

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/13>

УДК 674-419.32



Магнитообработанный композиционный материал для производства фанеры на основе уплотненного шпона осины (*Populus tremula* L.) и комплексного связующего с нанокристаллической целлюлозой

Екатерина В. Ющенко , katerina.vgltu@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-4827-2756>

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

В статье исследовано влияние комплексного воздействия технологических факторов на свойства композиционного материала при производстве фанеры из осинового шпона, используемой для получения блоков LVL, применяемых в строительстве. Для производства композиционной фанеры предложено использование уплотненного прокаткой шпона осины и комплексного связующего, включающего фенолоформальдегидную смолу марки СФЖ-3014 и нанокристаллическую целлюлозу, обработанного в ультразвуковом поле, при наличии электромагнитного воздействия на готовую фанеру импульсным магнитным полем. Введение в связующее 2 мас.% нанокристаллической целлюлозы позволило получить фанеру, обладающую повышенными физико-механическими показателями: пределом прочности при статическом изгибе (на 155 %), при скалывании по клеевому шву (на 330%), ударной вязкостью при изгибе (на 144 %). Гидрофобизация шпона карданолом обеспечила уменьшение влагопоглощения фанеры (на 300 %) и разбухания в направлении прессования (на 125 %). Исследование выполнено по плану Хартли с варьируемыми факторами: содержание нанокристаллической целлюлозы в связующем (от 2 до 6 мас.%), давление прессования (от 3 до 9 МПа), время воздействия импульсного магнитного поля (от 1 до 9 мин).

Ключевые слова: нанокристаллическая целлюлоза, фанера, модификация, фенолоформальдегидная смола, ультразвук, импульсное магнитное поле, осина, *Populus tremula* L.

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: Ющенко, Е. В. Магнитообработанный композиционный материал для производства фанеры на основе уплотненного шпона осины (*Populus tremula* L.) и комплексного связующего с нанокристаллической целлюлозой / Е. В. Ющенко // Лесотехнический журнал. – 2024. – Т. 14. – № 1 (53). – С. 219–237. – Библиогр.: с. 234–237 (22 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/13>.

Поступила 29.01.2024. Пересмотрена 19.02.2024. Принята 29.02.2024. Опубликована онлайн 20.03.2024.

Article

Magnetically processed composite material for the production of plywood based on compacted aspen veneer (*Populus tremula* L.) and a complex binder with nanocrystalline cellulose

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

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

Abstract

The article examines the effect of the complex effect of technological factors on the properties of a composite material in the production of aspen veneer plywood used for the production of LVL blocks used in construction. To obtain composite plywood, it is proposed to use an aspen veneer compacted by rolling and a complex binder including phenol-formaldehyde resin of the SFG-3014 brand and nanocrystalline cellulose treated in an ultrasonic field, in the presence of electromagnetic action on the finished plywood by a pulsed magnetic field. Introduction to binder 2 wt. The use of nanocrystalline cellulose made it possible to obtain plywood with increased physical and mechanical properties: tensile strength during static bending (at 155 %), when chipping along the adhesive seam (at 330 %), impact strength during bending (at 144 %). The hydrophobization of the veneer with cardanol ensured a decrease in moisture absorption of plywood (at 300 %) and swelling in the direction of pressing (at 125 %). The study was carried out according to the Hartley plan with varying factors: the content of nanocrystalline cellulose in the binder (from 2 to 6 wt.%), pressing pressure (from 3 to 9 MPa), exposure time to a pulsed magnetic field (from 1 to 9 min).

Keywords: *nanocrystalline cellulose, plywood, modification, phenol-formaldehyde resin, ultrasound, pulsed magnetic field, aspen, Populus tremula* L.

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. (2024). Magnetically processed composite material for the production of plywood based on compacted aspen veneer (*Populus tremula* L.) and a complex binder with nanocrystalline cellulose. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 14, No. 1 (53), pp. 219-237 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2024.1/13>.

Received 29.01.2024. **Revised** 19.02.2024. **Accepted** 29.02.2024. **Published online** 20.03.2024.

Введение

Изделия из клееной древесины, в том числе фанера, занимают значительное место в готовой продукции современных деревообрабатывающих предприятий. Мировой объем производства фанеры ежегодно составляет в среднем около 170 млн м³. За прошлый год по данным Росстата объем производства фанеры для российского рынка составил 3,241 млн м³. Р. М. Нифталиев и А. А. Побединский [1] от-

носят фанеру к эффективным видам древесных композиционных материалов и отмечают ряд достоинств фанеры сравнительно с клееными балками и пиломатериалами. Использование 1 м³ фанеры в качестве обшивочного материала аналогично применению 3,3 м³ пиломатериалов. А. В. Чуркина [2] подчеркивает, что фанера получила широкое распространение благодаря возможности прогнозирования необходимых свойств, получаемых за счёт струк-

турных изменений в технологии изготовления. Основными недостатками фанеры является ее низкая стойкость к влаге и механическому воздействию.

Современными учеными непрерывно ведутся работы по поиску возможных методов улучшения физико-механических показателей фанеры. Одним из них является замена традиционного связующего. Так, Hangbo Yue и др. [3] анализируется возможность применения клеев на биологической основе, полученных из разного рода растительных белков. Однако, применение в чистом виде подобного связующего не представляется возможным, ввиду того, что его адгезионная прочность и водостойкость находятся на достаточно низком уровне. Соответственно, возникает необходимость дополнительной обработки, к которой можно отнести различные методы химической и физической модификации. Yongbo Jia и др. [4] в качестве связующего рассматривается применение желатинизированного кукурузного крахмала, модифицированного дигидрофосфатом аммония, что дает возможность получения огнестойкой фанеры с использованием экологичного клея.

Влияние связующего на физико-механические показатели фанеры рассмотрены в научных трудах современных учёных. А. А. Федотовым и А. В. Юдиным [5] установлено, что фанера на основе пленки вторичного полиэтилена низкой плотности по своим характеристикам уступает фанере марки ФСФ, но превосходит фанеру марки ФК. Работа с аналогичным связующим представлена Siqi Zheng и др. [6], в которой оптимальные физико-механические параметры достигались при увеличении времени горячего прессования.

В работах А. Р. Абдразаковой и др., Д. Н. Николаевой и др. [7, 8] показан экологический аспект при использовании разного типа связующего в технологическом процессе производства фанеры.

В.А. Шамаев и др. [9] отмечают, что производство композиционной фанеры позволяет получить новый более качественный материал с высокими физико-механическими показателями, такими как легкость, устойчивость к химическому воздействию, низкое влагопоглощение и др., что позволяет существенно расширить спектр применения композиционной фанеры.

Е. М. Разиньковым в работе [10] показано, что наиболее рациональным и экономически выгодным методом улучшения физико-механических показателей фанеры является введение в клеевую смесь модификаторов, повышающих когезионную и адгезионную прочность связующего.

А. А. Федотовым и др. [11] приводятся результаты комплексного исследования по применению различного рода модификаторов связующего при производстве фанеры марки ФСФ. Среди рассмотренных модифицирующих добавок диметилглиоксим и сульфосалициловая кислота обеспечивают лучшие прочностные показатели. Отмечается также, что хорошие качественные показатели материала достигаются при использовании модификаторов в виде хлорида железа и магния.

