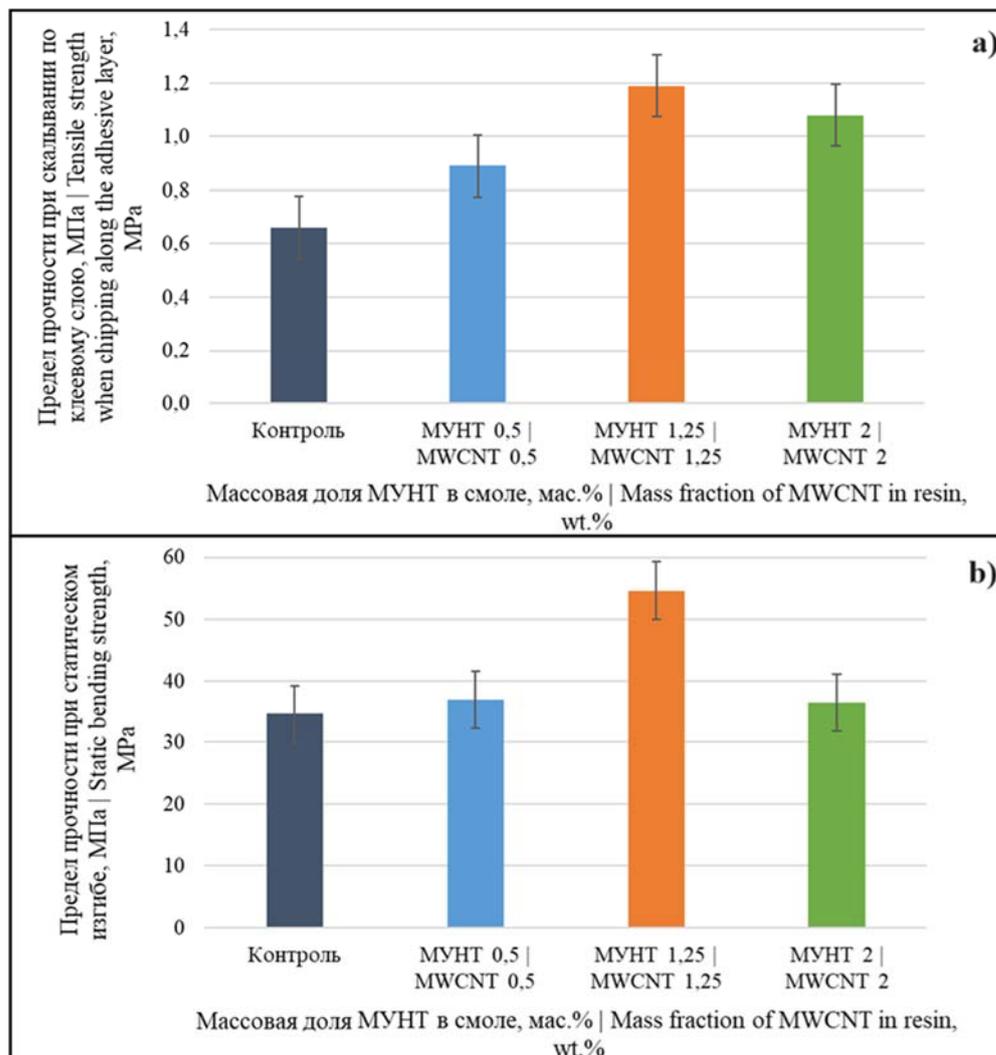


Рисунок 2. Результаты испытаний: а – предел прочности при скалывании по клеевому слою, МПа; б – предел прочности при статическом изгибе, МПа

Figure 2. Test results: a – the ultimate strength in chipping along the adhesive layer, MPa; b – the ultimate strength in static bending, MPa

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Согласно результатам, представленным на рис. 2, а, b, предел прочности при скалывании по клеевому слою и предел прочности при статическом изгибе модифицированной фанеры повышаются сравнительно с аналогичными характеристиками фанеры, изготовленной по стандартному режиму.

На рис. 3 отображены результаты определения содержания формальдегида в фанере, полученной с добавлением МУНТ в различных массовых долях.

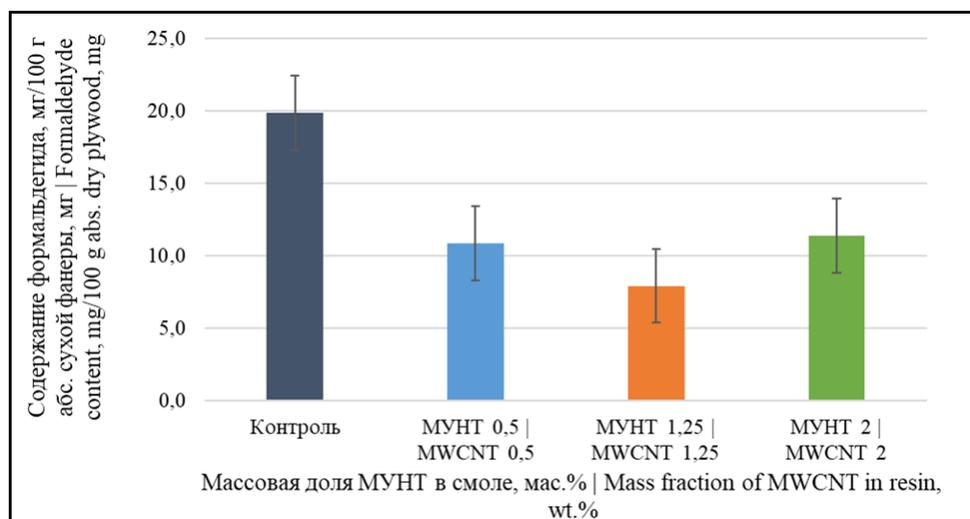


Рисунок 3. Содержание формальдегида в немодифицированной и модифицированной фанере, мг/100 г абс. сухой фанеры, мг

Figure 3. Formaldehyde content in unmodified and modified plywood, mg/100 g abs. dry plywood, mg

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Согласно экспериментальным данным, представленным на рис. 3, содержание формальдегида в модифицированной фанере на карбамидоформальдегидном связующем уменьшается сравнительно с немодифицированной фанерой марки ФК.

Обоснование преимущества по прочностным и экологическим показателям КФС, модифицированной МУНТ, для производства фанеры позволяют рассматривать термостабильность данной наномодифицированной смолы и фанеры на ее основе.

Методом термогравиметрического и дифференциально-термического анализа компонентов композитной фанеры при скорости нагрева  $10^{\circ}\text{C мин}^{-1}$  получены зависимости, представленные на рис. 4 в виде термогравиметрических кривых и их производных (TG/DTG), для КФС марки КФ-Ж и комплексного связующего КФС+МУНТ (рис. 4a/b), фанеры с КФС и фанеры с КФС+МУНТ (рис. 4c/d).

