

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/15>

УДК 674-419.32



## Нанокompозитная эко-фанера: морфологическое, экологическое, ИК-спектроскопическое обоснования получения

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

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

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

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

Вопрос экологичности фанеры остается актуальным в современной деревообрабатывающей промышленности. Наномодификация древесных плитных материалов является одним из перспективных методов решения данной проблемы. Оптическим, химическим и ИК-спектроскопическим методами исследовали и обосновали наличие характерных особенностей нанокompозита в полученном композиционном материале фанеры на основе шпона березы повислой (*Betula pendula* Roth) и карбамидоформальдегидной смолы, модифицированной нанокристаллической целлюлозой. Доказано преимущество карбамидоформальдегидного связующего при сравнении с фенолформальдегидным для производства фанерного нанокompозита при активации наномодифицированного связующего ультразвуком и фанеры – в импульсном магнитном поле. Установлено влияние компонентов комплексного связующего на морфологию поверхности отвержденного клея и изготовленной композиционной фанеры: гомогенизация связующего, улучшение качества клеевого шва и адгезионных процессов. Экологичность нанокompозита оценивалась по содержанию формальдегида в связующем и фанере. Подтверждено влияние кристаллической нанокеллюлозы на улучшение экологических характеристик формальдегидного связующего: снижение содержания формальдегида в карбамидоформальдегидном связующем на 42,3% (с 0,882% до 0,509%),  $p < 0,05$ ; в фенолоформальдегидном связующем – на 11,9% (с 0,084% до 0,074%),  $p < 0,05$ . Класс эмиссии формальдегида фанеры на модифицированном нанокристаллической целлюлозой карбамидоформальдегидном связующем снижается с E2 до E1 (с 13,82 до 7,70 мг/100 г абс. сухой фанеры),  $p < 0,05$ , а фанеры, полученной на фенолоформальдегидном связующем с нанокеллюлозой, остаётся без изменения – равным E2 (с 15,58 до 8,35 мг/100 г абс. сухой фанеры),  $p < 0,05$ . Производство полученной нанокompозитной эко-фанеры должно существенно расширить области использования фанеры в качестве конструкционного материала.

**Ключевые слова:** нанокристаллическая целлюлоза, нанокompозитная фанера, импульсное магнитное поле, шпон, ультразвуковое поле, модификация

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

**Благодарности:** авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.


**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Ющенко, Е. В. Нанокompозитная эко-фанера: морфологическое, экологическое, ИК-спектроскопическое обоснования получения / Е. В. Ющенко, Л. И. Бельчинская, К. В. Жужукин // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 3 (55). – С. 260–283. – Библиогр.: с. 278–282 (36 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/15>.

Поступила 30.06.2024. Пересмотрена 02.08.2024. Принята 06.08.2024. Опубликована онлайн 11.11.2024.

Article

**Nanocomposite eco-plywood: morphological, ecological, IR spectroscopic substantiation of obtaining**

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

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

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

*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation*

**Abstract**

The issue of environmental friendliness of plywood remains relevant in the modern woodworking industry. Nanomodification of wood slab materials is one of the promising methods for solving this problem. Optical, chemical and IR spectroscopic methods were used to investigate and substantiate the presence of characteristic features of the nanocomposite in the resulting composite material of plywood based on birch veneer (*Betula pendula* Roth) and carbamide-formaldehyde resin modified with nanocrystalline cellulose. The advantage of a urea-formaldehyde binder in comparison with a phenol-formaldehyde binder for the production of plywood nanocomposite has been proven when activating a nanomodified binder by ultrasound and plywood in a pulsed magnetic field. The influence of the components of the complex binder on the morphology of the surface of the cured adhesive and the manufactured composite plywood has been established: homogenization of the binder, improvement of the quality of the adhesive seam and adhesion processes. The environmental friendliness of the nanocomposite was assessed by the formaldehyde content in the binder and plywood. The effect of crystalline nanocellulose on improving the environmental characteristics of the formaldehyde binder was confirmed: a decrease in the formaldehyde content in the urea-formaldehyde binder by 42.3% (from 0.882% to 0.509%),  $p < 0.05$ ; in the phenol-formaldehyde binder - by 11.9% (from 0.084% to 0.074%),  $p < 0.05$ . The formaldehyde emission class of plywood on a carbamide-formaldehyde binder modified with nanocrystalline cellulose decreases from E2 to E1 (from 13.82 to 7.70 mg/100 g abs. dry plywood),  $p < 0.05$ , and plywood obtained on a phenol-formaldehyde binder with nanocellulose remains unchanged – equal to E2 (from 15.58 to 8.35 mg/100 g abs. dry plywood),  $p < 0.05$ . The production of the resulting nanocomposite eco-plywood should significantly expand the use of plywood as a structural material.

**Keywords:** *nanocrystalline cellulose, nanocomposite plywood, pulsed magnetic field, veneer, ultrasonic field, modification*

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

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

**Conflict of interest:** the authors declare no conflict of interest.

**For citation:** Yushchenko E. V., Belchinskaya L. I., Zhuzhukin K. V. (2024). Nanocomposite eco-plywood: morphological, ecological, IR spectroscopic substantiation of obtaining. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 3 (55), pp. 260-283 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.3/15>.

*Received* 30.06.2024. *Revised* 02.08.2024. *Accepted* 06.08.2024. *Published online* 11.11.2024.

## Введение

В классическом варианте композиционный материал (КМ) – это многофазная система, состоящая из компонентов различной природы, объединенных с целью получения необходимых функциональных свойств конечного материала. Как отмечает O.S.I. Fayomi и др. (2021) [1], важным условием образования КМ является сохранение компонентами первоначальных свойств при одновременном проявлении улучшенных свойств образующегося КМ, которые недоступны каждому компоненту в отдельности. Отличием нанокompозита от традиционного КМ является, во-первых, по данным A. Saberi и др. (2021) [2] и J. Zhao и др. (2022) [3] наличие одной из фаз в наноразмерном диапазоне (до 100 нм), во-вторых, в соответствии с работой M. Lishnykh (2022) [4], наличие небольшого количества наноразмерного наполнителя (до 5 мас.%), существенно изменяет важные эксплуатационные свойства композита.

Основу КМ составляет матрица, обладающая непрерывностью по всему объему будущего композиционного материала и наполнитель, введение которого в матрицу приводит к изменению её свойств. В древесных полимерных композиционных материалах (ДПКМ) матрицей является полимер (связующее), а наполнителем – дисперсный материал в виде частиц или волокон, придающий улучшенные физико-механические свойства ДПКМ, что следует из работы Ali Dorieh и др. (2022) [5].

Наиболее распространенными наполнителями ДПКМ являются органические и неорганические высокодисперсные материалы, использование которых уменьшает возможность разрушения и деформации композитов при их дальнейшей механической обработке. В работе M. Lishnykh (2022) [4] приводятся доказательства отличия ДПКМ от традиционных ПКМ в результате введения в состав композита нанонаполнителя в существенно малых количествах, что придает материалу новые функциональные свойства. В таких композитах при уменьшении размера наночастиц доля атомов, расположенных на их поверхности, значительно повышается, что значительно влияет на свойства объекта, и это влияние растёт с дальнейшим уменьшением раз-

меров [5]. В работе Ali Dorieh и др. (2022) [5] показано, что увеличение количества реакционноспособных функциональных групп нанонаполнителя улучшают адгезию на поверхности раздела «наполнитель-полимер». Наноразмерные частицы наполнителя, воздействуя на упорядоченность структуры матрицы, деформируемость и мобильность полимерных цепей, влияют на структурные, динамические, термодинамические и реологические свойства полимерной матрицы, а, следовательно, на свойства полимерного нанокompозиционного материала.

ДПКМ все чаще находят применение как альтернатива натуральной древесине, что объясняется рядом преимуществ: отсутствие анизотропии, постоянство размеров в условиях нестабильной температуры и влажности, минимизация естественных дефектов и рациональная утилизация отходов деревообрабатывающей промышленности отмечают A. Sotayo и др. (2020) [6], а также Tianxiang Wang и др. (2022) [7]. Одним из наиболее распространенных древесных композитов, получивших применение в различных сферах промышленного производства, является фанера следует из работ P. M. Нафталиева (2020) [8] и Pavlo Bekhta (2020) [9].

Полимеры, используемые в качестве связующего при производстве древесных композитов, дают возможность получать материалы с требуемыми свойствами, такими как экологичность, химическая и биологическая стойкость, механическая прочность и др. подчеркивает O.A. Шишакина (2019) [10]. В технологическом цикле производства фанеры чаще всего используют карбамидоформальдегидные смолы (КФС), согласно P. Antov и др. (2023) [11], объем использования КФС составляет около 95% от общего количества смол, применяемых при изготовлении древесных плит. КФС – это смесь олигомеров различной молекулярной массы линейной, разветвленной или циклической структуры, содержащих реакционноспособные группы:  $-\text{CH}_2\text{OH}$ ,  $-\text{NH}_2$  и  $-\text{OH}$ .

КФС получила широкое применение в производстве ДПКМ благодаря ряду преимуществ: доступной стоимости, высокой способности к химическому взаимодействию с компонентами композита, адаптивности к разным условиям отверждения, высокому уровню адгезии к древесине, прозрачному

клеевому слою, что следует из работы Hossein Khanjanzadeh и др. (2019) [12].

Несмотря на указанные положительные свойства, существенным недостатком КФС по-прежнему остается токсичность, причина которой – выделение непрореагировавшего формальдегида из ДПКМ отмечают L. Kristak и др. (2022) [13]. Особенно это актуально при использовании фанеры внутри помещения, т.к. концентрация формальдегида выше предельно допустимой оказывает негативное влияние на здоровье человека, что отмечают в своей работе Indrayudh Mondal и др. (2024) [14].

Ранее были предложены методы устранения данного недостатка, например, отраженные в работах Yaoxing Chen и др. (2024) [15], P. Antov и др. (2020) [16], Y.V. Pasko и O.P. Machneva (2023) [17], а также G. Xu и др. (2021) [18]. Наиболее актуальным способом на сегодняшний день является модификация смолы различными органическими и неорганическими наполнителями, например, сверхразветвленной полимочевьиной H. Yang, H. и др. (2023) [19], продуктами переработки кофейных зерен A. Danilowska и G. Kowaluk (2020) [20], изолятом соевого белка Jinxia Li и др. (2024) [21] и др. Однако применение указанных модификаторов незначительно снижает уровень эмиссии формальдегида из плит. Отдельное внимание уделяется нанонаполнителям – материалам, структурные элементы которых геометрически не превышают 100 нм хотя бы в одном из измерений. Особые свойства наноматериалов обуславливаются повышенной удельной поверхностью, ускоряющей взаимодействие между ними и средой, в которую они помещены отмечает Ali Dogieh и др. (2022) [5]. В большинстве исследований наномодификацию связующего применяют для улучшения физико-механических показателей композита, например, S. Bayani и др. (2019) [22], Lirya Silva L. C. и др. (2019) [23], W. Gul и др. (2021) [24], Radosław Auriga и др. (2020) [25] или его термо- и биостойкости M. F. Pour и др. (2021) [26], а также V. Jovanović и др. (2021) [27], и лишь в некоторых случаях для комплексной модификации Pedro Henrique Gonzalez de Cademartori и др. (2019) [28], Lubis M. A. R., и Park B. D. (2020) [29]. Однако, экологичность

конструкционных материалов, наряду с физическими и механическими свойствами, определяет область их применения в промышленных отраслях.