Д. С. Русаковым и др. [12] предложено в качестве модификатора использование техногенных отходов, образующихся при производстве алюминия. Применение фенолоформальдегидных смол, модифицированных угольной пылью электрофильтров алюминиевого производства способствует увеличению прочности фанеры до 50 %.

Kaihong Tang и др. [13] показаны методы синтеза модифицированной фенольной смолы за счёт полимеризационной и пердполимеризационной модификации. Отмечено, что указанные методы могут применяться и совместно для получения комплексных модифицированных фенольных материалов с улучшенными свойствами. С целью улучшения прочности фанеры Aydin Demir [14] исследовал танин валонии, полученный из желудя турецкого дуба, в качестве модификатора для карбамидоформальдегидной смолы. Electra Papadopoulou и др. [15] модифицировала фенолформальдегидные смолы электрохимически обработанным лигнином. Необходимо отметить, что при использовании данных модификаторов, наряду с уменьшением выделения формальдегида, снижались и прочностные характеристики плит.

Ali Reza Zanjanijam и др. [16] обосновывают возможность применения порошка каменного угля в качестве армирующей добавки к фенольной смоле.

S. Anirudh и др., Mengjie Wang и др., Е. В. Ющенко и К. В. Жужукин [17-19] исследовали

модифицирование связующего углеродными нанотрубками для улучшения физико-механических показателей древесных композитных материалов.

Ali Dorieh и др., К. В. Жужукиным и др. [20, 21] с целью улучшения технологических свойств фанеры проводилось изучение влияния нанокристаллической целлюлозы (НКЦ) в качестве наполнителя фенолформальдегидного связующего.

О. Ф. Шишловым и др. [22] экспериментально доказано положительное влияние карданола на водостойкость древесных композиционных материалов при использовании его в качестве модифицирующей добавки к фенолформальдегидной смоле.

Несмотря на многочисленные исследования в области оптимизации параметров производства и физико-механических показателей фанеры для повышения ее прочностных характеристик, наблюдается противоречивость в изменении параметров, когда улучшение одного из показателей приводит к снижению ряда других. Это обстоятельство создаёт необходимость дальнейшего изучения актуальной задачи улучшения качества композиционной фанеры.

В связи с целевым назначением исследуемой модифицированной фанеры, используемой для производства блоков LVL повышенной прочности, необходимы изменения в технологии получения фанеры, заключающиеся в добавлении в связующее наноцеллюлозы, дополнительном уплотнении шпона, ультразвуковой и электромагнитной обработки связующего, а также обработке шпона карданола. Блоки LVL, в свою очередь, будут использоваться в строительстве, что определяет условия их эксплуатации и объясняет необходимость применения вышеуказанной дополнительной обработки.

Целью данной работы является исследование влияния технологических факторов производства: давления прессования, содержания наноцеллюлозы в связующем, времени воздействия импульсного магнитного поля на физико-механические показатели композиционной фанеры марки ФСФ, изготовленной на основе уплотненного шпона осины (*Populus tremula* L.) и комплексного связующего, включающего фенолформальдегидную смолу, модифицированную НКЦ.

Материалы и методы

- Объект и предмет исследований

Объектом исследования является фанера марки ФСФ, изготовленная из шпона осины (*Populus tremula* L.). Для осуществления эксперимента использованы образцы модифицированной композиционной фанеры и образцы фанеры, полученной в соответствии со стандартным режимом прессования.

Предмет исследования – влияние нанокристаллической целлюлозы в качестве модифицирующей добавки к связующему в виде смолы СФЖ-3014 (ГОСТ 20907–2016) на физико-механические показатели фанеры марки ФСФ.

- Дизайн эксперимента

Для получения композиционной фанеры использовали исходные материалы:

- шпон осиновый, размер 500×500 мм, толщиной 4 мм и влажностью $8\pm 2\%$ без видимых дефектов (производство ООО «Галичский фанерный комбинат», Галич, Россия);

- смола фенолформальдегидная СФЖ-3014 (производство ПАО «Уралхимпласт», Н.Тагил, Россия);

- нанокристаллическая целлюлоза дисперсностью 300-900 нм (производство Nanografi Nano Technology, Ankara, Turkey).

Свойства полученной композиционной фанеры сравнивали с физико-механическими показателями контрольного образца, изготовленного в виде пятислойной фанеры на основе лущеного осинового шпона номинальной толщиной 4 мм, предварительно высушенного до влажности ($7\pm 1\%$) (ГОСТ 99–2016) и связующего – смолой СФЖ-3014 без модификатора. После нанесения связующего и формирования пакета проводилось горячее прессование в гидравлическом прессе ПД476 с обогреваемыми плитами (усилие 160 тнс, производство ОАО «Гидропресс», Оренбург) по следующему режиму: время выдержки в прессе – 20 мин., удельное давление прессования – 2,2 МПа, температура плит пресса – 140 °С, расход связующего – 155 г/м².

Экспериментальные образцы изготавливали из шпона, который предварительно пластифицировали: выдерживали в течение трех часов при температуре 18 °С в 30 %-м водном растворе карбамида технического марки Б. Далее шпон прокатывали в

отапливаемом прокатном стане (производство ООО «Модификация», Воронеж, Россия) при температуре вальцов 150 °С до степени уплотнения 30 %. Уплотнение происходило за счет уменьшения объема пор древесины из-за потери устойчивости их оболочек при сжатии. Плотность контрольного и модифицированного образца шпона определяли согласно ГОСТ 20800-75. Далее шпон дополнительно пропитывали гидрофобизатором – карданолом с последующей сушкой в сушильной камере в течение 3 часов при температуре 70 °С. Связующее с модификатором для лучшего смешивания и химического взаимодействия компонентов смеси обрабатывалось в ультразвуковой установке УЗК 1,3 с рабочей частотой 24 кГц. Проводилась серия экспериментов из пятнадцати опытов. Клей наносили на шпон шпателем. При формировании пакета фанеры направление

волокон в шпоне было взаимно перпендикулярным в каждом последующем слое в отличие традиционной технологии производства LVL. Прессование осуществлялось при постоянных параметрах: расход связующего – 155 г/м², время выдержки в прессе – 20 минут, температура плит пресса – 140 °С.

Перед испытанием все образцы фанеры выдерживались в течение 1 суток при 18±2 °С и относительной влажности 65±5 %. Далее фанера подвергалась воздействию импульсного магнитного поля (ИМП) на установке ИМП-1 (напряженность 18·10⁴ А/м). Затем фанера раскраивалась для проведения дальнейших испытаний.

Характеристика шпона осины представлена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристика шпона осины

Table 1

Characteristics of aspen veneer

Параметр Parameter	Величина Value
Влажность, % Humidity, %	8
Длина, мм Length, mm	500
Ширина, мм Width, mm	500
Толщина, мм Thickness, mm	4
Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	450

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Гидрофобизатором в данной работе выступает карданол, фенолсодержащий мономер растительного происхождения, содержащий в м-положении ненасыщенный линейный С₁₅ – алкильный заместитель. Это смесь алкилфенолов, состоящую

преимущественно из 3-(8/Z)-пентадеценил (фенола), 3-(8/ Z),11/ Z) – пентадекдиенил) фенола и 3-(8/ Z), (11/ Z), 14 – пентадекатриенил) – фенола. Характеристика карданолола показана в табл. 2.