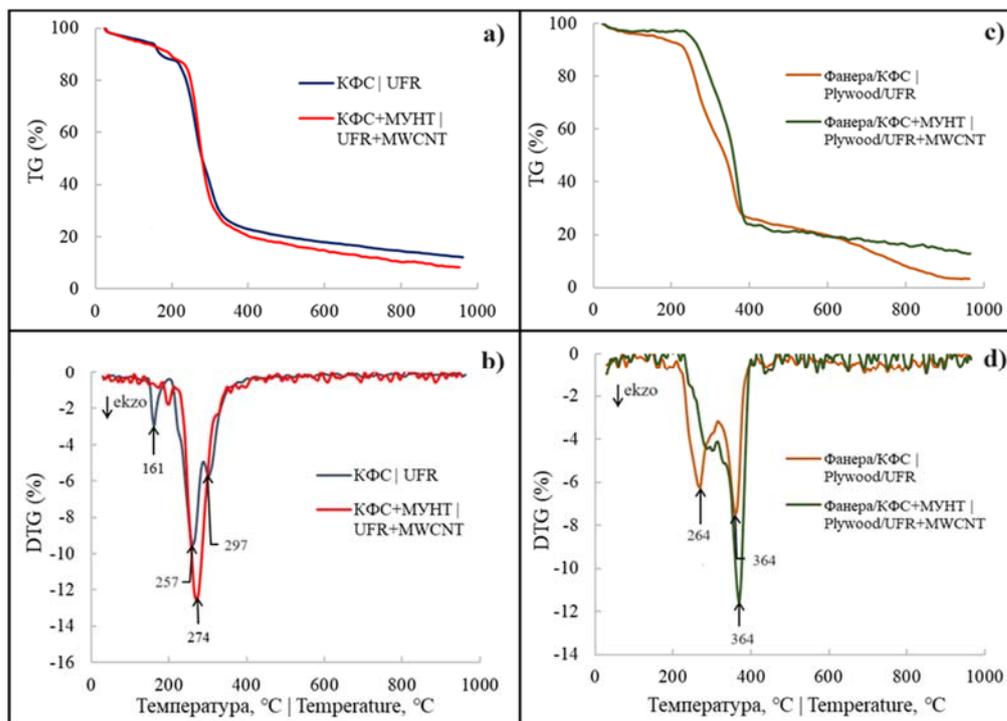


Рисунок 4. Результаты термогравиметрического и дифференциально термического анализа для КФС и композиционного связующего КФС+МУНТ (a/b); фанеры без и с добавлением МУНТ (c/d)  
 Figure 4. Results of thermogravimetric and differential thermal analysis for UFR and composite binder UFR+MWCNT (a/b); plywood without and with the addition of MWCNT (c/d)

Источник: собственные вычисления автора  
 Source: own calculations

В процессе нагрева КФС претерпевает три стадии термической деструкции свидетельствуют Ali Dorieh и др. (2022) [9]. Процесс деструкции сопровождается уменьшением молекулярной массы полимера в результате разрыва химических связей в макромолекулах и снижением степени полимеризации. Первая стадия характеризуется сушкой образцов с термическим разложением в области температур от 40 до 120 °C и потерей массы в результате испарения воды и удаления свободного формальдегида из КФС в количестве 5,9% (рис. 4, а), для КФС+МУНТ потеря массы на данном этапе составляет 5,8% (рис. 4, б). Существенных отличий на первом этапе между контрольным образцом и образцом с нанодобавкой установлено не было.

Вторая стадия термодеструкции происходит в диапазоне температур 170-350 °C при наиболее значительной потере массы контрольным образцом 65,3% (рис. 4, а, б). Для смолы КФ-Ж наблюдается экзотермический пик при температуре 161 °C (рис. 2, б) в результате деструкции диметиленэфирных мостиков ( $-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2-$ ) с образованием фор-

мальдегида и более стабильных метиленовых мостиков ( $-\text{CH}_2-$ ). Данный экзотермический пик отсутствует при деградации в образце КФС+МУНТ в связи с возможностью нуклеофильного присоединения к гидроксильным и карбонильным функциональным группам МУНТ электрофильных молекул формальдегида, что согласуется с данными Zhu-zhukin K. и др. (2024) [50]. В результате ИК-спектроскопического анализа было установлено наличие указанных функциональных групп (рис. 1). В этом температурном диапазоне также происходит термическая деструкция (разложение при температуре 230 °C) аминотильных связей ( $-\text{CH}_2-\text{NH}_2$ ) в смоле, что приводит к быстрой потере массы при 257 °C (экзотермический пик, рис. 4, б). Возрастание температуры свыше 350 °C сопровождается выделением аммиака и углекислого газа в результате разложения карбамидной составляющей смолы. При разложении смолы выделяется азот и формальдегид, образующийся в процессе отверждения и разрушения поперечных метиленовых и метиленэфирных связей, что описано в работе Kexin Chen (2023) [51].

Окисление карбаминоформальдегидной смолы, сопровождаемое экзотермическими эффектами, наблюдается при температурах 120-170 и 170-350 °С. На кривой DTG можно видеть 3 экзотермических эффекта (рис. 4, b), наибольший из которых зарегистрирован при  $T = 297$  °С. Кривая DTG образца КФС+МУНТ характеризуется отсутствием двугорбого экзотермического пика 257 °С и 297 °С, что предположительно связано с образованием термически более устойчивых связей в модифицированном связующем между смолой и МУНТ.

На третьей стадии термодеструкции немодифицированного связующего происходит потеря массы при 350-440 °С – 4,8 %, при 440-550 °С – 2,3 %, при 550-600 °С – 2,8 %, 600-950 °С – 6,8 %. Суммарная потеря массы на третьей стадии 16,7 %. Общая потеря массы по трем стадиям составляет 87,9 %.

Для модифицированной МУНТ карбаминоформальдегидной смолы общая потеря массы составляет 92,1 %: на первой стадии 5,8 %, на второй – 76,1 % и на третьей – 10,2 %.

При рассмотрении кривой для Фанера/КФС наблюдается двугорбый экзотермический пик, появляющийся в результате процесса термического разложения структурных компонентов клеточной

стенки древесины, приводящего к общей потере массы до 25 % при 364 °С. На кривой Фанера/КФС+МУНТ появляется экзотермический пик при той же температуре, но большей интенсивности (рис. 4, d), что характеризует повышенную термостабильность модифицированного образца фанеры: процесс интенсивной термической деструкции образца смолы, модифицированной МУНТ, происходит при температуре 238 °С, а образца смолы без добавления МУНТ при более низкой температуре – 200 °С.

Напряжение клевого слоя фанеры при использовании хрупких КФС является следствием высокой плотности сшивания метилена и образования кристаллической области в процессе отверждения клея. Взаимодействие между метилольными группами смолы и гидроксильными группами нанонаполнителя способствует увеличению пластичности клевого слоя. При внесении нанодобавки, происходит гетерофазное сопряжение связующего со шпоном, усиливается кристаллическости смолы. На рис. 5 представлены изображения клевого слоя немодифицированной (рис. 5, a) и модифицированной МУНТ (рис. 5, b) фанеры.