С точки зрения экологичности продукции, химическое взаимодействие между наномодификатором и формальдегидом в смоле способствует снижению выделения свободного формальдегида из плитных материалов отмечает T. Salthammer (2019) [30]. Согласно Hossein Khanjanzadeh и др. (2019) [12] эффективное взаимодействие НКЦ с КФС объясняется высоким содержанием в наноцеллюлозе реакционноспособных поверхностных гидроксильных групп, способных вступать в реакцию с активными группами связующего. Улучшение реакционной способности компонентов полимерной системы зависит от способа распределения наночастиц по матрице, приводящее к улучшению межфазного взаимодействия НКЦ со смолой и древесиной и в большей степени достигается при воздействии на композит ультразвуковым и импульсным магнитным полями подчеркивают E.B. Ющенко (2024) [31], а также A.E. Kolosov и др. (2019) [32]. Существенным преимуществом НКЦ является вариативность характеристик получаемой наноцеллюлозы в зависимости от исходного сырья отмечают J.Y. Zhu и др. (2021) [33], ее экологичность и ресурсовозобновляемость, что особенно важно при переходе к производству экологически чистых материалов подчеркивают V. Savov (2023) [34], Chen C и др. (2021) [35]. Повышение экологичности фанеры остается актуальной задачей на сегодняшний день, а указанные особые свойства НКЦ делают ее перспективной в вопросе модификации КФС и производстве эко-фанеры.

Таким образом, целью данной работы является совершенствование технологии получения композитной фанеры и обоснование её нанокомпозитности, исследование степени экологичности и морфологических особенностей модифицированного кристаллической наноцеллюлозой связующего, активированного ультразвуком, а также фанеры, изготовленной на его основе, активированной импульсным магнитным полем.

## Материалы и методы

### Объект и предмет исследований

Объектом исследования является модифицированные НКЦ связующие: карбамидоформальдегидное марки КФ-Ж и фенолоформальдегидное марки СФЖ-3014, а также фанера марок ФК и ФСФ, изготовленные из шпона березы повислой (*Betula pendula* Roth). Для осуществления эксперимента использованы образцы модифицированных и немодифицированных клеев и фанеры на их основе.

Предмет исследования – нанокристаллическая целлюлоза в качестве модифицирующей добавки к связующему в виде смолы КФ-Ж и установление влияния на морфологию связующего, экологические показатели клея и фанеры, произведенной на его основе, а также модификация НКЦ смолы СФЖ-3014 и установление экологических показателей наномодифицированного связующего СФЖ-3014 и фанеры на его основе. Выбор связующего для производства нанокompозитной фанеры.

### Дизайн эксперимента

Концепция эксперимента основана на способе горячего прессования фанеры с дополнительным воздействием на компоненты композиционного

материала ультразвуковым и импульсным магнитным полями в соответствии с методикой, отраженной в работе Е.В. Ющенко (2024) [31].

Для получения трехслойной фанеры использовали следующие компоненты:

- лущеный шпон березы повислой (*Betula pendula* Roth), (ООО «ГаличЛес», г. Галич, Россия), размером 500×500×4 мм и влажностью 6±2%;
- смолу карбамидоформальдегидную КФ-Ж (ПАО «Уралхимпласт», г. Н.Тагил, Россия) в соответствии с ГОСТ 14231–88;
- хлористый аммоний (ООО «Компонент-Реактив», г. Москва, Россия), ГОСТ 3773–72;
- смолу фенолоформальдегидную СФЖ-3014 (ПАО «Уралхимпласт», г. Н.Тагил, Россия) в соответствии с ГОСТ 20907–2016;
- нанокристаллическую целлюлозу (Nanografi Nano Technology, Ankara, Turkey).

Характеристика нанокристаллической целлюлозы отобрана в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика нанокристаллической целлюлозы

Table 1

Characteristics of nanocrystalline cellulose

Параметр   Parameter	Величина   Value
Внешний вид (Цвет)   Appearance (Color)	Белый/почти белый   White/off white
Внешний вид (Форма)   Appearance (Form)	Порошок, высушенный распылением (влажность <6,0%)   Spray Dried powder (<6.0% moisture)
Средний размер частиц (ширина x длина), нм   Average Particle Size (wide x length), nm	10-20 x 300-900
Кристалличность целлюлозы (XRD), %   Cellulose Crystallinity (XRD), %	92
Температура разложения кристаллической наноцеллюлозы (ТГА в N <sub>2</sub> ), °C   Decomposition Temperature of Crystalline Nanocellulose (TGA in N <sub>2</sub> ), °C	349
Плотность, г/см <sup>3</sup>   Density, g/cm <sup>3</sup>	1,49
Объемная плотность, г/см <sup>3</sup>   Bulk Density, g/cm <sup>3</sup>	0,5-0,8
Размер частиц, дисперсный порошок при концентрации 2% (мас.), нм   Particle Size, dispersed powder at 2% (w/w), nm	<150
pH, дисперсный порошок при концентрации 2% (мас./мас.)   pH, dispersed powder at 2% (w/w)	5,0-8,0

Параметр   Parameter	Величина   Value
Проводимость, дисперсный порошок при 2% (по массе), $\mu\text{Cm}$   Conductivity, dispersed powder at 2% (w/w), $\mu\text{S}$	<350
Вязкость, дисперсный порошок при 2% (мас./мас.), сП   Viscosity, dispersed powder at 2% (w/w), sP	>5

Источник: <https://nanografi.com/popular-products/cellulose-nanocrystal-nanocrystalline-cellulose-cnc/>

Source: <https://nanografi.com/popular-products/cellulose-nanocrystal-nanocrystalline-cellulose-cnc/>

Для проведения исследования комплексное связующее изготавливали по рецептам согласно

табл. 2, количество клея рассчитывалось из расхода 155 г/м<sup>2</sup>.

Таблица 2

Рецепт связующего

Table 2

Binder recipe

Опыт №1   Experience No. 1		Опыт №2   Experience No. 2	
Компонент связующего   Binder component	Мас.%   Mas.%	Компонент связующего   Binder component	Мас.%   Mas.%
Смола КФ-Ж   KF-G resin	100	Смола СФЖ-3014   SFG-3014 resin	100
Хлористый аммоний   Ammonium chloride	1	Нанокристаллическая целлюлоза   Nanocrystalline cellulose	2
Нанокристаллическая целлюлоза   Nanocrystalline cellulose	2	Вода   Water	10
Вода   Water	10	-	-

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Для получения комплексного связующего на основе ФФС к смоле марки КФ-Ж постепенно добавляли в течение 10 минут предварительно полученную водную суспензию НКЦ, затем отвердитель – хлористый аммоний. Связующее готовили при постоянном механическом перемешивании. Для лучшего диспергирования НКЦ связующее обрабатывали в течение трех минут ультразвуком в установке УЗК 1,3 (рабочая частота 24 кГц). Температура окружающей среды поддерживалась на уровне 20-25 °С. Эффект кавитации достигался при помощи

дистиллированной воды, заполняющей емкость ультразвуковой установки.

Комплексное связующее на основе ФФС готовили в течении 10 минут при постоянном механическом перемешивании с постепенным добавлением водной суспензии НКЦ. Отвердитель не применяли, т.к. смолу СФЖ-3014 возможно использовать в качестве однокомпонентного клея. Режим ультразвуковой обработки связующего и температура окружающей среды соответствовал предыдущему опыту.

Характеристика ультразвуковой установки приведена в табл. 3.

Таблица 3

Технические характеристики ультразвуковой ванны

Table 3

Specifications of ultrasonic cleaner

Параметр   Parameter	Величина   Value
Габариты рабочей емкости, м   Working container dimensions, m	0,12x0,11x0,1
Рабочий объем, м <sup>3</sup>   Working volume, m <sup>3</sup>	1,3·10 <sup>-3</sup>

Рабочая частота, кГц   Operating frequency, kHz	24,0 ± 7,5%
Ультразвуковая мощность, Вт   Ultrasonic power, W	80
Напряжение питания, В/Гц   Supply voltage, V/ Hz	220/50
Температура жидкости, °С   Liquid temperature, °C	20-105

Источник: ООО «Спецмаш», РФ

Source: LLC Spetsmash, RF

Согласно ГОСТ 14231–88 проводили отбор клеев для определения содержания свободного формальдегида и морфологических характеристик.

Формируя пакет трехслойной фанеры, клей наносили на шпон ручным способом: на обе поверхности шпона для среднего слоя и на одну сторону листов шпона, используемых для наружных слоев. При формировании пакета фанеры укладку листов шпона осуществляли друг на друга под прямым углом, направление волокон в каждом последующем слое было перпендикулярно относительно предыдущего.

Для прессования использовали пресс ПД476 – гидравлический, с обогреваемыми плитами (ОАО «Гидропресс», г. Оренбург, Россия). Режим прессования фанеры на основе комплексного связующего КФ-Ж соответствовал приведённым параметрам: давление 2 МПа, температура плит пресса 115 °С, время прессования 8,3 мин. При использовании в качестве связующего наномодифицированного клея СФЖ-3014 давление прессования оставалось прежним, температура плит пресса составляла 120 °С, время прессования – 10 мин. Для завершения процесса полимеризации после прессования фанеру в течение суток выдерживали при влажности воздуха 65±5% и температуре 20 °С, затем подготавливали образцы для определения эмиссии формальдегида из плит и определения морфологических характеристик. Далее в течение одной минуты образцы подвергали обработке импульсным магнитным полем (ИМП) сериями симметричных однополярных импульсов треугольной формы длительностью 10 мкс, частотой следования 100 Гц, и амплитудой 0,3 Тл. Фанеру в соленоиде располагали таким образом, чтобы волокна древесины были ориентированы параллельно силовым линиям поля. Воздействие ИМП на ДПКМ приводит к активации системы «модифицированное связующее – шпон» и является причи-

ной более интенсивного взаимодействия на межфазной границе активных функциональных групп клея и фанеры, что согласуется с данными Ющенко Е.В. (2024) [31].