Таблица 2

Характеристика карданолола

Table 2

Characteristics of cardanol

Параметр Parameter	Величина Value
Плотность, г/см ³ Density, kg/m ³	0,93
Вязкость, сП Viscosity, sP	55
Йодное число, г I ₂ /100 г Iodine number, g I ₂ /100 g	317
Гидроксильное число Hydroxyl number	181

Источник: публичное акционерное общество «Уралхимпласт», г. Н. Тагил

Source: public joint stock company «Uralkhimplast», N. Tagil

Матрицей комплексного связующего является фенолформальдегидная смола марки СФЖ-

3014, характеристика которой представлена в табл. 3.

Таблица 3

Характеристика смолы СФЖ-3014

Table 3

Characteristics of SFG-3014 resin

Параметр Parameter	Величина Value
Плотность, г/см ³ Density, kg/m ³	1,2
Условная вязкость, с Conditional viscosity, s	75
Сухой остаток, % Dry residue, %	50
Массовая доля щелочи, % Mass fraction of alkali, %	6,2
Массовая доля свободного фенола, % Mass fraction of free phenol, %	0,1
Массовая доля свободного формальдегида, % Mass fraction of free phenol, %	0,1
Предел прочности при скалывании по клеевому слою фанеры после кипячения в течение 1 ч, МПа Tensile strength when chipping on an adhesive layer of plywood after boiling for 1 h, МПа	1,47

Источник: публичное акционерное общество «Уралхимпласт», г. Н.Тагил

Source: public joint stock company «Uralkhimplast», N. Tagil

Компонентом комплексного связующего является нанокристаллическая целлюлоза. Её характеристики даны в табл. 4.

Таблица 4

Характеристика нанокристаллической целлюлозы

Table 4

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 нанокристаллической целлюлозы (ТГА в N ₂), °С Decomposition Temperature of Crystalline Nanocellulose (TGA in N ₂), °C	349
Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³	1,49
Объемная плотность, г/см ³ Bulk Density, g/cm ³	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
Проводимость, дисперсный порошок при 2% (по массе), мСм Conductivity, dispersed powder at 2% (w/w), μS	<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/>

Деревопереработка. Химические технологии

Для обработки композиционной фанеры использовали генератор импульсного магнитного поля.

Его технические характеристики представлены в табл. 5.

Таблица 5

Технические характеристики генератора импульсного магнитного поля

Table 5

Generator Specifications pulsed magnetic field

Параметр Parameter	Величина Value
Количество заготовок, шт Number of blanks, pcs	1
Форма импульса The shape of the pulse	треугольная triangular
Сила тока в импульсе, кА The current in the pulse, kA	2
Индуктивность соленоида, мкГн Inductance of the solenoid, mkH	5-10
Частота подачи импульсов, Гц Pulset frequency, Hz	100
Напряженность, А/м Tension, A/m	$18 \cdot 10^4$
Длительность импульса, мкс Pulse duration, mks	10
Число импульсов при обработке The number of pulses during processing	3000/6000
Размер заготовок, мм The size of the workpieces, mm	50x50x100
Длительность обработки образцов, с Duration of sample processing, s	30/60
Максимальная индукция магнитного поля, Тл Maximum magnetic field induction, T	0,3
Плотность намотки соленоида, витков/метр The winding density of the solenoid, turns/meter	180

Источник: ВГЛТУ, Лаборатория физико-механических измерений древесины, РФ
Source: VSUFT, Laboratory of Physical and Mechanical Measurements of Wood, RF

Комплексное связующее для производства композиционной фанеры обрабатывалось в ультразвуковой ванне.

Технические характеристики ультразвуковой ванны приведены в табл. 6.

Таблица 6

Технические характеристики ультразвуковой ванны

Table 6

Specifications of ultrasonic cleaner

Параметр Parameter	Величина Value
Габариты рабочей емкости, м Working container dimensions, m	0,12x0,11x0,1
Рабочий объем, м ³ Working volume, m ³	$1,3 \cdot 10^{-3}$
Рабочая частота, кГц Operating frequency, kHz	$24,0 \pm 7,5\%$
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

Отбор образцов для испытания физико-механических показателей проводился в соответствии с ГОСТ 9620-94.

Определение предела прочности при скалывании по клеевому слою и статическом изгибе про-

водили на испытательной машине УМ-5А с максимальным разрушающим усилием до 5000 Н (по ГОСТ 28840-90).

Испытание на прочность при скалывании по клеевому слою осуществлялось согласно ГОСТ 9624–2009. Для испытания использовали десять образцов. Предварительно испытуемые образцы подвергались выдержке в кипящей воде в течение 1 ч с последующей выдержкой при комнатной температуре в течение (10±1 мин). Результаты испытаний рассчитывали, как среднее арифметическое из десяти полученных значений.

Прочность фанеры при статическом изгибе определялась согласно ГОСТ 9625–2013. Для испытания использовали шесть образцов: половина образцов располагалась верхней пластью вверх, другая половина – верхней пластью вниз. Прочность фанеры при статическом изгибе определялась как среднее арифметическое из шести полученных значений.

Ударная вязкость при изгибе определялась согласно ГОСТ 9626–90 по шести образцам как среднее арифметическое значение.

Определение влагопоглощения проводили по методике ГОСТ 21523.6-77. Для эксперимента использовали тридцать образцов. Величину влагопоглощения рассчитывали по среднему значению.

Используя план Хартли, построили матрицу планирования для трех входных факторов. Матрица состоит из точек полнофакторного эксперимента, к которому добавлено 6 звездных точек и 1 центральный опыт. Общее число опытов таким образом равно $N=8+6+1=15$.

Для упрощения и унифицирования записи условий опытов, облегчения обработки экспериментальных данных вводятся нормализованные обозначения факторов по формуле:

$$x_j = \frac{\tilde{x}_j - \tilde{x}_{j^0}}{J_j}, \quad (1)$$

где X_j – кодированное значение фактора;
 \tilde{X}_j – натуральное значение фактора;
 \tilde{x}_{j^0} – натуральное значение основного уровня;

J_j – интервал варьирования.

Для эксперимента были выбраны следующие постоянные факторы:

тепелъ прессования шпона, $\varepsilon = 30 \%$;
 температура прокатки шпона, $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$;
 содержание карданола, $C = 100 \text{ г/м}^2$;
 время активации НКЦ ультразвуком,
 $t = 20 \text{ мин}$;
 температура горячего пресса, $T = 140 \text{ }^\circ\text{C}$;
 время выдержки в прессе, $t = 20 \text{ мин}$.

Входные факторы:

X_1 – содержание НКЦ в смоле, мас.%;
 X_2 – давление прессования, МПа;
 X_3 – время обработки импульсным магнитным полем, мин.

Выходные факторы:

Y_1 – предел прочности при скалывании, МПа;
 Y_2 – предел прочности при статическом изгибе, МПа;
 Y_3 – разбухание в направлении прессования при водопоглощении, %.

В табл. 7 приведена матрица планирования эксперимента в кодированных значениях факторов.