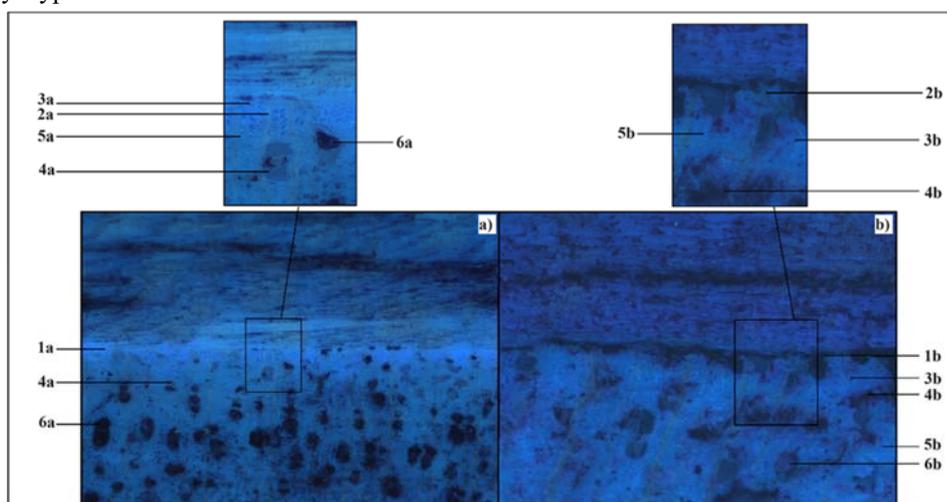


Рисунок 5. Клеевой слой фанеры, изготовленной на связующем без модификатора (a): 1a – клеевой слой, 2a – сердцевинные лучи, не заполненные клеем, 3a – мелкие сосуды, заполненные клеем, 4a – крупные сосуды, заполненные клеем, 5a – мелкие сосуды, не заполненные клеем, 6a – крупные сосуды, не заполненные клеем; и с модификатором (b): 1b – клеевой слой, 2b – сердцевинные лучи, заполненные клеем, 3b – мелкие сосуды, заполненные клеем, 4b – крупные сосуды, заполненные клеем, 5b – мелкие сосуды, не заполненные клеем, 6b – крупные сосуды, не заполненные клеем (увеличение 200x)

Figure 5. Adhesive layer of plywood made on a binder without a modifier (a): 1a – adhesive layer, 2a – core beams not filled with glue, 3a – small vessels filled with glue, 4a – large vessels filled with glue, 5a – small vessels not filled with glue, 6a – large vessels not filled with glue; and with modifier (b): 1b – adhesive layer, 2b – core beams filled with glue, 3b – small vessels filled with glue, 4b – large vessels filled with glue, 5b – small vessels not filled with glue, 6b – large vessels not filled with glue (increase 200x)

Источник: собственные вычисления автора | Source: own calculation

Введение МУНТ в состав связующего, приводящее к снижению вязкости клея, и диспергирование модификатора по объему смолы под воздействием ультразвука приводят к улучшению качества клевого слоя, а именно: равномерному распределению модификатора в клеевом слое и более полному протеканию реакции отверждения связующего, уменьшению пористости поверхности шпона и лучшему проникновению клея в полости клеток древесины.

### Обсуждение

В настоящее время ученые активно исследуют возможность применения МУНТ в деревообработке. Большинство работ отражают результаты использования функционализированных МУНТ в качестве модификатора связующего для производства ДПКМ. При этом значительное внимание уделяется прочностным показателям плитных материалов. Однако, термостабильность и экологичность конструкционных материалов в существенной степени, наряду с прочностными показателями, определяют сферы их применения.

Известны работы, отражающие влияние ф-МУНТ на свойства ДПКМ: В. Kord и др. [48] (2021), Ali Dorieh и др. (2022) [9], W. Gul и др. (2021) [42]. Однако операция функционализации МУНТ требует реорганизации технологического процесса производства, что, в свою очередь, способно оказать влияние на увеличение стоимости продукции. Гораздо в меньшей степени изучается возможность модификации смол нефункционализированным МУНТ. Стоит отметить, что введение в смолу 1 мас.% нефункционализированных МУНТ позволило увеличить предел прочности КМ при изгибе на 15% об этом свидетельствуют S.A. Mirsalehi и др. (2021) [35].

В отличие от приведённых источников, в данной работе представлено комплексное исследование прочностных, термогравиметрических и экологических показателей фанеры на основе КФС, модифицированной нефункционализированными МУНТ, оптически и ИК-спектроскопически доказано получение наномодифицированного связующего и нанокompозитной фанеры на его основе.

ИК-спектроскопический анализ является подтверждением сохранения функциональных групп

компонентов в КС и выполнения условия получения нанокompозита на его основе (согласно O.S.I Fayomi и др. (2021) [2]). Полосы 3375, 1651, 1556, 1263, 1016 см<sup>-1</sup> на ИК спектре комплексного связующего (КС) сохраняются, что является подтверждением неизменности в композите функциональных групп каждого компонента. Однако интенсивность полос пропускания на ИК спектре композита уменьшается, что свидетельствует о межмолекулярном взаимодействии функциональных групп смолы и МУНТ.

При аналогичном воздействии ультразвуковым и импульсным магнитным полем возрастание предела прочности при скалывании по клеевому слою и предела прочности при статическом изгибе достигают максимальных значений при массовой доли МУНТ 1,25 мас.%. Увеличение показателей по сравнению с фанерой, изготовленной по стандартному режиму составляет 80,3 % и 58,1 % соответственно. Дальнейшее повышение массовой доли МУНТ в смоле приводит к снижению прочностных показателей. Таким образом, физические поля позволяют получить более прочный клеевой шов и облегчить адгезионные процессы.

Снижение выделения формальдегида из образцов фанеры при модификации смолы МУНТ предположительно связано с межмолекулярным взаимодействием формальдегида и функциональных групп нанонаполнителя. Данное предположение подтверждается результатами ИК-спектроскопии и термогравиметрического анализа. Экологический показатель достигает минимального значения при массовой доле МУНТ 1,25 мас.%. Уменьшение эмиссии формальдегида из наномодифицированной фанеры по сравнению с фанерой, изготовленной по стандартному режиму составляет 59,9 %. При этом класс эмиссии модифицированной фанеры уменьшается до класса E1 по сравнению с немодифицированной, для которой класс эмиссии определён E2. Дальнейшее повышение массовой доли МУНТ в смоле приводит к повышению эмиссии формальдегида из фанеры. Как и в случае с прочностными показателями, данный эффект может быть связан со склонностью МУНТ к агломерации и, в следствие чего, снижением эффективности

наномодификатора, что согласуется с данными Hesameddin Yaghoobi и Abdolhossein Fereidoon (2019) [45].