Методом ИК-спектроскопического анализа определялась возможность сохранения функциональных групп компонентов комплексного связующего в модифицированном клее. ИК-спектроскопический анализ смол КФ-Ж и СФЖ-3014, наполнителя НКЦ и клеевой смеси НКЦ 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 400-4000 см<sup>-1</sup> с разрешением 2 см<sup>-1</sup> в режиме передачи.

Оптический микроскоп Olympus BX-51 (Япония) использовали для изучения морфологии поверхности: определения морфологической картины поверхности отвержденного связующего в чистом виде и с добавлением наполнителя на инертной (стеклянной) и активной (берёзовый шпон) подложках. Морфологию клеевого слоя исследовали с применением инвертированного тринокулярного флуоресцентного просвечивающего микроскопа Zeiss AxioVert.A1 (Китай).

Содержание свободного формальдегида в связующем определяли сульфитным методом. В конической колбе емкостью 200-250 мл взвешивали 1 г смолы с точностью до 0,002 г и растворяли в 50 мл дистиллированной воды. Вводили в полученный раствор 20 мл 0,1 н раствора HCl и 25 мл 25 % -го свежеприготовленного раствора сульфита натрия, добавляли 2-3 капли индикатора тимолфталейна. Избыток кислоты оттитровывали 0,1 н раствором едкого натра до появления слабо-синей окраски. Записывали объем NaOH, израсходованный на титрование. Параллельно проводили контрольный опыт с

дистиллированной водой. Затем определяли массовую долю свободного формальдегида в связующем по формуле:

$$X = \frac{0,003 \cdot (a - b) \cdot k}{c} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где 0,003 – количество формальдегида, соответствующее 1 мл 0,1 н раствора;

$a$  – объем 0,1 н раствора NaOH в контрольном опыте, мл;

$b$  – объем 0,1 н раствора NaOH, израсходованного на титрование испытываемого раствора, мл;

$c$  – навеска смолы, г.

$k$  – поправочный коэффициент 0,1 н раствора NaOH (0,95-1,0).

Контрольными образцами выступали смолы без наномодификатора и отвердителя.

Проводили испытания для определения экологических показателей фанеры. Класс эмиссии фанеры определяли в соответствии с ГОСТ 3916.1 – 2018. Использовали наиболее распространенный на практике метод WKI (чувствительность метода 0,005 мг/мл раствора). Образцы фанеры размером 25×25 мм в количестве 12 штук взвешивали попарно. Мерной колбой (емкостью 50 мл) наливали дистиллированную воду в стеклянную емкость объемом 500 мл. Два образца соединяли пластъ к пласти при помощи резинового кольца и закрепляли на крючке под крышкой емкости таким образом, чтобы образцы не касались воды. Емкости герметично закрывали и выдерживали в течение 40 минут в предварительно нагретом термощкафу при постоянной температуре 70±1 °С. После чего для полной абсорбции формальдегида водой колбы охлаждали. Формальдегид, выделившийся из образца, поглощался

водой. Из банки отбирали пипеткой 10 мл анализируемого раствора и помещали его в коническую колбу для титрования, приливали пипеткой 25 мл 0,01 н раствора йода, добавляли цилиндром 10 мл 1 н раствора едкого натра и оставляли в темноте на 5 минут. Затем добавляли цилиндром 5 мл раствора серной кислоты (1:1). Выделившийся избыток йода титровали 0,01 н раствором тиосульфата натрия до светло-желтой окраски, затем добавляли 3-4 капли 1 %-го раствора крахмала и продолжали титровать до исчезновения синей окраски. Параллельно осуществляли контрольный опыт с дистиллированной водой. Записывали объем титранта  $V$  и вычисляли процентное содержание формальдегида в образце по формуле:

$$X_{\phi} = \frac{0,75 \cdot (V_o - V) \cdot (100 + W)}{m}, \% \quad (2)$$

где  $V_o$  – объем титранта в контрольном опыте, мл;

$V$  – объем титранта в опыте с анализируемым раствором, мл;

$W$  – влажность образца, %;

$m$  – масса образца, г.

В качестве контрольного образца использовали фанеру без наномодификатора, полученную стандартным методом.

#### Анализ данных

Результаты определения степени экологичности фанеры статистически проанализированы с использованием  $R$ . Сравнение показателей проводилось с помощью теста Стьюдента с уровнем значимости 0,05.

#### Результаты

На рис. 1 показаны три ИК спектра: КФС марки КФ-Ж, наноцеллюлозы (НКЦ) и клея на их основе.



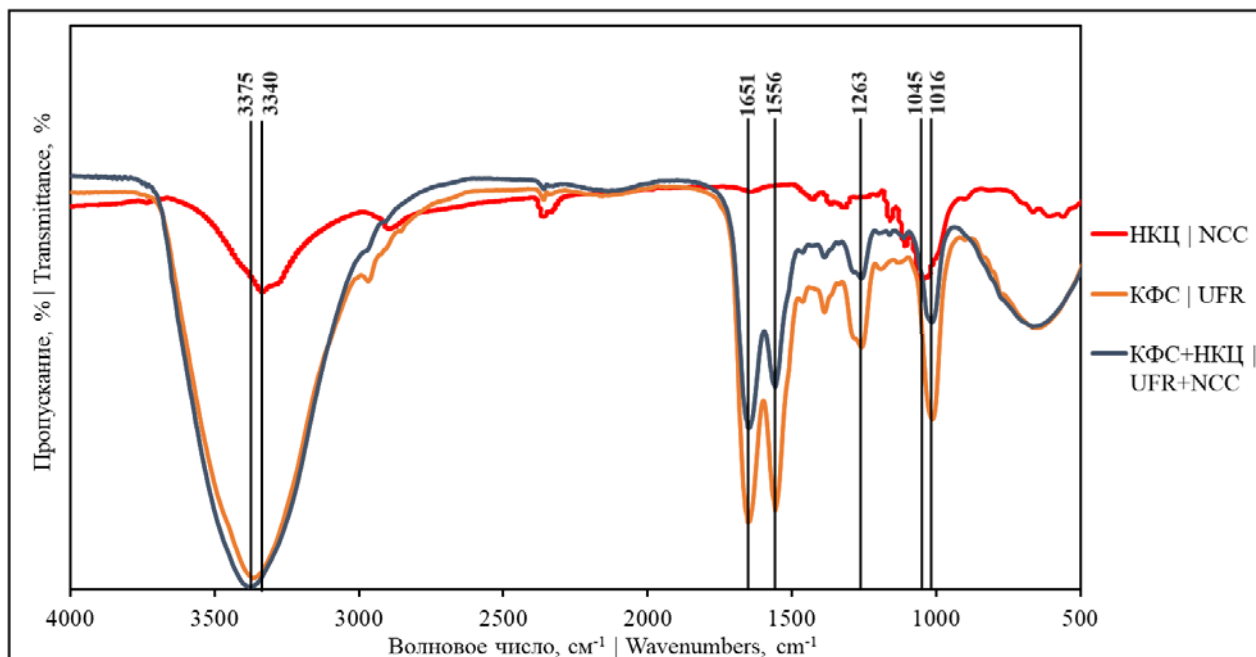


Рисунок 1. Результаты ИК-спектроскопического анализа КФС, нанонаполнителя НКЦ и клея на их основе  
 Figure 1. Results of IR spectroscopic analysis of UFR, NCC nanofillers and glue based on them

Источник: собственные вычисления автора  
 Source: own calculations

Полосы 3375, 1651, 1556, 1263, 1016  $\text{cm}^{-1}$  на ИК спектре комплексного связующего (КС) сохраняются, что подтверждает неизменность в композите функциональных групп каждого компонента. Однако интенсивность полос пропускания на ИК спектре композита уменьшается, что свидетельствует о межмолекулярном взаимодействии функциональных групп смолы и нанонаполнителя. Таким образом, ИК-спектроскопический анализ является подтверждением сохранения функциональных групп компонентов в КС и возможностью получения нанокompозита на его основе, что согласуется с O.S.I Fayomi и др. (2021) [1].

Нанокompозиты отличаются от обычных композиционных материалов значительно более развитой поверхностью частиц наполнителя. Свойства нанокompозита в большей степени, чем композита, зависят от морфологии частиц наполнителя и характера взаимодействия компонентов на поверхности раздела фаз. Обязательным условием получения нанокompозита является наличие нанодиапазонного размеров частиц наполнителя, который соблюдается, так как размер волокон НКЦ по ширине находится в диапазоне 10-20 нм (табл. 1). НКЦ вводится

в связующее в количестве 2 мас.%, что отвечает условию создания нанокompозита согласно A. Saberi и др. (2021) [2] и J. Zhao и др. (2022) [3].

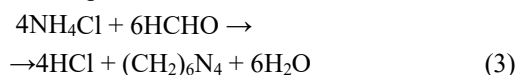
Получены морфологические картины поверхности связующего КФ-Ж, КФ-Ж с добавлением отвердителя, КФ-Ж с добавлением нанонаполнителя и КФ-Ж с добавлением отвердителя и НКЦ на инертной и активной подложках. Связующее подвергалось ультразвуковой обработке. В соответствии с Amin Moslemi и др. (2020) [36] карбамидоформальдегидная смола относится к гомогенной системе, что отражено на рис. 2. При воздействии на смолу ультразвуком, согласно акустической теории кавитации, происходит дегазация свободного формальдегида из КФС, являющегося зародышами кавитации. Процесс ультразвуковой дегазации происходит в три стадии, которые, как правило, протекают одновременно: 1) зарождение и диффузионный рост пузырьков газа, 2) слияние пузырьков в более крупные (силы Бьеркнесса и Бернулли), 3) подъём и всплытие пузырьков на поверхность подложки.



Рисунок 2. Морфология карбамидоформальдегидной смолы (увеличение 100x)  
Figure 2. Morphology of urea-formaldehyde resin (increase 100x)

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

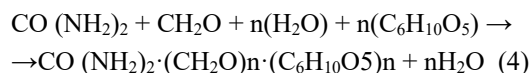
При добавлении в смолу марки КФ-Ж отвердителя (хлорида аммония) происходит химическая реакция отвердителя со свободным формальдегидом с образованием кристаллического гетероциклического соединения гексаметилентетрамина (уротропина). Система переходит из гомогенной в гетерогенную в результате кислотного отверждения КФ-Ж, которое протекает как результат гидролиза хлорида аммония с выделением протона, что является причиной отверждения клея:



При этом поверхность отверждённой смолы становится дискретной: кроме жидкой (смола) и твёрдой (уротропин) фаз появляются пузырьки газа

(формальдегид), занимающие 8,77% площади поверхности отверждённого клея (рис. 3, а).