Таблица 7

Матрица планирования эксперимента

Table 7

Experiment planning matrix

№	X ₁	X ₂	X ₃
1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1
3	+1	-1	+1
4	-1	-1	+1
5	+1	+1	-1
6	-1	+1	-1
7	+1	-1	-1
8	-1	-1	-1
9	+1	0	0
10	-1	0	0
11	0	+1	0
12	0	-1	0
13	0	0	+1
14	0	0	-1
15	0	0	0

Источник: собственные вычисления автора
Source: own calculations

В табл. 8 представлены граничные условия технологических факторов и интервалы их варьирования.

Таблица 8

Граничные условия входных факторов

Table 8

Boundary conditions of input factors

Код Code	Фактор Factor	Уровень варьирования The level of variation		
		-	0	+
X ₁	Содержание нанокристаллической целлюлозы в смоле, мас.% The content of nanocrystalline cellulose in resin, wt. %	2	4	6
X ₂	Давление прессования, МПа Pressing pressure, МПа	5	9	13
X ₃	Время обработки импульсным магнитным полем, мин Processing time by pulsed magnetic field, min	1	5	9

Источник: собственные вычисления автора
Source: own calculations

Матрица планирования эксперимента в натуральных значениях факторов приведена в табл. 9.

Матрица планирования эксперимента в натуральных значениях факторов

Table 9

Experiment planning matrix in natural values of factors

№	X ₁	X ₂	X ₃
1	6	13	9
2	2	13	9
3	6	5	9
4	2	5	9
5	6	13	1
6	2	13	1
7	6	5	1
8	2	5	1
9	6	9	5
10	2	9	5
11	4	13	5
12	4	5	5
13	4	9	9
14	4	9	1
15	4	9	5

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

- Анализ данных

Для определения достоверности аппроксимации использовали коэффициент детерминации R² (R-SQUARED). Для расчетов использовали программу Excel 2016.

Результаты

Обработка результатов исследований методом наименьших квадратов позволила получить уравнения зависимости между технологическими параметрами (давление прессование, содержание НКЦ в связующем, время воздействия ИМП) и показателями физико-механических свойств (предел прочности при скалывании и предел прочности при статическом изгибе). Изменение предела прочности при скалывании и предела прочности при статическом изгибе в натуральных значениях описывается уравнением:

$$\tau_{ск} = 0,398 - 0,447 \cdot X_1 + 0,153 \cdot X_2 + 0,099 \cdot X_3 + 0,059 \cdot X_1^2 + 0,003 \cdot X_2^2 + 0,003 \cdot X_3^2 - 0,018 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,004 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,015 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (2)$$

где $\tau_{ск}$ – предел прочности при скалывании;

$$\sigma = -5,267 + 3,652 \cdot X_1 + 3,865 \cdot X_2 + 5,598 \cdot X_3 - 0,152 \cdot X_1^2 - 0,090 \cdot X_2^2 - 0,232 \cdot X_3^2 - 0,118 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,379 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,258 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (3)$$

где σ – предел прочности при статическом изгибе;

Наилучший результат определен при следующих значениях входных факторов:

- содержание НКЦ в смоле – 2 мас.%;
- давление прессования – 13 МПа;
- время обработки импульсным магнитным полем – 1 мин.

Значения выходных факторов, полученных по оптимальным показателям входных факторов для пятислойной фанеры из шпона осины:

- предел прочности при скалывании по клеевому слою: 2,1 МПа,
- предел прочности при статическом изгибе: 36,5 МПа.

Коэффициент детерминации R² для показателя предела прочности при скалывании равен 0,91, для показателя предела прочности при статическом

изгибе – 0,98, что свидетельствует о высокой степени корреляции теоретических расчетов и экспериментальных данных.

Определены: среднее значение предела прочности контрольных образцов фанеры из шпона осины при статическом изгибе вдоль волокон, равное 25,6 МПа, предел прочности при скалывании по

клеевому слою после кипячения в течение 1 ч – 0,6 МПа, которые соответствуют значениям действующих ГОСТ.

Результаты исследований предела прочности при скалывании по клеевому слою для экспериментальных образцов приведены в табл. 10.

Таблица 10

Предел прочности при скалывании по клеевому слою

Table 10

Tensile strength when chipping along the adhesive layer

№ образца Sample №	Предел прочности при скалывании по клеевому слою $\tau_{ск}$, МПа Tensile strength when chipping along the adhesive layer $\tau_{ск}$, МПа	№ образца Sample №	Предел прочности при скалывании по клеевому слою $\tau_{ск}$, МПа Tensile strength when chipping along the adhesive layer $\tau_{ск}$, МПа
1	0,36	9	0,02
2	0,74	10	1,10
3	0,08	11	0,64
4	1,07	12	0,10
5	0,58	13	0,28
6	2,00	14	0,45
7	0,49	15	0,39
8	0,16	-	-

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

Анализируя табличные данные, установлено для образца № 6 максимальное значение показателя предела прочности при скалывании по клеевому слою, равное 2 МПа., клеевая композиция которого включала НКЦ в сухом виде в количестве 2 мас.%. Наиболее низкое значение показателя определили при испытании образцов № 3 и 9, в которых содержание НКЦ в смоле равно 6 мас.%, что в 3 раза превышает количество НКЦ в шестом образце. Повышение содержания НКЦ в связующем не приводит к увеличению прочности, что свидетельствует об эффекте малых добавок при модификации связующего фанеры.

Характер разрушения образцов после испытания на скалывание по клеевому слою представлен на рис. 1.



Рисунок 1. Характер разрушения образцов после проведения испытания на скалывание по клеевому слою: 1) – контрольный образец; 2) – образец, изготовленный по оптимальному режиму
Figure 1. The nature of the destruction of the samples after the cleavage test on the adhesive layer:
1) – a control sample; 2) – a sample made according to the optimal mode

Источник: собственная композиция автора

Source: author's composition

По характеру разрушения образцов, представленных на рис. 1, видно, что, у образца, изготовленного по оптимальному режиму (содержание НКЦ в смоле – 2 мас.%; давление прессования – 13 МПа; время обработки импульсным магнитным

полем – 1 мин), адгезионные показатели клея с добавлением модификатора, как и прогнозировалось, улучшились по сравнению с контрольным образцом. В табл. 11 отражены результаты исследований предела прочности при статическом изгибе.

Таблица 11

Предел прочности при статическом изгибе

Table 11

Static bending strength

№ образца Sample №	Предел прочности при статическом изгибе σ , МПа Static bending strength σ , МПа	№ образца Sample №	Предел прочности при статическом изгибе σ , МПа Static bending strength σ , МПа
1	21,56	9	28,46
2	21,50	10	36,53
3	17,79	11	34,80
4	34,20	12	28,52
5	30,28	13	24,77
6	38,33	14	34,02
7	30,22	15	30,45
8	14,24	-	-

Источник: собственные вычисления автора
Source: own calculations

В результате анализа полученных данных определён наибольший показатель предела прочности при статическом изгибе для образца № 6, давление прессования которого принимали равным 13 МПа. Наиболее низкое значение показателя получили при испытании образцов № 3 и 8, давление прессования в этом случае более низкое 5 МПа.

Характер разрушения образцов после испытания на предел прочности при статическом изгибе представлен на рис. 2.