Результаты термогравиметрического анализа свидетельствуют о большей термостабильности фанеры при использовании МУНТ в качестве модификатора комплексного связующего. На кривой Фанера/КФС+МУНТ появляется экзотермический пик при той же температуре, но большей интенсивности (рис. 4d), что характеризует повышенную термостабильность модифицированного образца фанеры: процесс интенсивной термической деструкции образца смолы, модифицированной МУНТ, происходит при температуре 238 °С, а образца смолы без добавления МУНТ при более низкой температуре – 200 °С.

Изображения, полученные методом оптической микроскопии, подтверждают более равномерное и существенное проникновение связующего в полости сосудов и сердцевинных лучей по линии соединения листов шпона для образца с модифицированной смолой. Клеевой слой в модифицированной фанере характеризуется меньшей толщиной в отличие от немодифицированной, что способствует снижению напряжения клеевого слоя и увеличению прочности соединения.

Следовательно, МУНТ в качестве наномодификатора для смолы КФС позволяет повысить прочностные показатели фанеры на ее основе и снизить экологическую нагрузку при эксплуатации нанокompозитной фанеры, а также увеличить термостабильность получаемого конструкционного материала. Обработка связующего в ультразвуковом поле способствует диспергированию и гомогенизации комплексного связующего, результатом чего является получение упрочненного клеевого слоя. Дополнительная энергия, получаемая системой при обработке импульсным магнитным полем, облегчает межмолекулярные взаимодействия между компонентами комплексного связующего и функциональными группами шпона. Итак, комплексное влияние наномодифицирующей добавки, ультразвукового и импульсного магнитного полей в технологии производства фанеры позволяют получить более конкурентоспособный продукт для широкого спектра применения.

### Выводы

1. Исследована возможность использования активированных ультразвуковым воздействием МУНТ в качестве наномодификатора карбамидоформальдегидной смолы при наличии дополнительной обработки фанеры в импульсном магнитном поле для получения нанокompозитной фанеры с улучшенными прочностными, термическими и экологическими показателями.

2. Оптически и ИК-спектроскопически доказано образование нанокompозитной фанеры на карбамидоформальдегидном связующем, модифицированном многостенными углеродными нанотрубками.

3. Установлено максимальное увеличение предела прочности при скалывании по клеевому слою и при статическом изгибе фанеры марки ФК при введении в связующее МУНТ в количестве 1,25 мас.%, при активации комплексного связующего ультразвуком и воздействии на фанеру импульсным магнитным полем.

4. Для нанокompозитной фанеры увеличение предела прочности при скалывании по клеевому слою по сравнению с немодифицированной составляет 80,3%.

5. Увеличение предела прочности при статическом изгибе для модифицированной фанеры по сравнению с немодифицированной составляет 58,1%.

6. Применение наномодификатора приводит к снижению массовой доли свободного формальдегида в модифицированном связующем КФС-Ж – на 59,9 %.

7. Использование МУНТ в качестве модификатора фанеры позволяет термостабилизировать карбамидоформальдегидную смолу и фанеру на ее основе: температура интенсивной деструкции модифицированной фанеры повышается до 238°С по сравнению с немодифицированной – 200°С.

8. Применение в качестве связующего карбамидоформальдегидной смолы, модифицированной нефункционализированными МУНТ, позволяет получать в большей степени термически стабильную фанеру с более высокими прочностными и экологическими показателями.

## Список литературы

1. O.S.I Fayomi, Okwilagwe O., Agboola O., S.O Oyedepo, A.P.I Popoola. Assessment of composite materials in advance application: A mini overview. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 38(5): 2402-2405. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.344>.
2. Чуркина А. В. Анализ использования фанеры как сырья. *Форум молодых ученых*. 2019; 2(30): 1645-1648. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38693672>.
3. Назаренко И. Н., Назаренко М. В. Состояние и перспективы развития фанерного производства // *Управленческий учет*. 2022; № 1-2: 299-310. <https://doi.org/10.25806/uu1-22022299-310>.
4. Пономаренко Л. В., Кантиева Е. В., Мануковский А. Ю. [и др.]. Мониторинг предела прочности на растяжение лущеного шпона и фанеры некоторых лиственных пород. *Системы. Методы. Технологии*. – 2023; № 4(60): 117-123. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2023-4-117-123>.
5. Чубинский А. Н., Русаков Д. С., Варанкина Г. С. [и др.]. Совершенствование технологии фанеры. *Леса России: политика, промышленность, наука, образование : материалы Всероссийской V научно-технической конференции-вебинара, Санкт-Петербург, 16–18 июня 2020 года*. Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова. Санкт-Петербург: Политех-Пресс. 2020; 289-291. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44032222>.
6. Wagenführ A., Buchelt B., Kairi M., Weber A. Veneers and Veneer-Based Materials. In: Niemz, P., Teischinger, A., Sandberg, D. (eds) *Springer Handbook of Wood Science and Technology*. Springer Handbooks. Springer, Cham. 2023; 1347-1407. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4_26)
7. Keresa Defa Ayana, Chang-Sik Ha, Abubeker Yimam Ali. Comprehensive overview of wood polymer composite: Formulation and technology, properties, interphase modification, and characterization. *Sustainable Materials and Technologies*. 2024; 40: 00983. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00983>.
8. Erik Jungstedt, Marcus Vinícius Tavares Da Costa, Sören Östlund, Lars A. Berglund. On the high fracture toughness of wood and polymer-filled wood composites – Crack deflection analysis for materials design. *Engineering Fracture Mechanics*. 2024; 300: 109994. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.109994>.
9. Ali Dorieh, Peyman Poursmaeel Selakjani, Mohammad Hassan Shahavi, Antonio Pizzi, Sogand Ghafari Movahed, Mohammad Farajollah Pour, Roozbeh Aghaei. Recent developments in the performance of micro/nanoparticle-modified urea-formaldehyde resins used as wood-based composite binders: A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2022; 114: 103106. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103106>.
10. Кантиева Е.В., Пономаренко Л. В., Томина Е. В., Томенко Д. К. Влияние наноразмерного оксида кремния на эксплуатационные характеристики фанеры. *Системы. Методы. Технологии*. 2022; 3(55): 129-134. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-3-129-134>.
11. Ibrahim Khan, Khalid Saeed, Idrees Khan. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*. 2019; 12(7): 908-931. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>.
12. María Alejandra Macías-Silva, Jeffrey Saúl Cedeño-Muñoz, Carlos Augusto Morales-Paredes, Rolando Tinizaray-Castillo, Galo Arturo Perero-Espinoza, Joan Manuel Rodríguez-Díaz, César Mauricio Jarre-Castro. Nanomaterials in construction industry: An overview of their properties and contributions in building house. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024; 10: 100863. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100863>.
13. G. Xu, J. Liang, B. Zhang et al. Performance and structures of urea-formaldehyde resins prepared with different formaldehyde solutions. *Wood Sci Technol*. 2021; 55: 1419–1437. <https://doi.org/10.1007/s00226-021-01280-y>.
14. Subasi N. T. Formaldehyde advantages and disadvantages: usage areas and harmful effects on human beings. *Biochemical Toxicology-Heavy Metals and Nanomaterials*. 2020; 89299. <https://doi.org/10.5772/intechopen/89299>.
15. Gao S., Liu Y., Wang C., Chu F., Xu F., Zhang D. Synthesis of lignin-based polyacid catalyst and its utilization to improve water resistance of urea-formaldehyde resins. *Polymers*. 2020; 12(1): 175. <https://doi.org/10.3390/polym12010175>.