Введение в КФ-Ж НКЦ без отвердителя сопровождается образованием высокомолекулярной композиции с трехмерной сетчатой структурой, происходит взаимодействие формальдегида с одной ОН-группой целлюлозы, продуктом которого являются полуацетали, или с двумя ОН-группами соседних элементарных звеньев (механизм реакции Ми-нье Гийо) с образованием ацеталей:



При этом может происходить сшивание формальдегидом целлюлозных волокон преимущественно на поверхности материала в присутствии кислоты, выполняющей роль катализатора, и образование поперечных связей, что сопровождается побочными реакциями: полимеризацией сшивающего реагента, разложением метилольных производных с образованием формальдегида и его взаимодействием с целлюлозой. Явный переход системы в гетерогенную подтверждается наличием трех фаз: жидкой (смола), твердой (НКЦ) и газообразной (формальдегид). В результате площадь пузырьков на поверхности смолы возрастает до 9,13 % (рис. 3, б).

При совместном введении в КФ-Ж хлорида аммония и НКЦ, несмотря на наличие двух твердых фаз (отвердителя и наномодификатора), гомогенность системы значительно повышается: площадь пузырьков на поверхности снижается практически в два раза до 4,04% (рис. 3, с) в результате взаимодействия формальдегида с отвердителем и НКЦ.

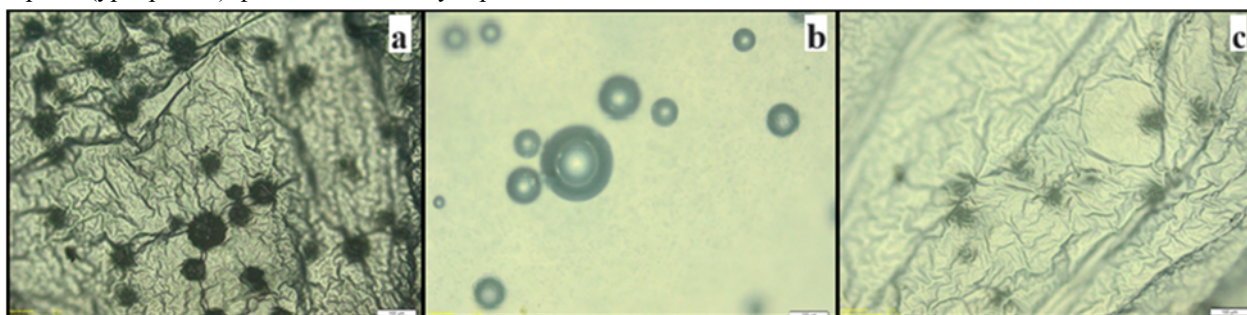


Рисунок 3. Морфология поверхности отвержденного клея при добавлении в смолу: отвердителя (а); НКЦ (б); НКЦ и отвердителя (с) (инертная подложка – стекло) (увеличение 100x)

Figure 3. Morphology of the surface of the cured adhesive when added to the resin: hardener (a); NCC (b); NCC and hardener (c) (inert substrate – glass) (increase 100x)

Источник: собственные вычисления автора | Source: own calculations

На рис. 4 представлены морфологические картины влияния компонентов связующего, оцененного в процентах, по площади поверхности пузырьков (рис. 4, а), расстоянию между пузырьками

(рис. 4, б) и расстоянию между группами пузырьков (рис. 4, с) по отношению к инертной подложке – стеклу.

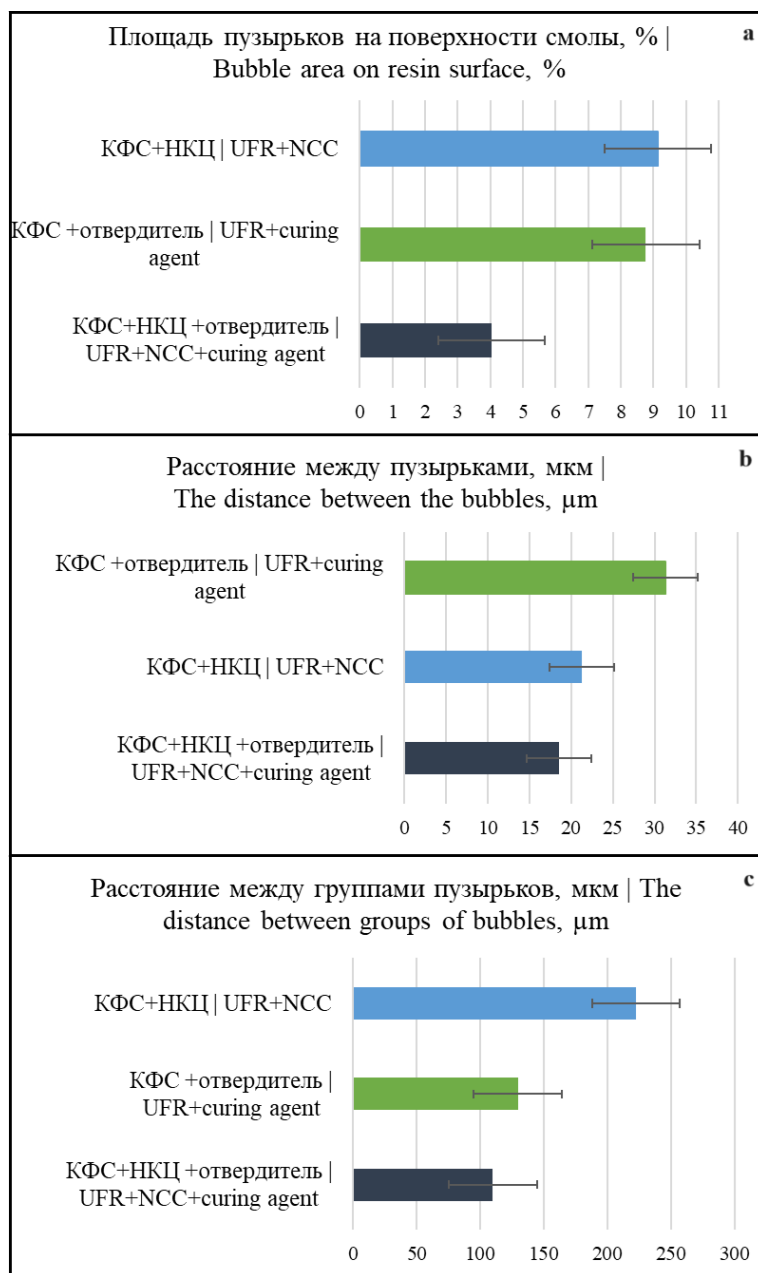


Рисунок 4. Влияние компонентов связующего на морфологию поверхности отвержденного клея по отношению к инертной стеклянной подложке: площадь поверхностных пузырьков смолы (а), расстояние между пузырьками (б) и расстояние между группами пузырьков (с)

Figure 4. The effect of the binder components on the morphology of the surface of the cured adhesive in relation to an inert glass substrate: the area of the surface resin bubbles (a), the distance between the bubbles (b) and the distance between the groups of bubbles (c)

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Данные оптической микроскопии (рис. 2, 3), а также морфологическая картина, представленная на рис. 4, подтверждают синергетический эффект при совместном введении в смолу наномодификатора и отвердителя, позволяющий получать более экологичные, т.е. более высокоэффективные нанокomпозиционные материалы.

Аналогичная картина наблюдается при анализе площади пузырьков на активной подложке –

берёзовом шпоне. При добавлении в смолу отвердителя происходят морфологические изменения в результате выделения формальдегида. В системе, состоящей из шпона, КФ-Ж и отвердителя, площадь пузырьков составляет 4,13% (рис. 5, а). При введении в эту систему НКЦ происходит взаимодействие формальдегида как с отвердителем, так и с НКЦ и площадь пузырьков снижается до 2,80% (рис. 5, б).

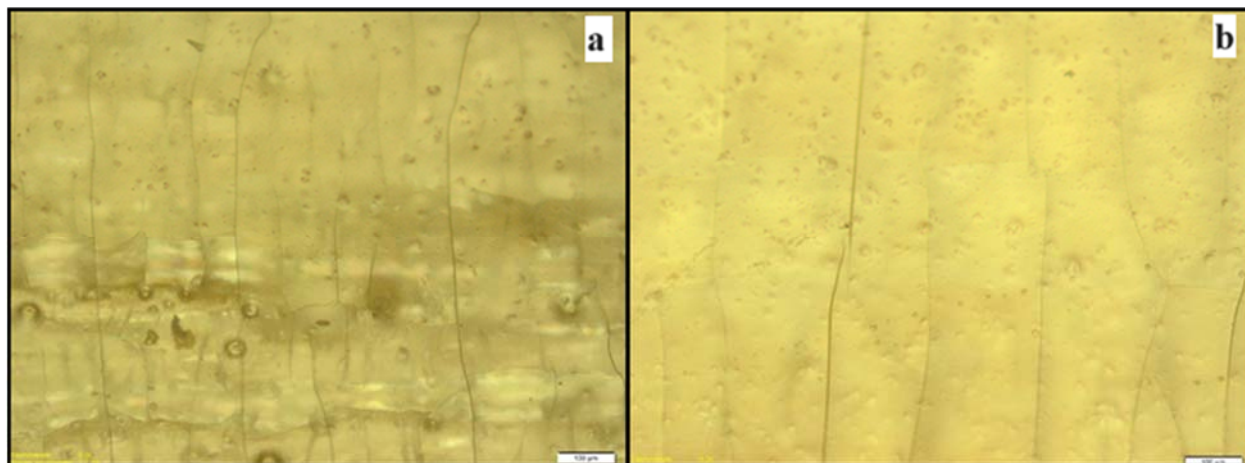


Рисунок 5. Морфология поверхности отвержденного клея при добавлении в смолу: отвердителя (а); НКЦ и отвердителя (б) (активная подложка – шпон березы повислой (*Betula pendula* Roth)) (увеличение 100x)  
Figure 5. Morphology of the surface of the cured adhesive when added to the resin: hardener (a); NCC and hardener (b) (active substrate – birch veneer (*Betula pendula* Roth)) (increase 100x)

Источник: собственные вычисления автора  
Source: own calculations

В нанокomпозите сохраняются фазы компонентов, в том числе, на наноуровне, что подтверждает ИК-спектроскопический анализ (рис. 1) и вместе с этим появляется качественно новое условие: гомогенизация поверхности (рис. 5, а, б), что позволяет повысить прочность клеевого слоя и уменьшить степень свободы поверхности шпона.

На рис. 6 отображена морфологическая картина влияния компонентов связующего, оцененного в процентах по площади поверхностных пузырьков, отвержденного на активной подложке – берёзовом шпоне.