Тип разрушения образцов, представленных на рис. 2, неодинаков: при низких значениях давления прессования разрушение образцов фанеры проходило по второму слою, при более высоких значениях давления образец разрушался по второму и четвертому слоям.

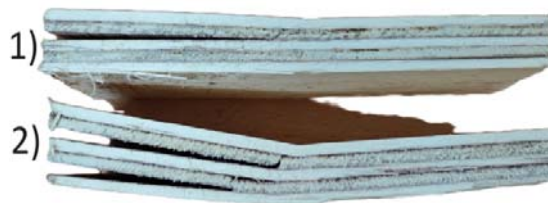


Рисунок 2. Характер разрушения образцов после проведения испытания на предел прочности при статическом изгибе: 1) контрольный образец; 2) образец, изготовленный по оптимальному режиму

Figure 2. The nature of the destruction of the samples after the static bending tensile test: 1) a control sample; 2) a sample made according to the optimal mode

Источник: собственная композиция автора
Source: author's composition

Различный характер разрушения образцов (контрольных и изготовленных по оптимальному режиму) при испытании предела прочности при скалывании по клеевому слою и предела прочности при

статическом изгибе аргументируется возникновением дополнительных межмолекулярных связей между связующим и шпоном после введения в смолу модификатора – наноцеллюлозы. В связи с этим наблюдается когезионный характер разрушения образцов модифицированной фанеры.

На графиках 1 и 2 показаны зависимость предела прочности при статическом изгибе от содержа-

ния НКЦ в смоле и давления прессования при постоянном значении времени воздействия ИМП (график 1) и зависимость предела прочности при скальвании по клеевому слою от содержания НКЦ в смоле и давления прессования при постоянном значении времени воздействия ИМП (график 2).

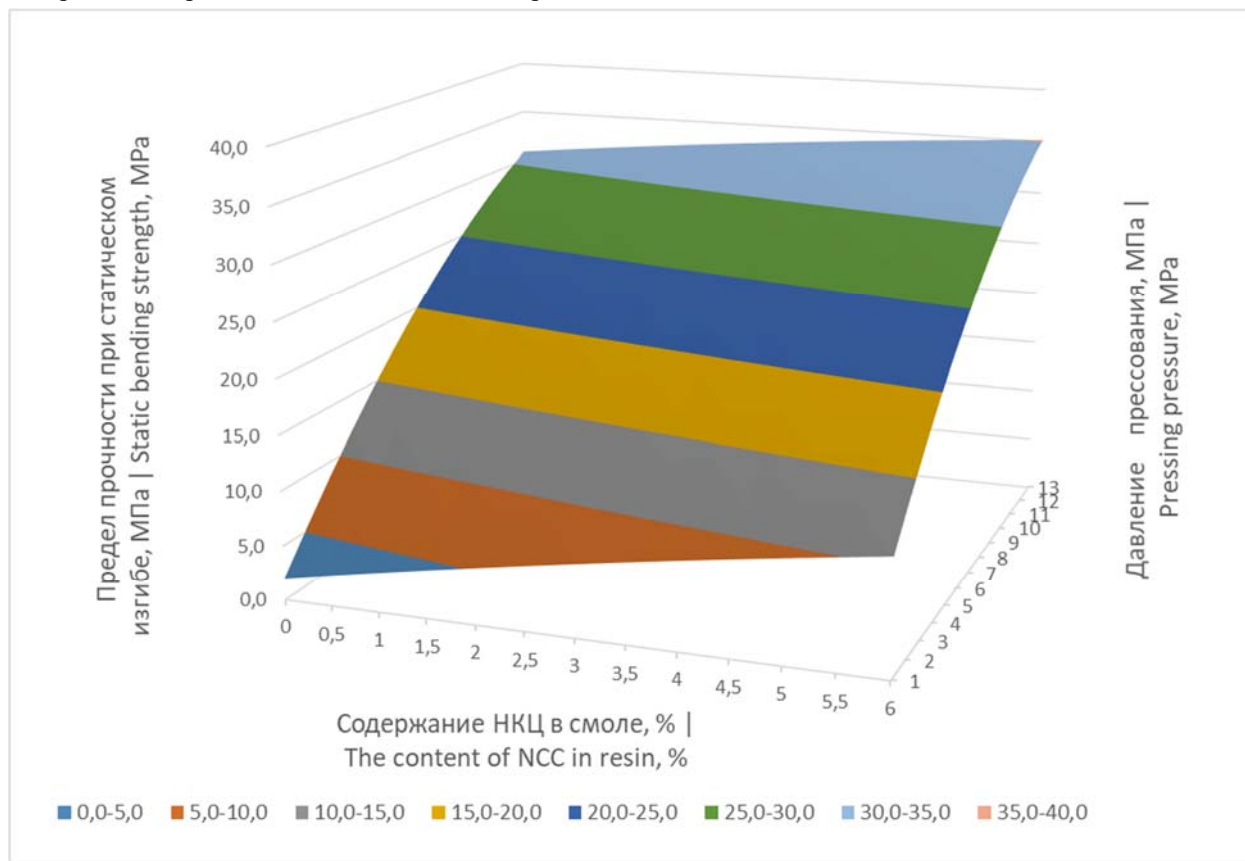


График 1. Зависимость предела прочности при статическом изгибе от содержания НКЦ в смоле и давления прессования

Graph 1. Dependence of the static bending strength on the NCC content in the resin and the pressing pressure