16. Yifan Xu, Qianyu Zhang, Hong Lei, Xiaojian Zhou, Dawei Zhao, Guanben Du, Antonio Pizzi, Xuedong Xi. A formaldehyde-free amino resin alternative to urea-formaldehyde adhesives: A bio-based oxidized glucose – urea resin. *Industrial Crops and Products*. 2024; 218: 119037. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119037>.
17. Hamed Younesi-Kordkheili, Antonio Pizzi. Lignin-based wood adhesives: A comparison between the influence of soda and Kraft lignin. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2023; 121: 103312. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103312>.
18. M. Hazwan Hussin, Nur Hanis Abd Latif, Tuan Sherwyn Hamidon et al. Latest advancements in high-performance bio-based wood adhesives: A critical review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022; 21: 3909-3946. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.156>.
19. Anurag Wahane, Akash Sahu, Abhishek Verma, Twinkle Dewangan. Evaluation of the Physical and Mechanical Properties of Composite Board by Utilizing Agricultural Waste. *Materials Today: Proceedings*. 2023; 84: 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.142>.
20. Ramesh Karri, Reijo Lappalainen, Laura Tomppo, Ranjana Yadav. Bond quality of poplar plywood reinforced with hemp fibers and lignin-phenolic adhesives. *Composites Part C: Open Access*. 2022; 9: 100299. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100299>.
21. Zhengyong Yang, Zhigang Duan, Shi Yan, Haizhu Wu, Hui Huang, Lei He, Hisham Essawy, Heming Huang, Xiaojian Zhou, Xinyi Chen. Camellia oleifera shell powder and palm kernel meal as an environmentally-friendly, low-cost compound filler in MUF adhesive for plywood preparation. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2024; 131: 103648. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103648>.
22. Ayfer Dönmez Çavdar. Effect of zeolite as filler in medium density fiberboards bonded with urea formaldehyde and melamine formaldehyde resins. *Journal of Building Engineering*. 2020; 27: 101000. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101000>.
23. X. Li, Q. Gao, C. Xia, J. Li, X. Zhou. Urea Formaldehyde Resin Resultant Plywood with Rapid Formaldehyde Release Modified by Tunnel-Structured Sepiolite. *Polymers*. 2019; 11: 1286. <https://doi.org/10.3390/polym11081286>.
24. Wenyu Zheng, Tianle Hou, Jinhua Fan, Guangyu Wang, Chunyan Cai, Yuxuan Li, Jinsui Guanchang, Chunyu Liu, Yuzhu Chen, Hui Xiao. Study on surface grafting of hydroxyapatite and its influence on the properties of urea-formaldehyde resin. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2024; 132: 103696. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103696>.
25. Русаков Д. С., Варанкина Г.С., Чубинский А.Н. Свойства модифицированных карбамидо-и фенолоформальдегидных клеев для производства фанеры. Леса России: политика, промышленность, наука, образование : Материалы IV научно-технической конференции, Санкт-Петербург, 22–25 мая 2019 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого". 2019; 242-245. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38569780>.
26. Furqan Choudhary, Priyal Mudgal, Adil Parvez, Pradakshina Sharma, Humaira Farooqi. A review on synthesis, properties and prospective applications of carbon nanomaterials. *Nano-Structures & Nano-Objects*. 2024; 38: 101186. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101186>.
27. Лишних М. А. Виды и свойства нанокompозитов на основе полимерных материалов. *Вестник науки*. 2022; 6(51): 363-367. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48615669>.
28. Ющенко Е.В., Бельчинская Л.И., Жужукин К.В. Нанокompозитная эко-фанера: морфологическое, экологическое, ИК-спектроскопическое обоснования получения. *Лесотехнический журнал*. 2024; 14(...): - . <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.X/X>.
29. G.L. Devnani, Shishir Sinha. Effect of nanofillers on the properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*. 2019; 18(3): 647-654. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.460>.
30. Zahed Ahmadi. Epoxy in nanotechnology: A short review. *Progress in Organic Coatings*. 2019; 132: 445-448. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.04.003>.

31. Minjin Cai, Hehua Zhu, Timon Rabczuk, Xiaoying Zhuang. Investigation of mixing techniques for full-strength-grade engineered cementitious composites (ECCs): mechanical properties and microstructure. *Journal of Building Engineering*. 2024; 110136. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110136>.
32. Iftikhar S., Shah P.M. & Mir M.S. Potential Application of Various Nanomaterials on the Performance of Asphalt Binders and Mixtures: A Comprehensive Review. *Int. J. Pavement Res. Technol.* 2023; 16: 1439–1467. <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00207-5>.
33. Nanjun Chen, Arun Devaraj, Suveen N. Mathaudhu, Shenyang Hu. Atomic mixing mechanisms in nanocrystalline Cu/Ni composites under continuous shear deformation and thermal annealing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023; 27: 6792-6798. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.089>.
34. Aleksandr Evhenovych Kolosov, Elena Petryvna Kolosova, Volodymyr Volodymyrovych Vanin, Anish Khan. 25 - Ultrasonic treatment in the production of classical composites and carbon nanocomposites. Editor(s): Anish Khan, Mohammad Jawaid, Inamuddin, Abdullah Mohamed Asiri. In *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Nanocarbon and its Composites*. Woodhead Publishing. 2019; 733-780. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102509-3.00025-0>.
35. Mirsalehi S.A., Youzbashi A.A. & Sazgar A. Enhancement of out-of-plane mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy resin composite by incorporating the multi-walled carbon nanotubes. *SN Appl. Sci.* 2021; 3: 630. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04624-2>.
36. Ющенко Е.В. Магнитообработанный композиционный материал для производства фанеры на основе уплотненного шпона осины (*Populus tremula* L.) и комплексного связующего с нанокристаллической целлюлозой. *Лесотехнический журнал*. 2024; 14 (1): 219–237. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/13>.
37. Шамаев В. А., Разиньков Е. М., Ищенко Т. Л. Повышение прочности склеивания шпона в технологии фанеры. *Древесные плиты и фанера : теория и практика : материалы XXIV Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 17–18 марта 2021 года / Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова. – Санкт-Петербург: Политех-пресс. 2021; 117-120. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45825903>.*
38. Hossein Khanjanzadeh, Rabi Behrooz, Nader Bahramifar, Stefan Pinkl, Wolfgang Gindl-Altmutter. Application of surface chemical functionalized cellulose nanocrystals to improve the performance of UF adhesives used in wood based composites - MDF type. *Carbohydrate Polymers*. 2019; 206: 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.10.115>.
39. Eko Setio Wibowo, Muhammad Adly Rahandi Lubis, Byung-Dae Park, Jong Sik Kim, Valerio Causin. Converting crystalline thermosetting urea–formaldehyde resins to amorphous polymer using modified nanoclay. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2020; 87: 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.03.014>.
40. Pedro Henrique Gonzalez de Cademartori, Mirela Angelita Artner, Rilton Alves de Freitas, Washington Luiz Esteves Magalhães. Alumina nanoparticles as formaldehyde scavenger for urea-formaldehyde resin: Rheological and in-situ cure performance. *Composites Part B: Engineering*. 2019; 176: 107281. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107281>.
41. Daud S. Theory and Operational Principles of Carbon Nanotubes. In: *Carbon Nanotubes. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*. Springer, Singapore. 2023; 7-35. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-4962-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-99-4962-5_2).
42. Gul W., Alrobei H., Shah S.R.A., Khan A., Hussain A., Asiri A.M., Kim J. Effect of Embedment of MWCNTs for Enhancement of Physical and Mechanical Performance of Medium Density Fiberboard. *Nanomaterials*. 2021; 11(1): 29. <https://doi.org/10.3390/nano11010029>.
43. Łukawski D., Hochmańska-Kaniewska P., Janiszewska-Latterini D. et al. Functional materials based on wood, carbon nanotubes, and graphene: manufacturing, applications, and green perspectives. *Wood Sci Technol*. 2023; 57: 989–1037. <https://doi.org/10.1007/s00226-023-01484-4>.