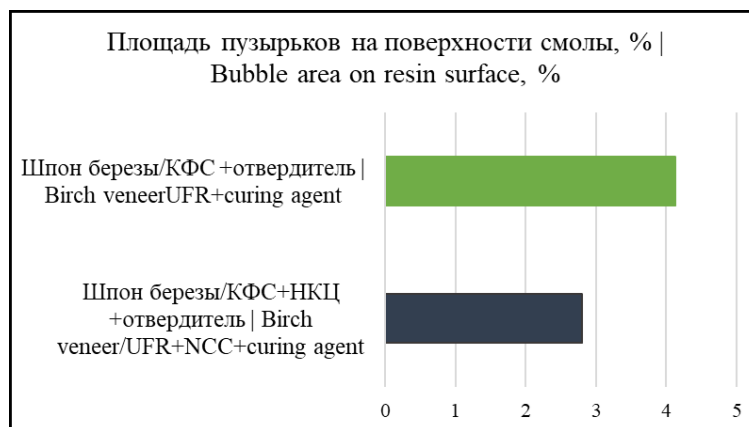


Рисунок 6. Морфология поверхности берёзового шпона при добавлении в связующее отвердителя и отвердителя с наномодификатором НКЦ

Figure 6. Morphology of the birch veneer surface when adding a hardener and a hardener with a nanomodifier NCC to the binder

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Введение бионаноконпонентов в смолу при получении нанокompозитной фанеры приводит к гомогенизации связующего. В процессе получения нанокompозита смола взаимодействует как с НКЦ, так и с подложкой, которая не инертна к связующему. Шпон по отношению к смоле является активной подложкой, т.к. свободный формальдегид и образующийся в результате реакции формальдегида с отвердителем уротропин может взаимодействовать со шпоном. Введение НКЦ в КФС приводит к химическому взаимодействию наномодификатора с содержащимся в смоле формальдегидом. Результатом данной реакции является переход системы наномодифицированного связующего в гомогенное состояние, а благодаря реакционной способности формальдегида как по отношению к шпону, так и к НКЦ, нанокompозит приобретает адаптивные свойства. Итак, на границе шпона и клеевой композиции формальдегид выполняет двойную функцию: с одной стороны молекулы формальдегида способны проникать между волокнами древесины, разрыхляя их надмолекулярную структуру и, следовательно, повышать доступность к реакционным центрам, с другой стороны, формальдегид вступает в химическое взаимодействие с гидроксильными группами

структурных компонентов древесины, образуя полуацетали и ацетали.

В результате высокой плотности сшивания метилена и образования кристаллической области в процессе отверждения клея напряжение клеевого слоя фанеры при использовании хрупких КФС довольно значительно. Увеличению пластичности клея способствует взаимодействие между гидроксильными группами нанокеллюлозы и метилольными группами КФС. Воздействие на комплексное связующее ультразвуком приводит к более равномерному распределению модификатора по объему связующего. Добавление НКЦ в состав клея приводит к снижению вязкости связующего. В совокупности эти меры приводят к лучшему проникновению клея в полости клеток древесины, уменьшению пористости поверхности шпона, равномерному распределению модификатора в клеевом слое и более полному протеканию реакции отверждения связующего. На рис. 7 представлены изображения клеевого слоя фанеры, изготовленной на традиционном (рис. 7, а) и модифицированном НКЦ связующем (рис. 7, б).



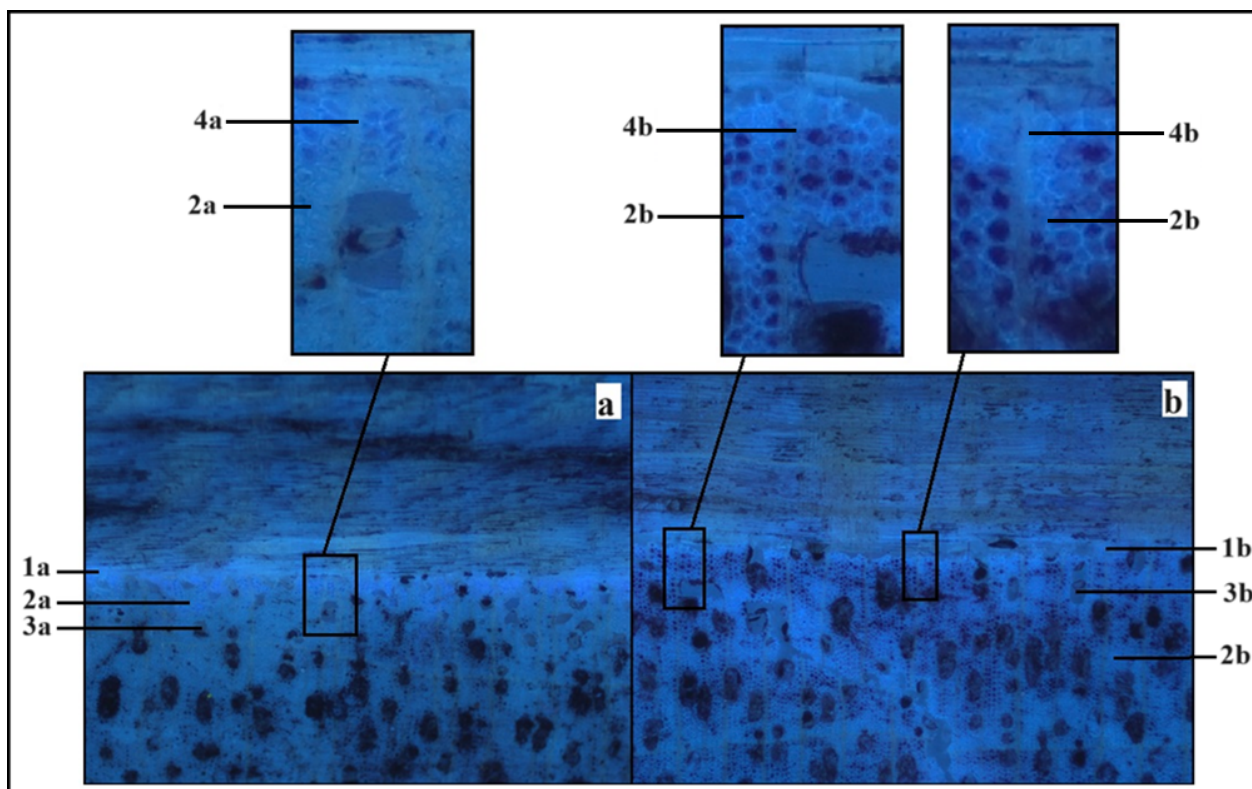


Рисунок 7. Клеевой слой фанеры, изготовленной на связующем без модификатора (а): 1а – клеевой слой, 2а – мелкие сосуды, заполненные клеем, 3а – крупные сосуды, заполненные клеем, 4а – сердцевинные лучи, не заполненные клеем; и с модификатором (б): 1б – клеевой слой, 2б – мелкие сосуды, заполненные клеем, 3б – крупные сосуды, заполненные клеем, 4б – сердцевинные лучи, заполненные клеем (увеличение 200х)  
 Figure 7. Adhesive layer of plywood made on a binder without a modifier (a): 1a – adhesive layer, 2a – small vessels filled with glue, 3a – large vessels filled with glue, 4a – core beams not filled with glue; and with a modifier (b): 1b – adhesive layer, 2b – small vessels, filled with glue, 3b – large vessels filled with glue, 4b – core beams filled with glue (increase 200x)

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Анализируя рис. 7 отмечаем лучшее и более равномерное проникновение связующего в полости сосудов и сердцевинных лучей по линии соединения шпона для образца с модифицированной смолой. Клеевой слой в модифицированной фанере тоньше по сравнению с немодифицированной, что приводит к снижению напряжения клеевого слоя и увеличению прочности клеевого соединения.

Методом ИК спектроскопии с преобразованием Фурье получены ИК спектры смол КФ-Ж и СФЖ-3014, представленные на рис. 8 в виде кривых результирующих спектров поглощения исследуемых образцов и проведён анализ наличия функциональных реакционноспособных групп, способных к взаимодействию с активными химическими группами наполнителя и шпона.

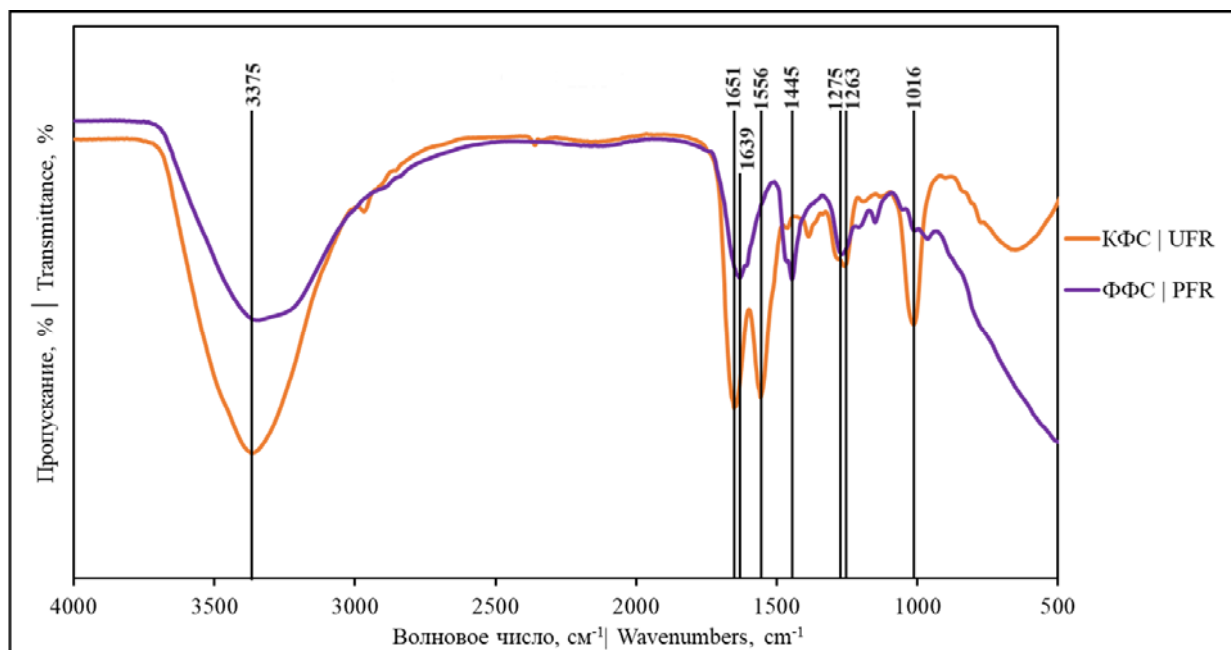


Рисунок 8. Результаты ИК-спектроскопического анализа смол КФС и ФФС

Figure 8. Results of IR spectroscopic analysis of UFR and PFR

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Полосы в области  $3300-3700\text{ см}^{-1}$  связаны с наличием гидроксильных групп, участвующих в образовании водородных связей. Более интенсивные полосы  $3375\text{ см}^{-1}$  в КФ-Ж позволяет предположить увеличение количества гидроксильных групп, а смещение полосы  $3330\text{ см}^{-1}$  в СФЖ-3014 в сторону низких частот (на  $47\text{ см}^{-1}$ ) свидетельствует об увеличении водородных связей в КФ-Ж относительно СФЖ-3014. При  $3100 - 3000\text{ см}^{-1}$  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  $1800-1400\text{ см}^{-1}$  характеризует различные валентные колебания групп с кратными связями:  $\text{C}=\text{O}$ ,  $\text{C}=\text{C}$ ,  $\text{C}_{\text{Ar}}-\text{C}_{\text{Ar}}$ . В этом же интервале находятся полосы поглощения деформационных дельта колебаний С-Н связей и других групп. Полоса поглощения на ИК спектре СФЖ-3014 в диапазоне  $1450-1420\text{ см}^{-1}$  относится к скелетным колебаниям ароматического кольца, она отсутствует в КФ-Ж. Полосы при  $1470-1460\text{ см}^{-1}$  характеризуют асимметричные алифатические С-Н связи. Полосу при  $1430\text{ см}^{-1}$  относят к ножничным колебаниям  $\text{CH}_2$ -