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

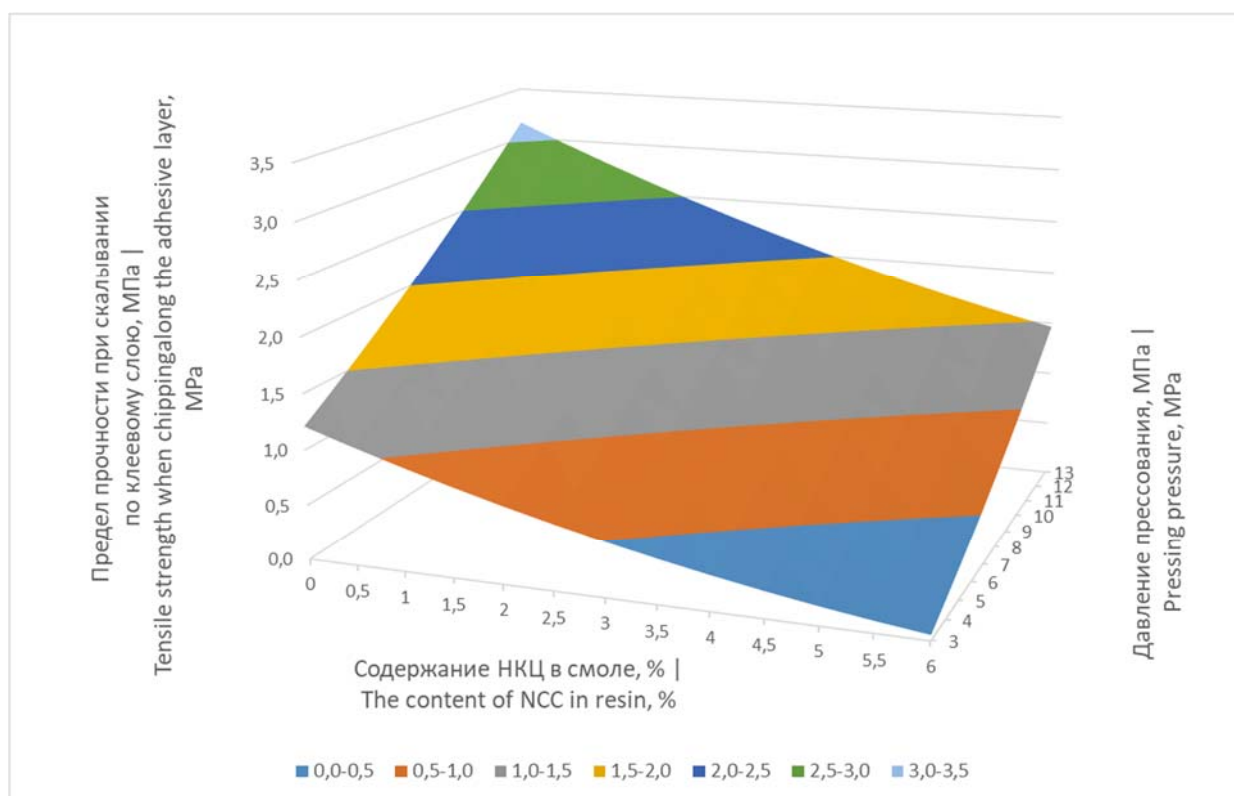


График 2. Зависимость предела прочности при скальвании по клеевому слою от содержания НКЦ в смоле и давления прессования

Graph 2. Dependence of the tensile strength when chipping along the adhesive layer on the content of NCC in the resin and the pressing pressure

Источник: собственные вычисления автора

Source: own calculations

В результате анализа полученных значений, представленных на рис. 3 и 4, установлено разнонаправленное изменение исследуемых параметров при фиксированных оптимальных значениях давления прессования и времени воздействия ИМП с увеличением количества НКЦ в смоле: значение предела прочности при скалывании по клеевому слою уменьшается, показатель предела прочности при статическом изгибе увеличивается. Возникает необходимость сбалансировать параметры режима прессования для получения фанеры с лучшими физико-механическими показателями. Оптимальные значения исследуемых показателей наблюдаются при содержании НКЦ в связующем в количестве 2 мас.%, что соответствует данным оптимального режима прессования.

При анализе сходимости результатов опыта и теоретических значений определили, что уравнение регрессии, описывающее зависимость экспериментальных данных предела прочности при скалывании по клеевому слою от содержания НКЦ в клеевой смеси, давления прессования, времени обработки импульсным магнитным полем не имеет физического смысла при содержании НКЦ в связующем в диапазоне от 4,5 до 6 мас.% и диапазоне давления прессования от 0 до 2 МПа. Практически это можно объяснить понижением вязкости смолы до критического уровня при введении НКЦ в связующее в количестве свыше 4 мас.%.

Далее исследовали гидрофобность фанеры, определив такие показатели как влагопоглощение, разбухание в воде в направлении прессования. Среднее значение разбухания образцов фанеры в направлении прессования после 24 часов выдержки в воде 12,1 %. Показатель влагопоглощения для образцов с использованием гидрофобизатора – 9,7 %. Для контрольных образцов среднее значение разбухания в направлении прессования после 24 часов выдержки в воде составило 16,6 %, а влагопоглощения – 27 %. Данный эффект обусловлен влиянием гидрофобизатора карданола, образующего с молекулами смолы трехмерные сети, препятствующие разбуханию.

Образец фанеры, изготовленный по оптимальному режиму, подвергался дальнейшим испытаниям на ударную вязкость при изгибе. Для проведения эксперимента использовали шесть образцов,

среднее значение ударной вязкости при изгибе составило 38,8 КДж/м², что превышает значение по ГОСТ (34 КДж/м²) и значение, полученное при испытании контрольного образца, равное 34,1 КДж/м².

Обсуждение

В.А. Шамаевым, К. В. Жужукиным, Ali Dorieh и др. исследовалось применение НКЦ в качестве модификатора карбамидоформальдегидных и фенолоформальдегидных смол при производстве древесных композиционных материалов. В.А. Шамаев с коллегами [9] установили возрастание в 1,5 раза прочности клевого шва в изготовленной фанере и модифицированной древесине при идентичной ультразвуковой обработке связующего и последующей электромагнитной обработке фанеры и модифицированной древесины. К. В. Жужукиным и др. [21] проводился анализ работ, в котором рассматривался эффект повышения прочности клевого шва фанеры в 1,5 раза в результате введения нанокристаллической целлюлозы в связующее для производства фанеры, с последующей обработкой её в импульсном магнитном поле. В обзоре Ali Dorieh и др. [20] сообщается, что использование фенольных полимеров, армированных наноцеллюлозой улучшает механические характеристики фанеры, например, прочность фанеры при скалывании по клеевому шву увеличивается на 17%.

В отличие от приведённых источников, в представленной работе показано, что при использовании наноцеллюлозы в фенолформальдегидном связующем, уплотнении шпона и обработки композиционной фанеры (на этом связующем) импульсным электромагнитным полем позволяет в большей степени увеличить прочности фанеры, т. е. данный технологический режим и разработанный состав связующего приоритетны для производственного процесса получения более качественной композиционной фанеры, планируемую к использованию в качестве основы для производства блоков LVL, которые будут применяться в строительстве.

Заключение

1. Для повышения качества фанеры исследовано направление изменения технологических факторов, приводящее к улучшению физико-механических показателей. Определено общее увеличение прочности композиционной фанеры более чем на

200% по сравнению с немодифицированной при добавлении в связующее НКЦ в количестве 2 мас.%; повышении предела прочности при скалывании по клеевому слою на 330 %, твёрдости поперёк волокон на 327 % и менее значительное повышение предела прочности при статическом изгибе на 155 % и ударной вязкости на 114 % (давление прессования 13 МПа и время воздействия импульсным магнитным полем 1 мин). Повышение прочности обусловлено образованием межмолекулярных связей между функциональными группами компонентов связующего и шпона.

2. Определены оптимальные значения исследуемых параметров, при которых достигаются наилучшие показатели физико-механических свойств композиционной фанеры: содержание НКЦ в смоле – 2 мас.%; давление прессования – 13 МПа; время обработки импульсным магнитным полем – 1 мин.

3. В результате предварительной обработки фанеры карданолом определено снижение на 300 % её влагопоглощения (за 30 суток) и разбухания (на 125 %) в направлении прессования. Эффект обусловлен возможным образованием трехмерных сетей между молекулами карданола и связующего.

4. Установлено улучшение физико-механических показателей магнитообработанной композиционной фанеры, полученной при использовании уплотнённого осинового шпона и комплексного связующего, обработанного в ультразвуковом поле. Полученный эффект достигается вследствие гомогенизации связующего при ультразвуковой обработке и активации межфазового слоя на границе шпон-связующее при воздействии импульсного магнитного поля.