44. Ющенко, Е. В. Углеродные нанотрубки: перспективы использования в промышленном производстве / Е. В. Ющенко, К. В. Жужукин // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2023; 64: 303-308. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54795616>.

45. Hessameddin Yaghoobi, Abdolhossein Fereidoon. Preparation and characterization of short kenaf fiber-based biocomposites reinforced with multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part B: Engineering*. 2019; 162: 314-322. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.015>.

46. Abohamzeh E., Sheikholeslami M., Salehi, F. Carbon Nanotubes for Mechanical Applications. In: Abraham, J., Thomas, S., Kalarikkal, N. (eds) *Handbook of Carbon Nanotubes*. Springer, Cham. 2022; 1335- 1368. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-91346-5\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91346-5_27).

47. Salehi S., Maghmoomi F., Sahebani S., Zebarjad S., Lazzeri A. A study on the effect of carbon nanotube surface modification on mechanical and thermal properties of CNT/HDPE nanocomposite. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2021; 34(2): 203-220. <https://doi.org/10.1177/0892705719838005>.

48. Kord B., Ayrilmis N., Ghalehno M.D. Effect of fungal degradation on technological properties of carbon nanotubes reinforced polypropylene/rice straw composites. *Polymers and Polymer Composites*. 2021; 29(5): 303-310. <https://doi.org/10.1177/0967391120915347>.

49. Farsi M., Maashi Sani F., Ebadi M. et al. Effects of Functionalized Multi-walled Carbon Nanotubes on the Performance of Wood-Plastic Composites. *Fibers Polym*. 2024; 25: 309-316. <https://doi.org/10.1007/s12221-023-00388-1>.

50. Zhuzhukin K., Belchinskaya L., Yushchenko E., Tomina E., Tretyakov A. Research of the Properties of Plywood Based on Urea-Formaldehyde Binder with the Added Multi-Wall Carbon Nanotubes. *Floresta e Ambiente*. 2024; 31(3): 20240018. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2024-0018>.

51. Kexin Chen, Yuzhu Chen, Jinqiu Qi, Jiulong Xie, Xingyan Huang, Yongze Jiang, Shaobo Zhang, Shanshan Jia, Qi Chen, Hui Xiao. Thermal degradation and curing kinetic study of urea formaldehyde/l-tyrosine composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2023; 127: 103493. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103493>.

### References

1. O.S.I Fayomi, Okwilagwe O., Agboola O., S.O Oyedepo, A.P.I Popoola. Assessment of composite materials in advance application: A mini overview. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 38(5): 2402-2405. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.344>.

2. Churkina A.V. Analysis of the use of plywood as a raw material. *Forum of young scientists*. 2019; 2(30): 1645-1648. Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38693672>.

3. Nazarenko I. N., Nazarenko M. V. The state and prospects of plywood production development // *Managerial accounting*. 2022; № 1-2: 299-310. <https://doi.org/10.25806/uu1-22022299-310>.

4. Ponomarenko L. V., Kantieva E. V., Manukovsky A. Yu. [et al.]. Monitoring of the tensile strength of peeled veneer and plywood of some hardwoods. The system. *Methods. Technologies*. – 2023; № 4(60): 117-123. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2023-4-117-123>.

5. Chubinsky A. N., Rusakov D. S., Varankina G. S. [et al.]. Improvement of plywood technology. Forests of Russia: politics, industry, science, education : materials of the All-Russian V Scientific and Technical conference-webinar, St. Petersburg, June 16-18, 2020. St. Petersburg State Forestry Engineering University named after S.M. Kirov. St. Petersburg: Polytech Press. 2020; 289-291. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44032222>.

6. Wagenführ A., Buchelt B., Kairi M., Weber A. Veneers and Veneer-Based Materials. In: Niemi, P., Teischinger, A., Sandberg, D. (eds) *Springer Handbook of Wood Science and Technology*. Springer Handbooks. Springer, Cham. 2023; 1347-1407. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4_26)

7. Keresa Defa Ayana, Chang-Sik Ha, Abubeker Yimam Ali. Comprehensive overview of wood polymer composite: Formulation and technology, properties, interphase modification, and characterization. *Sustainable Materials and Technologies*. 2024; 40: 00983. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00983>.