групп, находящихся рядом с карбонильной группой, а также скелетным колебаниям ароматического кольца, интенсивность которой чувствительна к природе заместителей в кольце. Полоса  $1263\text{ см}^{-1}$  соответствует  $\text{CH}_3$  деформационным колебаниям. Полосы в диапазоне  $1275-1150\text{ см}^{-1}$  свидетельствуют о наличии фенола. Полоса  $1445\text{ см}^{-1}$  характеризует деформационные колебания  $\text{CH}_3$ - групп. Полоса  $1016\text{ см}^{-1}$  соответствует колебаниям группы С-О. Полоса  $1016\text{ см}^{-1}$  (в диапазоне  $1055-870\text{ см}^{-1}$ ) соответствует симметричным колебаниям С-О-С.

Исследованы экологические показатели карбамидоформальдегидного связующего марки КФ-Ж, фенолоформальдегидного связующего марки СФЖ-3014 и фанеры на их основе.

Основными экологическими показателями древесно-полимерного композиционного материала (ДПКМ) являются массовая доля свободного формальдегида в клее и класс эмиссии плит, которые во многом определяются связующим, используемым при их производстве.

На рис. 9 показано влияние компонентов связующего на содержание свободного формальдегида в клеях на основе КФС и ФФС.

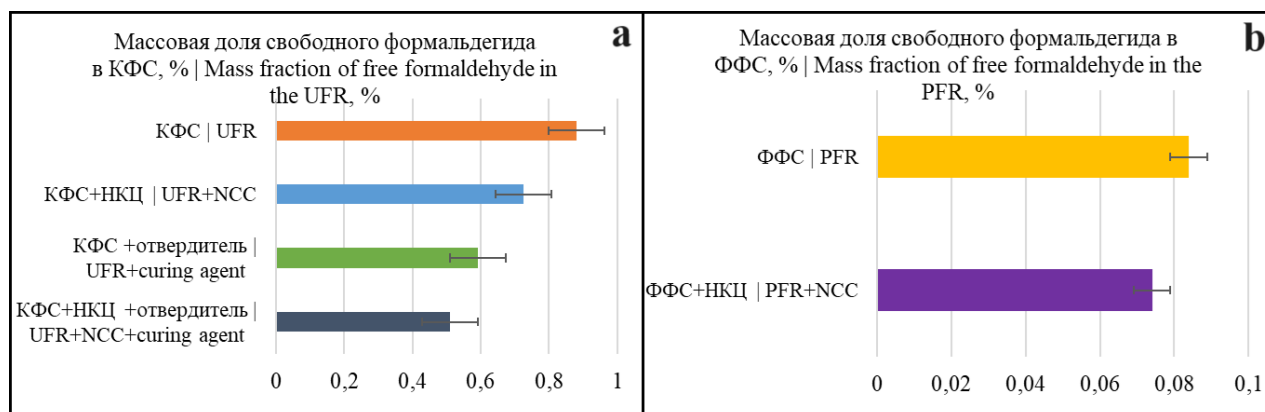


Рисунок 9. Массовая доля свободного формальдегида в связующем на основе: карбамидоформальдегидной смолы (а); фенолоформальдегидной смолы (б)

Figure 9. Mass fraction of free formaldehyde in the resin-based binder: urea-formaldehyde resin (a); phenol-formaldehyde resin (b)

Источник: собственные вычисления автора | Source: own calculations

В результате анализа рис. 9 показана экологическая целесообразность использования смолы КФСЖ при получении на ее основе клеевой композиции, включающей отвердитель и наномодификатор. В этом случае наблюдается максимальное снижение массовой доли свободного формальдегида в связующем – на 42,3% по сравнению с чистой смолой. Тогда, как наличие только НКЦ в связующем снижает данный показатель на 19,3%, а введение только

отвердителя - на 34,3% (рис. 9, а). Использование НКЦ в качестве модификатора смолы СФЖ-3014 позволяет снизить содержание свободного формальдегида в модифицированном связующем только на 11,9% (рис. 9б), подтверждая экологическое преимущество КФС относительно ФФС.

На рис. 10 представлены результаты определения содержания формальдегида в фанере.

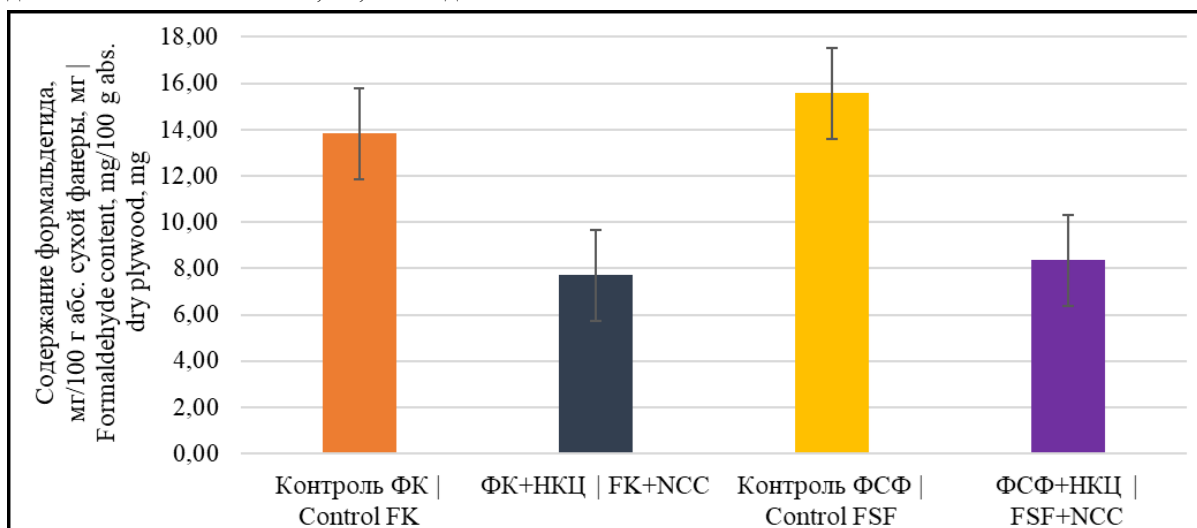


Рисунок 10. Содержание формальдегида в немодифицированной и модифицированной фанере марок ФК и ФСФ, мг/100 г абс. сухой фанеры, мг

Figure 10. Formaldehyde content in unmodified and modified plywood grades FK and FSF, mg/100 g abs. dry plywood, mg

Источник: собственные вычисления автора | Source: own calculations



Согласно экспериментальным данным, представленным на рис. 10, содержание формальдегида в модифицированной фанере на карбамидоформальдегидном связующем уменьшилось на 46,2 % сравнительно с немодифицированной фанерой марки ФК, а класс эмиссии модифицированной фанеры уменьшился до класса E1 по сравнению с немодифицированной, для которой определён класс эмиссии E2. В модифицированной фанере на фенолоформальдегидном связующем класс эмиссии не изменяется и остаётся E2, несмотря на снижение содержания формальдегида до 46,7 % (расчёт проводился относительно контрольного образца, где содержание формальдегида принимается равным 100 %).

Морфологически, ИК спектроскопически и экологически подтверждено образование фанерного нанокompозита и показаны его преимущества для получения нанокompозитной фанеры. Доказана перспективная роль НКЦ для качественного улучшения фанерного материала.

### Обсуждение

Amin Moslemi, Ali Dorieh, Hossein Khanjanzadeh и др. исследовалось влияние НКЦ в качестве модификатора карбамидоформальдегидного связующего на экологические показатели древесных композиционных материалов. Ali Dorieh и др. (2022) в обзоре [5] сообщает, что модификация КФС нанокompозитом способствует улучшению экологических показателей фанеры, так, эмиссия формальдегида из композиционного материала снижается на 25% по сравнению с немодифицированными плитами. Amin Moslemi и др. (2020) [36] практически подтверждают положительное влияние НКЦ, как модификатора, на экологичность КФС и МДФ на ее основе: содержания свободного формальдегида в смоле снижается в среднем на 37%, эмиссия формальдегида из модифицированных плит – на 12-24%. Hossein Khanjanzadeh и др. (2019) [12] свидетельствуют об уменьшении содержания свободного формальдегида в КФС, модифицированной НКЦ. Следует отметить, что лучший результат – снижение содержания свободного формальдегида в смоле на 26%, получен авторами при введении в смолу НКЦ в количестве 2 мас. %.

В отличие от приведённых источников, в представленной работе обосновано получение нанокompозитной фанеры. Формальдегид в данной работе рассматривается как компонент живой природы, выполняющий в древесине (в данном случае древесном шпоне) функциональную роль. С другой стороны, формальдегид в синтетической карбамидоформальдегидной смоле является токсикантом, т.е. формальдегид выполняет двойную роль. Клеевая композиция – это самоорганизованная система, в которую встраивается формальдегид. Формальдегид является отдельной фазой и взаимодействует как с НКЦ, так и с КФС, связывая все ингредиенты нанокompозита в одно целое, образуя в системе «шпон – связующее» промежуточный (переходный) биоподобный слой (на границе шпона и смолы). При воздействии физическими полями система переходит в активное состояние. При этом происходит не только адгезия, но и сращивание шпона и связующего. В системе «смола – нанонаполнитель» происходит взаимодействие функциональных групп нанокompозита с химически активными группами смолы и формальдегидом. В результате улучшаются эксплуатационные и экологические свойства фанеры. Таким образом, комплексное связующее рассматривается как гетерогенная многокомпонентная система, состоящая из матрицы (карбамидоформальдегидная смола), отвердителя (хлорид аммония), наполнителя (нанокompозит) и газообразного формальдегида. В такой системе гетерогенное взаимодействие происходит на наноуровне и образующийся композит имеет признаки нанокompозита: изменяются функциональные свойства; размер пор (расстояние между группами пузырьков газа); содержание формальдегида в материале. Наряду с изменением морфологии отвержденного наномодифицированного связующего на инертной и активной подложках наблюдается изменение морфологии клеевого соединения в готовой плите.