5. На основе анализа результатов опыта и теоретических значений планирования эксперимента получены следующие уравнения регрессии:

$$\tau_{\text{ск}} = 0,398 - 0,447 \cdot X_1 + 0,153 \cdot X_2 + 0,099 \cdot X_3 + 0,059 \cdot X_1^2 + 0,003 \cdot X_2^2 + 0,003 \cdot X_3^2 - 0,018 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,004 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,015 \cdot X_2 \cdot X_3$$

$$\sigma = -5,267 + 3,652 \cdot X_1 + 3,865 \cdot X_2 + 5,598 \cdot X_3 - 0,152 \cdot X_1^2 - 0,090 \cdot X_2^2 - 0,232 \cdot X_3^2 - 0,118 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,379 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,258 \cdot X_2 \cdot X_3,$$

адекватно (коэффициент детерминации R^2 : 0,91 и 0,98 соответственно) описывающие зависимости экспериментальных данных пределов прочности при скалывании и при статическом изгибе от содержания НКЦ в клеевой смеси, давления прессования, времени обработки импульсным магнитным полем.

Список литературы

1. Нифталиев, Р. М. Виды древесных плит и их применение / Р. М. Нифталиев, А. А. Побединский // Агропродовольственная политика России. – 2020. – № 4. – С. 40-45. – EDN PALWEG.
2. Чуркина, А. В. Анализ использования фанеры как сырья / А. В. Чуркина // Форум молодых ученых. – 2019. – № 2(30). – С. 1645-1648. – EDN FPFTWH.
3. Hangbo Yue, Lingwei Mai, Chao Xu, Chufen Yang, Peter S. Shuttleworth, Yingde Cui. Recent advancement in bio-based adhesives derived from plant proteins for plywood application: A review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2023; 33: 101143. ISSN 2352-5541. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101143>.
4. Yongbo Jia, Bei Luo, Seng Hua Lee, Heming Huang, Zhigang Wu, Bei Zhou, Xiaojian Zhou, Jun Zhang. Facile preparation of high-performance plywood adhesive from gelatinized corn starch crosslinked with ammonium dihydrogen phosphate. *International Journal of Biological Macromolecules* 2024; 256, Part 2: 128548. ISSN 0141-8130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128548>.
5. Федотов, А. А. Исследование свойств фанеры на основе различных связующих / А. А. Федотов, А. В. Юдин // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2018. – Т. 6, № 3 (39). – С. 284-289. – EDN YPCLXF.
6. Siqi Zheng, Muyang Chen, Jiabiao Wu, Jianying Xu. Effect of heat treatment on properties and interfacial compatibility of poplar veneer/polyethylene film composite plywood. *Polymer Testing*. 2023; 122: 108006. ISSN 0142-9418. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108006>.
7. Абдразакова, А. Р. Экологичность производства фанеры / А. Р. Абдразакова, В. В. Вяткина, С. Н. Кокошин // Инновационные технологии в лесохозяйственной, деревообрабатывающей промышленности

и прикладной механике : Сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции, Тюмень, 20 октября 2022 года. – Тюмень: Государственный аграрный университет Северного Зауралья, 2022. – С. 6-9. – EDN VJRPJO.

8. Разработка экологически безопасных клеевых составов для получения фанеры / Д. Н. Николаева, Д. В. Беляева, М. А. Баяндин, А. В. Намятов // Лесной и химический комплексы - проблемы и решения : Сборник материалов по итогам Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 02–04 сентября 2019 года. – Красноярск, 2019. – С. 237-239. – EDN BFHJZZ.

9. Шамаев В.А. Модифицирование древесины : монография / В. А. Шамаев, Н. С. Никулина, И. Н. Медведев ; М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – Воронеж, 2022. – 574 с.

10. Разиньков, Е. М. Анализ допустимого уровня формальдегида в воздухе / Е. М. Разиньков // Современные машины, оборудование и IT-решения лесопромышленного комплекса: теория и практика : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Воронеж, 17 июня 2021 года. – Воронеж, 2021. – С. 299-303. – DOI 10.34220/MMEITSIC2021_299-303. – EDN RTVLAZ.

11. Федотов, А. А. Повышение прочностных показателей фанеры ФСФ путем использования модифицирующих добавок к связующему / Т. Н. Вахнина, С. А. Котиков // Лесотехнический журнал. – 2020. – Т. 10, № 1(37). – С. 124-135. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/13. – EDN KJRKUK.)

12. Русаков, Д. С. Модификация фенолоформальдегидных смол отходами производства алюминия и целлюлозы / Г. С. Варанкина, А. Н. Чубинский // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2019. – № 2(368). – С. 130-140. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.2.130. – EDN VZPXQW.

13. Kaihong Tang, Ailing Zhang, Tiejun Ge, Xiaofeng Liu, Xiaojun Tang, Yongjiang Li. Research progress on modification of phenolic resin. *Materials Today Communications*. 2021; 26: 101879. ISSN 2352-4928. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101879>.

14. Aydin Demir. Determination of the effect of valonia tannin when used as a filler on the formaldehyde emission and adhesion properties of plywood with artificial neural network analysis. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2023; 123: 103346. ISSN 0143-7496. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103346>.

15. Electra Papadopoulou, Theresa Rücker, Zoe Nikolaidou, Sotirios Kountouras, Themistoklis Sevastiadis, Torbjørn Pettersen, Bernd Wittgens. Electrochemically treated lignin in phenolic resins for plywood panels. *Sustainable Chemistry for the Environment*. 2023; 4: 100049. ISSN 2949-8392. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100049>.

16. Ali Reza Zanjanijam, Xinyan Wang, Maryam Ramezani, Stefan Holberg, Patrick A. Johnson. Phenolic resin/coal char composites: Curing kinetics and thermal/mechanical performance. *Polymer*. 2023; 281: 126103. ISSN 0032-3861. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126103>.

17. S. Anirudh, K Aruna Prabha, Soppari Bhanu Murthy, B Chennakesava Rao. Enhancement of mechanical properties of matrix by functionalized Multi-Wall Carbon Nanotubes (MWCNT) in composite material. *Materials Today: Proceedings*. 2023; 92, Part2: 1186-1192. ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.308>.

18. Mengjie Wang, Jianfang Yong, Lijuan Cai, Zhaojing Li, Yunfu Ou, Lingzhuang Zhu, Xiaosu Yi, Dongsheng Mao. Significantly improved interfacial and overall mechanical properties of aramid fiber/phenolic resin matrix composite reinforced with short CNT. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023; 26: 5225-5235. ISSN 2238-7854. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.281>.

19. Ющенко, Е. В. Углеродные нанотрубки: перспективы использования в промышленном производстве / Е. В. Ющенко, К. В. Жужукин // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2023. – № 64. – С. 303-308. – EDN XDCATK.

20. Ali Dorieh, Nadir Ayrilmis, Mohammad Farajollah Pour, Sogand Ghafari Movahed, Mohammad Valizadeh Kiamahalleh, Mohammad Hassan Shahavi, Hamid Hatefnia, Meysam Mehdinia. Phenol formaldehyde resin modified by cellulose and lignin nanomaterials: Review and recent progress. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022; 222 Part B: 1888-1907. ISSN 0141-8130. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.279>.