8. Erik Jungstedt, Marcus Vinicius Tavares Da Costa, Sören Östlund, Lars A. Berglund. On the high fracture toughness of wood and polymer-filled wood composites – Crack deflection analysis for materials design. *Engineering Fracture Mechanics*. 2024; 300: 109994. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2024.109994>.
9. Ali Dorieh, Peyman Pouresmaeel Selakjani, Mohammad Hassan Shahavi, Antonio Pizzi, Sogand Ghafari Movahed, Mohammad Farajollah Pour, Roozbeh Aghaei. Recent developments in the performance of micro/nanoparticle-modified urea-formaldehyde resins used as wood-based composite binders: A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2022; 114: 103106. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103106>.
10. Kantieva E.V., Ponomarenko L. V., Tomina E. V., Tomenko D. K. The effect of nanoscale silicon oxide on the performance characteristics of plywood. *The system. Methods. Technologies*. 2022; 3(55): 129-134. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-3-129-134>.
11. Ibrahim Khan, Khalid Saeed, Idrees Khan. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*. 2019; 12(7): 908-931. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>.
12. María Alejandra Macías-Silva, Jeffrey Saúl Cedeño-Muñoz, Carlos Augusto Morales-Paredes, Rolando Tinizaray-Castillo, Galo Arturo Perero-Espinoza, Joan Manuel Rodríguez-Díaz, César Mauricio Jarre-Castro. Nanomaterials in construction industry: An overview of their properties and contributions in building house. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024; 10: 100863. <https://doi.org/10.1016/j.csee.2024.100863>.
13. G. Xu, J. Liang, B. Zhang et al. Performance and structures of urea-formaldehyde resins prepared with different formaldehyde solutions. *Wood Sci Technol*. 2021; 55: 1419–1437. <https://doi.org/10.1007/s00226-021-01280-y>.
14. Subasi N. T. Formaldehyde advantages and disadvantages: usage areas and harmful effects on human beings. *Biochemical Toxicology-Heavy Metals and Nanomaterials*. 2020; 89299. <https://doi.org/10.5772/intechopen/89299>.
15. Gao S., Liu Y., Wang C., Chu F., Xu F., Zhang D. Synthesis of lignin-based polyacid catalyst and its utilization to improve water resistance of urea-formaldehyde resins. *Polymers*. 2020; 12(1): 175. <https://doi.org/10.3390/polym12010175>.
16. Yifan Xu, Qianyu Zhang, Hong Lei, Xiaojian Zhou, Dawei Zhao, Guanben Du, Antonio Pizzi, Xuedong Xi. A formaldehyde-free amino resin alternative to urea-formaldehyde adhesives: A bio-based oxidized glucose – urea resin. *Industrial Crops and Products*. 2024; 218: 119037. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119037>.
17. Hamed Younesi-Kordkheili, Antonio Pizzi. Lignin-based wood adhesives: A comparison between the influence of soda and Kraft lignin. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2023; 121: 103312. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103312>.
18. M. Hazwan Hussin, Nur Hanis Abd Latif, Tuan Sherwyn Hamidon et al. Latest advancements in high-performance bio-based wood adhesives: A critical review. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022; 21: 3909-3946. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.10.156>.
19. Anurag Wahane, Akash Sahu, Abhishek Verma, Twinkle Dewangan. Evaluation of the Physical and Mechanical Properties of Composite Board by Utilizing Agricultural Waste. *Materials Today: Proceedings*. 2023; 84: 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.142>.
20. Ramesh Karri, Reijo Lappalainen, Laura Tomppo, Ranjana Yadav. Bond quality of poplar plywood reinforced with hemp fibers and lignin-phenolic adhesives. *Composites Part C: Open Access*. 2022; 9: 100299. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100299>.
21. Zhengyong Yang, Zhigang Duan, Shi Yan, Haizhu Wu, Hui Huang, Lei He, Hisham Essawy, Heming Huang, Xiaojian Zhou, Xinyi Chen. Camellia oleifera shell powder and palm kernel meal as an environmentally-friendly, low-cost compound filler in MUF adhesive for plywood preparation. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2024; 131: 103648. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103648>.
22. Ayfer Dönmez Çavdar. Effect of zeolite as filler in medium density fiberboards bonded with urea formaldehyde and melamine formaldehyde resins. *Journal of Building Engineering*. 2020; 27: 101000. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101000>.

23. X. Li, Q. Gao, C. Xia, J. Li, X. Zhou. Urea Formaldehyde Resin Resultant Plywood with Rapid Formaldehyde Release Modified by Tunnel-Structured Sepiolite. *Polymers*. 2019; 11: 1286. <https://doi.org/10.3390/polym11081286>.
24. Wenyu Zheng, Tianle Hou, Jinhua Fan, Guangyu Wang, Chunyan Cai, Yuxuan Li, Jinsui Guanchang, Chunyu Liu, Yuzhu Chen, Hui Xiao. Study on surface grafting of hydroxyapatite and its influence on the properties of urea-formaldehyde resin. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2024; 132: 103696. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2024.103696>.
25. Rusakov D. S., Varankina G.S., Chubinsky A.N. Properties of modified carbamide and phenol-formaldehyde adhesives for plywood production. *Forests of Russia: politics, industry, science, education : Proceedings of the IV Scientific and Technical Conference, St. Petersburg, May 22-25, 2019. – St. Petersburg: Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University"*. 2019; 242-245. Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=38569780>.
26. Furqan Choudhary, Priyal Mudgal, Adil Parvez, Pradakshina Sharma, Humaira Farooqi. A review on synthesis, properties and prospective applications of carbon nanomaterials. *Nano-Structures & Nano-Objects*. 2024; 38: 101186. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2024.101186>.
27. Lishnih M. A. Types and properties of nanocomposites based on polymer materials. *Bulletin of Science*. 2022; 6(51): 363-367. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48615669>.
28. Yushchenko E.V., Belchinskaya L.I., Zhuzhukin K.V. Nanocomposite ecofanera: morphological, ecological, IR spectroscopic substantiation of obtaining. *Forestry journal*. 2024; 14(...): - . <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.X/X>.
29. G.L. Devnani, Shishir Sinha. Effect of nanofillers on the properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*. 2019; 18(3): 647-654. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.460>.
30. Zahed Ahmadi. Epoxy in nanotechnology: A short review. *Progress in Organic Coatings*. 2019; 132: 445-448. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.04.003>.
31. Minjin Cai, Hehua Zhu, Timon Rabczuk, Xiaoying Zhuang. Investigation of mixing techniques for full-strength-grade engineered cementitious composites (ECCs): mechanical properties and microstructure. *Journal of Building Engineering*. 2024; 110136. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110136>.
32. Iftikhar S., Shah P.M. & Mir M.S. Potential Application of Various Nanomaterials on the Performance of Asphalt Binders and Mixtures: A Comprehensive Review. *Int. J. Pavement Res. Technol*. 2023; 16: 1439–1467. <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00207-5>.
33. Nanjun Chen, Arun Devaraj, Suveen N. Mathaudhu, Shenyang Hu. Atomic mixing mechanisms in nanocrystalline Cu/Ni composites under continuous shear deformation and thermal annealing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023; 27: 6792-6798. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.089>.
34. Aleksandr Evhenovych Kolosov, Elena Petryvna Kolosova, Volodymyr Volodymyrovych Vanin, Anish Khan. 25 - Ultrasonic treatment in the production of classical composites and carbon nanocomposites. Editor(s): Anish Khan, Mohammad Jawaid, Inamuddin, Abdullah Mohamed Asiri. In *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Nanocarbon and its Composites*. Woodhead Publishing. 2019; 733-780. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102509-3.00025-0>.
35. Mirsalehi S.A., Youzbashi A.A. & Sazgar A. Enhancement of out-of-plane mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy resin composite by incorporating the multi-walled carbon nanotubes. *SN Appl. Sci*. 2021; 3: 630. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04624-2>.
36. Yushchenko E.V. Magnetically processed composite material for the production of plywood based on compacted aspen veneer (*Populus tremula* L.) and a complex binder with nanocrystalline cellulose. *Forestry Journal*. 2024; 14 (1): 219-237. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/13>.
37. Shamaev V. A., Razinkov E. M., Ishchenko T. L. Increasing the strength of veneer bonding in plywood technology. *Wood slabs and plywood : theory and practice : materials of the XXIV All-Russian Scientific and Practical*

Conference, St. Petersburg, March 17-18, 2021 / St. Petersburg State Forestry University named after S. M. Kirov. – St. Petersburg: Polytech Press. 2021; 117-120. Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45825903>.