Проведен сравнительный анализ экологических показателей формальдегидных смол и фанеры на их основе. Доказано ИК-спектроскопическим, оптическим и химическим методами экологическое преимущество КФС в сравнении с ФФС. Характерные для ИК спектра КФС интенсивные пики полос

3375 см<sup>-1</sup>; 1651 см<sup>-1</sup>; 1556 см<sup>-1</sup> и 1016 см<sup>-1</sup> могут свидетельствовать о ее большей способности к химическому взаимодействию с компонентами нанокompозита по сравнению с ФФС. Лучшая гомогенизация наполнителя в смоле за счет обработки клеевой смеси ультразвуком способствует повышению реакционной способности наполнителя по отношению к смоле из-за более равномерного его распределения по объему клея. Использование НКЦ в качестве модифицирующей добавки к связующему приводит к ее химическому взаимодействию с непрореагировавшим в процессе отверждения смолы формальдегидом, что позволяет снизить содержание свободного формальдегида в связующем и эмиссию свободного формальдегида из готовой фанеры. Разница в более значительной реакционной способности к шпону смолы КФ-Ж относительно СФЖ-3014 обусловлена наличием в КФ-Ж более широкого спектра реакционноспособных групп, способных взаимодействовать с формальдегидом, что подтверждается ИК спектроскопическими исследованиями, и даёт возможность обосновывать преимущество использования карбамидоформальдегидной смолы в сравнении с фенолоформальдегидной для производства экологичного фанерного композита. Использование комплексного связующего на основе КФС, включающего активированную ультразвуком НКЦ, совместно с обработкой композитной фанеры на данном связующем импульсным электромагнитным полем, даёт возможность улучшить экологический показатель клея и фанеры: содержание свободного формальдегида в связующем уменьшается на 42,3%, эмиссия формальдегида из фанеры – на 46,2%.

Таким образом, разработанные рецепты связующего и технологический режим производства являются предпочтительными для получения нанокompозитной фанеры, отвечающей более высоким требованиям экологичности и планируемой к эксплуатации в качестве конструкционного материала в промышленном производстве.

### Заключение

1. Исследована возможность использования НКЦ в качестве бионаномодификатора карбамидоформальдегидной и фенолоформальдегидной смол при наличии активации связующего ультразвуком и

фанеры – в импульсном магнитном поле для получения нанокompозитной фанеры с улучшенными экологическими показателями.

2. Методом ИК-спектроскопии обосновано преимущество карбамидоформальдегидной смолы в сравнении с фенолоформальдегидной для производства более качественной нанокompозитной фанеры.

3. При модификации связующих нанокристаллической целлюлозой содержание свободного формальдегида снижается: при использовании КФС до 57,7% ( $p < 0,05$ ), а ФФС – до 88,1% ( $p < 0,05$ ), относительно содержания формальдегида в связующих без НКЦ в количестве 100%.

4. Установлено более значительное уменьшение эмиссии формальдегида из фанеры марки ФК в сравнении с ФСФ при введении в связующее НКЦ и аналогичной для этих марок фанеры дополнительной активации модифицированной клеевой композиции ультразвуком, а также воздействию на фанеру импульсным магнитным полем.

5. Немодифицированная фанера марки ФК имеет класс эмиссии E2, модификация связующего НКЦ для производства этой фанеры позволяет достигнуть класса эмиссии E1. Модифицированная фанера марки ФСФ соответствует классу эмиссии E2, несмотря на снижение содержания формальдегида в фанере, её класс эмиссии не изменяется.

6. Таким образом, морфологически, оптически и ИК-спектроскопически доказано образование нанокompозитной эко-фанеры на карбамидоформальдегидном связующем, модифицированном нанокристаллической целлюлозой, обладающей лучшими экологическими характеристиками.

## Список литературы

1. Fayomi O.S.I, Okwilagwe O., O. Agboola O., Oyedepo S.O, Popoola A.P.I. Assessment of composite materials in advance application: A mini overview. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 38 (5): 2402-2405. ISSN 2214-7853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.344>.
2. Saberi A., Bakhsheshi-Rad H.R., Karamian E. *et al.* Synthesis and Characterization of Hot Extruded Magnesium-Zinc Nano-Composites Containing Low Content of Graphene Oxide for Implant Applications. *Phys Mesomech*. 2021; 24: 486–502. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1029959921040135>.
3. Zhao J., Haowei M., Saberi A., Heydari Z., Baltatu, M.S. Carbon Nanotube (CNT) Encapsulated Magnesium-Based Nanocomposites to Improve Mechanical, Degradation and Antibacterial Performances for Biomedical Device Applications. *Coatings*. 2022; 12: 1589. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12101589>.
4. 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>.
5. 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. ISSN 0143-7496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103106>.
6. Sotayo A., Bradley D., Bather M., Sareh P., Oudjene M., El-Houjeiry I., Harte A.M., Mehra S., O’Ceallaigh C., Haller P., Namari S., Makradi A., Belouettar S., Bouhala L., Deneufbourg F., Guan Z. Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. *Dev Built Environ*. 2020; 1: 100004. ISSN 0144-8617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2019.100004>.
7. Tianxiang Wang, Yue Wang, Roberto Crocetti, Magnus Wålinder. In-plane mechanical properties of birch plywood. *Construction and Building Materials*. 2022; 340: 127852. ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127852>.
8. Нифталиев, Р. М. Виды древесных плит и их применение. *Агропродовольственная политика России*. 2020; 4: 40-45. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44220047>.
9. Pavlo Bekhta, Emilia-Adela Salca, Aurel Lunguleasa. Some properties of plywood panels manufactured from combinations of thermally densified and non-densified veneers of different thicknesses in one structure. *Journal of Building Engineering*. 2020; 29: 101116. ISSN 2352-7102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101116>.
10. Шишакина О. А. Полимерные композиционные материалы в строительстве. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2019; 12-2: 234-238. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42364000>.
11. Antov P., Lee S., Lubis M.A.R., Yadav S.M. Potential of Nanomaterials in Bio-Based Wood Adhesives: An Overview. In: Taghiyari, H.R., Morrell, J.J., Husen, A. (eds) *Emerging Nanomaterials*. Springer, Cham. 2023; 25-63. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-17378-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17378-3_2).
12. 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. ISSN 0144-8617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.10.115>.
13. Kristak L., Antov P., Bekhta P., Lubis M. A. R., Iswanto, A. H. Reh R., Hejna A. Recent progress in ultra-low formaldehyde emitting adhesive systems and formaldehyde scavengers in wood-based panels: a review. *Wood Material Science & Engineering*. 2022; 18(2): 763–782. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2056080>.
14. Indrayudh Mondal, Megan Groves, Erin M. Driver, Wendy Vittori, Rolf U. Halden. Carcinogenic formaldehyde in U.S. residential buildings: Mass inventories, human health impacts, and associated healthcare costs. *Science of The Total Environment*. 2024; 944: 173640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173640>.

15. Yaoxing Chen, Yongjing Rao, Peng Liu, Linlin Wu, Guojie Zhang, Jianguo Zhang, Fengwei Xie. High-amylose starch-based gel as green adhesive for plywood: Adhesive property, water-resistance, and flame-retardancy. *Carbohydrate Polymers* 2024; 339: 122247. ISSN 0144-8617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122247>.
16. Antov P., Savov V., Neykov N. Sustainable bio-based adhesives for eco-friendly wood composites. A review. *Wood Res.* 2020; 65(1): 51-62. DOI: <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/65.1.051062>.
17. Pasko Y.V., Machneva O.P. Properties of Wood-Fiber Board Manufactured with the Use of UFC-FF Modified Urea-Formaldehyde Resin. *Polym. Sci. Ser. D.* 2023; 16: 758–761. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995421223030243>.
18. Xu G., Liang J., Zhang B. et al. Performance and structures of urea-formaldehyde resins prepared with different formaldehyde solutions. *Wood Sci Technol.* 2021; 55: 1419–1437. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-021-01280-y>.
19. Yang H., Wang H., Du G., Ni K., Wu Y., Su H., Water Gao, Tan X., Yang Z., Yang L., Ran X.. Ureido hyperbranched polymer modified urea-formaldehyde resin as high-performance particleboard adhesive. *Materials.* 2023; 16(11): 4021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16114021>.
20. Danilowska A., Kowaluk G. The use of coffee bean post-extraction residues as a filler in plywood technology. *Ann WULS–SGGW for and Wood Technol.* 2020; 109: 24–31. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.3091>.
21. Jinxia Li, Fantao Ren, Xuan Liu, Guihua Chen, Xingong Li, Yan Qing, Yiqiang Wu, Ming Liu. Eco-friendly fiberboards with low formaldehyde content and enhanced mechanical properties produced with activated soybean protein isolate modified urea-formaldehyde resin. *European Polymer Journal.* 2024; 210: 113002. ISSN 0014-3057. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113002>.
22. Bayani S., Taghiyari H.R., Papadopoulos A.N. Physical and Mechanical Properties of Thermally-Modified Beech Wood Impregnated with Silver Nano-Suspension and Their Relationship with the Crystallinity of Cellulose. *Polymers.* 2019; 11: 1538. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11101538>.
23. Lirya Silva L. C. et al. Heat Transfer and Physical-Mechanical Properties Analysis of Particleboard Produced with ZnO Nanoparticles Addition. *BioResources.* 2019; 14 (4): 9904-9915. ISSN: 1930-2126. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.14.4.9904-9915>.
24. Gul W., Shah S.R.A., Khan A., Pruncu, C.I. Characterization of Zinc Oxide-Urea Formaldehyde Nano Resin and Its Impact on the Physical Performance of Medium-Density Fiberboard. *Polymers.* 2021; 13: 371. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13030371>.
25. Radosław Auriga, Aneta Gumowska, Karol Szymanowski, Anita Wronka, Eduardo Robles, Przemysław Ocipka, Grzegorz Kowaluk. Performance properties of plywood composites reinforced with carbon fibers. *Composite Structures.* 2020; 248: 112533. ISSN 0263-8223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112533>.
26. Pour M. F., Mehdinia M., Kiamahalleh M. V., Hoseini K. D., Hatefnia H., & Dorieh A. Biological durability of particleboard: fungicidal properties of Ag and Cu nanoparticles against *Trametes versicolor* white-rot fungus. *Wood Material Science & Engineering.* 2021; 17(6): 929–936. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1977996>.
27. Jovanović V., Samaržija-Jovanović S., Petković B.B. et al. Nano-silica-based urea-formaldehyde composite with some derivatives of coumarin as formaldehyde scavenger: hydrolytical and thermal stability. *Polym. Bull.* 2021; 78: 399–413. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03114-6>.
28. 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. ISSN 1359-8368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107281>.
29. Lubis M. A. R., Park B. D. Enhancing the performance of low molar ratio urea-formaldehyde resin adhesives via in-situ modification with intercalated nanoclay. *The Journal of Adhesion.* 2020; 97(14): 1271–1290. DOI: <https://doi.org/10.1080/00218464.2020.1753515>.
30. Salthammer T. Formaldehyde sources, formaldehyde concentrations and air exchange rates in European housings. // *Build Environ.* 2019; 150: 219-232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.11.096>.

31. 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. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67863743>.
32. 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. ISBN 9780081025093 DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102509-3.00025-0>.
33. Zhu J.Y., Agarwal U.P., Ciesielski P.N. et al. Towards sustainable production and utilization of plant-biomass-based nanomaterials: a review and analysis of recent developments. Biotechnol Biofuels. 2021; 14: 114. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01963-5>.
34. Savov V. Nanomaterials to Improve Properties in Wood-Based Composite Panels. In: Taghiyari, H.R., Morrell, J.J., Husen, A. (eds) Emerging Nanomaterials. Springer, Cham. 2023; 135-153. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-17378-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17378-3_5).
35. Chen C, Berglund L, Burgerd B, Hu L. Wood nanomaterials and nanotechnologies. Adv Mater. 2021; 33(28): 2006207. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202006207>.
36. Amin Moslemi, Mohsen Zolfaghari koochi, Tayebeh Behzad, Antonio Pizzi Addition of cellulose nanofibers extracted from rice straw to urea formaldehyde resin; effect on the adhesive characteristics and medium density fiberboard properties // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2020; 99: 102582. ISSN 0143-7496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102582>.

### References

1. Fayomi O.S.I, Okwilagwe O., O. Agboola O., Oyedepo S.O, Popoola A.P.I. Assessment of composite materials in advance application: A mini overview. Materials Today: Proceedings. 2021; 38 (5): 2402-2405. ISSN 2214-7853. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.344>.
2. Saberi A., Bakhsheshi-Rad H.R., Karamian E. et al. Synthesis and Characterization of Hot Extruded Magnesium-Zinc Nano-Composites Containing Low Content of Graphene Oxide for Implant Applications. Phys Mesomech. 2021; 24: 486–502. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1029959921040135>.
3. Zhao J., Haowei M., Saberi A., Heydari Z., Baltatu, M.S. Carbon Nanotube (CNT) Encapsulated Magnesium-Based Nanocomposites to Improve Mechanical, Degradation and Antibacterial Performances for Biomedical Device Applications. Coatings. 2022; 12: 1589. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12101589>.
4. 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>.
5. 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. ISSN 0143-7496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103106>.
6. Sotayo A., Bradley D., Bather M., Sareh P., Oudjene M., El-Houjeiry I., Harte A.M., Mehra S., O’Ceallaigh C., Haller P., Namari S., Makradi A., Belouettar S., Bouhala L., Deneufbourg F., Guan Z. Review of state of the art of dowel laminated timber members and densified wood materials as sustainable engineered wood products for construction and building applications. Dev Built Environ. 2020; 1: 100004. ISSN 0144-8617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2019.100004>.
7. Tianxiang Wang, Yue Wang, Roberto Crocetti, Magnus Wålinder. In-plane mechanical properties of birch plywood. Construction and Building Materials. 2022; 340: 127852. ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127852>.

8. Niftaliev R. M. Types of wood slabs and their application. *Agri-food policy of Russia*. 2020; 4: 40-45. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44220047>.
9. Pavlo Bekhta, Emilia-Adela Salca, Aurel Lunguleasa. Some properties of plywood panels manufactured from combinations of thermally densified and non-densified veneers of different thicknesses in one structure. *Journal of Building Engineering*. 2020; 29: 101116. ISSN 2352-7102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101116>.
10. Shishakina O. A. Polymer composite materials in construction. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2019; 12-2: 234-238. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42364000>.
11. Antov P., Lee S., Lubis M.A.R., Yadav S.M. Potential of Nanomaterials in Bio-Based Wood Adhesives: An Overview. In: Taghiyari, H.R., Morrell, J.J., Husen, A. (eds) *Emerging Nanomaterials*. Springer, Cham. 2023; 25-63. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-17378-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17378-3_2).
12. 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. ISSN 0144-8617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.10.115>.
13. Kristak L., Antov P., Bekhta P., Lubis M. A. R., Iswanto, A. H. Reh R., Hejna A. Recent progress in ultra-low formaldehyde emitting adhesive systems and formaldehyde scavengers in wood-based panels: a review. *Wood Material Science & Engineering*. 2022; 18(2): 763–782. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2056080>.
14. Indrayudh Mondal, Megan Groves, Erin M. Driver, Wendy Vittori, Rolf U. Halden. Carcinogenic formaldehyde in U.S. residential buildings: Mass inventories, human health impacts, and associated healthcare costs. *Science of The Total Environment*. 2024; 944: 173640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173640>.
15. Yaoxing Chen, Yongjing Rao, Peng Liu, Linlin Wu, Guojie Zhang, Jianguo Zhang, Fengwei Xie. High-amylose starch-based gel as green adhesive for plywood: Adhesive property, water-resistance, and flame-retardancy. *Carbohydrate Polymers* 2024; 339: 122247. ISSN 0144-8617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122247>.
16. Antov P., Savov V., Neykov N. Sustainable bio-based adhesives for eco-friendly wood composites. *A review. Wood Res*. 2020; 65(1): 51-62. DOI: <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/65.1.051062>.
17. Pasko Y.V., Machneva O.P. Properties of Wood-Fiber Board Manufactured with the Use of UFC-FF Modified Urea-Formaldehyde Resin. *Polym. Sci. Ser. D*. 2023; 16: 758–761. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995421223030243>.
18. Xu G., Liang J., Zhang B. et al. Performance and structures of urea-formaldehyde resins prepared with different formaldehyde solutions. *Wood Sci Technol*. 2021; 55: 1419–1437. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00226-021-01280-y>.
19. Yang H., Wang H., Du G., Ni K., Wu Y., Su H., Water Gao, Tan X., Yang Z., Yang L., Ran X.. Ureido hyperbranched polymer modified urea-formaldehyde resin as high-performance particleboard adhesive. *Materials*. 2023; 16(11): 4021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16114021>.
20. Danilowska A., Kowaluk G. The use of coffee bean post-extraction residues as a filler in plywood technology. *Ann WULS-SGGW for and Wood Technol*. 2020; 109: 24–31. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.3091>.
21. Jinxia Li, Fantao Ren, Xuan Liu, Guihua Chen, Xingong Li, Yan Qing, Yiqiang Wu, Ming Liu. Eco-friendly fiberboards with low formaldehyde content and enhanced mechanical properties produced with activated soybean protein isolate modified urea-formaldehyde resin. *European Polymer Journal*. 2024; 210: 113002. ISSN 0014-3057. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113002>.
22. Bayani S., Taghiyari H.R., Papadopoulou A.N. Physical and Mechanical Properties of Thermally-Modified Beech Wood Impregnated with Silver Nano-Suspension and Their Relationship with the Crystallinity of Cellulose. *Polymers*. 2019; 11: 1538. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11101538>.
23. Lirya Silva L. C. et al. Heat Transfer and Physical-Mechanical Properties Analysis of Particleboard Produced with ZnO Nanoparticles Addition. *BioResources*. 2019; 14 (4): 9904-9915. ISSN: 1930-2126. DOI: <https://doi.org/10.15376/biores.14.4.9904-9915>.

24. Gul W., Shah S.R.A., Khan A., Pruncu, C.I. Characterization of Zinc Oxide-Urea Formaldehyde Nano Resin and Its Impact on the Physical Performance of Medium-Density Fiberboard. *Polymers*. 2021; 13: 371. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13030371>.
25. Radosław Auriga, Aneta Gumowska, Karol Szymanowski, Anita Wronka, Eduardo Robles, Przemysław Ocipka, Grzegorz Kowaluk. Performance properties of plywood composites reinforced with carbon fibers. *Composite Structures*. 2020; 248: 112533. ISSN 0263-8223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112533>.
26. Pour M. F., Mehdinia M., Kiamahalleh M. V., Hoseini K. D., Hatfania H., & Dorieh A. Biological durability of particleboard: fungicidal properties of Ag and Cu nanoparticles against *Trametes versicolor* white-rot fungus. *Wood Material Science & Engineering*. 2021; 17(6): 929–936. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1977996>.
27. Jovanović V., Samaržija-Jovanović S., Petković B.B. et al. Nano-silica-based urea–formaldehyde composite with some derivatives of coumarin as formaldehyde scavenger: hydrolytical and thermal stability. *Polym. Bull.* 2021; 78: 399–413. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00289-020-03114-6>.
28. 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. ISSN 1359-8368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107281>.
29. Lubis M. A. R., Park B. D. Enhancing the performance of low molar ratio urea–formaldehyde resin adhesives via in-situ modification with intercalated nanoclay. *The Journal of Adhesion*. 2020; 97(14): 1271–1290. DOI: <https://doi.org/10.1080/00218464.2020.1753515>.
30. Salthammer T. Formaldehyde sources, formaldehyde concentrations and air exchange rates in European housings. // *Build Environ*. 2019; 150: 219-232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.11.096>.
31. 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. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=67863743>.
32. 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. ISBN 9780081025093 DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102509-3.00025-0>.
33. Zhu J.Y., Agarwal U.P., Ciesielski P.N. et al. Towards sustainable production and utilization of plant-biomass-based nanomaterials: a review and analysis of recent developments. *Biotechnol Biofuels*. 2021; 14: 114. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01963-5>.
34. Savov V. Nanomaterials to Improve Properties in Wood-Based Composite Panels. In: Taghiyari, H.R., Morrell, J.J., Husen, A. (eds) *Emerging Nanomaterials*. Springer, Cham. 2023; 135-153. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-17378-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-17378-3_5).
35. Chen C, Berglund L, Burgerd B, Hu L. Wood nanomaterials and nanotechnologies. *Adv Mater*. 2021; 33(28): 2006207. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202006207>.
36. Amin Moslemi, Mohsen Zolfagharlou koochi, Tayebeh Behzad, Antonio Pizzi Addition of cellulose nanofibers extracted from rice straw to urea formaldehyde resin; effect on the adhesive characteristics and medium density fiberboard properties // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2020; 99: 102582. ISSN 0143-7496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102582>.

### 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).

*Жужукин 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).

### 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).

✉ Для контактов | Corresponding author