38. Hossein Khanjanzadeh, Rabi Behrooz, Nader Bahramifar, Stefan Pinkl, Wolfgang Gindl-Altmutter. Application of surface chemical functionalized cellulose nanocrystals to improve the performance of UF adhesives used in wood based composites - MDF type. *Carbohydrate Polymers*. 2019; 206: 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.10.115>.

39. Eko Setio Wibowo, Muhammad Adly Rahandi Lubis, Byung-Dae Park, Jong Sik Kim, Valerio Causin. Converting crystalline thermosetting urea–formaldehyde resins to amorphous polymer using modified nanoclay. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2020; 87: 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2020.03.014>.

40. Pedro Henrique Gonzalez de Cademartori, Mirela Angelita Artner, Rilton Alves de Freitas, Washington Luiz Esteves Magalhães. Alumina nanoparticles as formaldehyde scavenger for urea-formaldehyde resin: Rheological and in-situ cure performance. *Composites Part B: Engineering*. 2019; 176: 107281. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107281>.

41. Daud S. Theory and Operational Principles of Carbon Nanotubes. In: *Carbon Nanotubes*. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Springer, Singapore. 2023; 7-35. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-4962-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-99-4962-5_2).

42. Gul W., Alrobei H., Shah S.R.A., Khan A., Hussain A., Asiri A.M., Kim J. Effect of Embedment of MWCNTs for Enhancement of Physical and Mechanical Performance of Medium Density Fiberboard. *Nanomaterials*. 2021; 11(1): 29. <https://doi.org/10.3390/nano11010029>.

43. Łukawski D., Hochmańska-Kaniewska P., Janiszewska-Latterini D. et al. Functional materials based on wood, carbon nanotubes, and graphene: manufacturing, applications, and green perspectives. *Wood Sci Technol*. 2023; 57: 989–1037. <https://doi.org/10.1007/s00226-023-01484-4>.

44. Yushchenko, E. V. Carbon nanotubes: prospects for use in industrial production. Actual problems of the forest complex. 2023; 64: 303-308. Access mode: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54795616>.

45. Hessameddin Yaghoobi, Abdolhossein Fereidoon. Preparation and characterization of short kenaf fiber-based biocomposites reinforced with multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part B: Engineering*. 2019; 162: 314-322. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.015>.

46. Abohamzeh E., Sheikholeslami M., Salehi, F. Carbon Nanotubes for Mechanical Applications. In: Abraham, J., Thomas, S., Kalarikkal, N. (eds) *Handbook of Carbon Nanotubes*. Springer, Cham. 2022; 1335- 1368. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-91346-5\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-030-91346-5_27).

47. Salehi S., Maghmoomi F., Sahebian S., Zebarjad S., Lazzeri A. A study on the effect of carbon nanotube surface modification on mechanical and thermal properties of CNT/HDPE nanocomposite. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2021; 34(2): 203-220. <https://doi.org/10.1177/0892705719838005>.

48. Kord B., Ayrilmis N., Ghalehno M.D. Effect of fungal degradation on technological properties of carbon nanotubes reinforced polypropylene/rice straw composites. *Polymers and Polymer Composites*. 2021; 29(5): 303-310. <https://doi.org/10.1177/0967391120915347>.

49. Farsi M., Maashi Sani F., Ebadi M. et al. Effects of Functionalized Multi-walled Carbon Nanotubes on the Performance of Wood–Plastic Composites. *Fibers Polym*. 2024; 25: 309–316. <https://doi.org/10.1007/s12221-023-00388-1>.

50. Zhuzhukin K., Belchinskaya L., Yushchenko E., Tomina E., Tretyakov A. Research of the Properties of Plywood Based on Urea-Formaldehyde Binder with the Added Multi-Wall Carbon Nanotubes. *Floresta e Ambiente*. 2024; 31(3): 20240018. <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2024-0018>.

51. Kexin Chen, Yuzhu Chen, Jinqiu Qi, Jiulong Xie, Xingyan Huang, Yongze Jiang, Shaobo Zhang, Shanshan Jia, Qi Chen, Hui Xiao. Thermal degradation and curing kinetic study of urea formaldehyde/l-tyrosine composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2023; 127: 103493. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103493>.

## Сведения об авторах

✉ *Ющенко Екатерина Викторовна* – аспирант кафедры древесиноведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4827-2756>, e-mail: [katerina.vgltu@yandex.ru](mailto:katerina.vgltu@yandex.ru).

*Бельчинская Лариса Ивановна* – профессор, доктор техн. наук, главный научный сотрудник научно-исследовательского отдела, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3921-8018>, e-mail: [belbom@mail.ru](mailto:belbom@mail.ru).

*Жужужкин Константин Викторович* – кандидат техн. наук, преподаватель кафедры химии и биотехнологии, старший научный сотрудник лаборатории анализа полимеразной цепной реакции, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7093-3274>, e-mail: [kinkon18@yandex.ru](mailto:kinkon18@yandex.ru).

*Жукалин Дмитрий Алексеевич* – доцент, кандидат физ.-мат. наук, доцент кафедры физики полупроводников и микроэлектроники ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская пл., 1, г. Воронеж, 394018, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0754-4989>, e-mail: [d.zhukalin@mail.ru](mailto:d.zhukalin@mail.ru).

## Information about the authors

✉ *Ekaterina V. Yushchenko* – postgraduate student of the Department of Wood Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4827-2756>, e-mail: [katerina.vgltu@yandex.ru](mailto:katerina.vgltu@yandex.ru).

*Larisa I. Belchinskaya* – Professor, Dr. Sci. (Technical), Chief Researcher of the Research Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3921-8018>, e-mail: [belbom@mail.ru](mailto:belbom@mail.ru).

*Konstantin V. Zhuzhukin* – Cand. Sci. (Technical), Lecturer, Department of Chemistry and Biotechnology, Senior Researcher, Polymerase Chain Reaction Analysis Laboratory, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7093-3274>, e-mail: [kinkon18@yandex.ru](mailto:kinkon18@yandex.ru).

*Dmitrii A. Zhukalin* – Cand. Sci. (Physical and Mathematical), Associate Professor, Department of Physics of Semiconductors and Microelectronics, Voronezh State University, University pl. 1, Voronezh, 394018, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0754-4989>, e-mail: [d.zhukalin@mail.ru](mailto:d.zhukalin@mail.ru).

✉ Для контактов | Corresponding author