21. Жужукин, К. В. Возможности применения нанокристаллической целлюлозы для получения изделий из древесины / К. В. Жужукин, Т. Л. Ищенко, В. О. Кондауров // Подготовка кадров в условиях перехода на инновационный путь развития лесного хозяйства : Научно-практическая конференция, Воронеж, 21–22 октября 2021 года. – Воронеж, 2021. – С. 155-157. – EDN HUSIRF.

22. Шишлов, О. Ф. Лигнинсодержащие фенолкарданолформальдегидные смолы для фанеры и древесностружечных плит / О. Ф. Шишлов, Н. С. Баулина, В. В. Глухих // Деревообрабатывающая промышленность. – 2019. – № 4. – С. 40-45. – EDN WAQNQS.

References

1. Niftaliev, R. M. Types of wood slabs and their application / R. M. Niftaliev, A. A. Pobedinsky // Agro-food policy of Russia. - 2020. – No. 4. – pp. 40-45. – EDN PALWEG.

2. Churkina, A.V. Analysis of the use of plywood as a raw material / A.V. Churkina // Forum of young scientists. – 2019. – № 2(30). – Pp. 1645-1648. – EDN FPFTWH.

3. Hangbo Yue, Lingwei Mai, Chao Xu, Chufen Yang, Peter S. Shuttleworth, Yingde Cui. Recent advancement in bio-based adhesives derived from plant proteins for plywood application: A review. Sustainable Chemistry and Pharmacy. 2023; 33: 101143. ISSN 2352-5541. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101143>.

4. Yongbo Jia, Bei Luo, Seng Hua Lee, Heming Huang, Zhigang Wu, Bei Zhou, Xiaojian Zhou, Jun Zhang. Facile preparation of high-performance plywood adhesive from gelatinized corn starch crosslinked with ammonium dihydrogen phosphate. International Journal of Biological Macromolecules 2024; 256, Part 2: 128548. ISSN 0141-8130. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128548>.

5. Fedotov, A. A. Investigation of the properties of plywood based on various binders / A. A. Fedotov, A.V. Yudin // Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. - 2018. – Vol. 6, No. 3(39). – pp. 284-289. – EDN YPCLXF.

6. Siqi Zheng, Muyang Chen, Jiabiao Wu, Jianying Xu. Effect of heat treatment on properties and interfacial compatibility of poplar veneer/polyethylene film composite plywood. Polymer Testing. 2023; 122: 108006. ISSN 0142-9418. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108006>.

7. Abdrazakova, A. R. Environmental friendliness of plywood production / A. R. Abdrazakova, V. V. Vyatkina, S. N. Kokoshin // Innovative technologies in forestry, woodworking industry and applied mechanics : Proceedings of the All-Russian Scientific and practical conference, Tyumen, October 20, 2022. – Tyumen: State Agrarian University of the Northern Urals, 2022. – pp. 6-9. – EDN BJJPJO.

8. Development of environmentally safe adhesive compositions for plywood production / D. N. Nikolaeva, D. V. Belyaeva, M. A. Bayandin, A.V. Namyatov // Forest and chemical complexes - problems and solutions : A collection of materials based on the results of the All-Russian scientific and practical conference, Krasnoyarsk, 02-04 September 2019. Krasnoyarsk, 2019. – pp. 237-239. – EDN BFHJZZ.

9. Shamaev V.A. Wood modification : monograph / V.A. Shamaev, N.S. Nikulina I.N. Medvedev ; Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, FGBOU VGLTU. – Voronezh, 2022. – 574 p.

10. Razinkov, E. M. Analysis of the permissible level of formaldehyde in the air / E. M. Razinkov // Modern machines, equipment and IT solutions of the timber industry complex: theory and practice : Materials of the All-Russian Scientific and practical conference, Voronezh, June 17, 2021. – Voronezh, 2021. – pp. 299-303. – DOI 10.34220/MMEITSIC2021_299-303. – EDN RTVLAZ.

11. Fedotov, A. A. Increasing the strength parameters of FSF plywood by using modifying additives to the binder /, T. N. Vakhnina, S. A. Kotikov // Lesotekhnicheskiiy zhurnal. – 2020. – Vol. 10, No. 1(37). – pp. 124-135. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/13. – EDN KJRKUK.)

12. Rusakov, D. S. Modification of phenol-formaldehyde resins by waste products of aluminum and cellulose production /, G. S. Varankina, A. N. Chubinsky // News of higher educational institutions. Forest Magazine. – 2019. – № 2 (368). – Pp. 130-140. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.2.130. – EDN VZPXQW.

13. Kaihong Tang, Ailing Zhang, Tiejun Ge, Xiaofeng Liu, Xiaojun Tang, Yongjiang Li. Research progress on modification of phenolic resin. *Materials Today Communications*. 2021; 26: 101879. ISSN 2352-4928. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101879>.
14. Aydin Demir. Determination of the effect of valonia tannin when used as a filler on the formaldehyde emission and adhesion properties of plywood with artificial neural network analysis. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2023; 123: 103346. ISSN 0143-7496. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103346>.
15. Electra Papadopoulou, Theresa Rücker, Zoe Nikolaidou, Sotirios Kountouras, Themistoklis Sevastiadis, Torbjørn Pettersen, Bernd Wittgens. Electrochemically treated lignin in phenolic resins for plywood panels. *Sustainable Chemistry for the Environment*. 2023; 4: 100049. ISSN 2949-8392. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2023.100049>.
16. Ali Reza Zanjanijam, Xinyan Wang, Maryam Ramezani, Stefan Holberg, Patrick A. Johnson. Phenolic resin/coal char composites: Curing kinetics and thermal/mechanical performance. *Polymer*. 2023; 281: 126103. ISSN 0032-3861. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126103>.
17. S. Anirudh, K Aruna Prabha, Soppari Bhanu Murthy, B Chennakesava Rao. Enhancement of mechanical properties of matrix by functionalized Multi-Wall Carbon Nanotubes (MWCNT) in composite material. *Materials Today: Proceedings*. 2023; 92, Part2: 1186-1192. ISSN 2214-7853. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.308>.
18. Mengjie Wang, Jianfang Yong, Lijuan Cai, Zhaojing Li, Yunfu Ou, Lingzhuang Zhu, Xiaosu Yi, Dongsheng Mao. Significantly improved interfacial and overall mechanical properties of aramid fiber/phenolic resin matrix composite reinforced with short CNT. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023; 26: 5225-5235. ISSN 2238-7854. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.281>
19. Yushchenko, E. V. Carbon nanotubes: prospects for use in industrial production / E. V. Yushchenko, K. V. Zhuzhukin // *Actual problems of the forest complex*. – 2023. – No. 64. – pp. 303-308. – EDN XDCATK.
20. Ali Dorieh, Nadir Ayrilmis, Mohammad Farajollah Pour, Sogand Ghafari Movahed, Mohammad Valizadeh Kiamahalleh, Mohammad Hassan Shahavi, Hamid Hatefnia, Meysam Mehdinia. Phenol formaldehyde resin modified by cellulose and lignin nanomaterials: Review and recent progress. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2022; 222 Part B: 1888-1907. ISSN 0141-8130. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.09.279>.
21. Zhuzhukin, K. V. Possibilities of using nanocrystalline cellulose to produce wood products / K. V. Zhuzhukin, T. L. Ishchenko, V. O. Kondaurov // *Personnel training in conditions of transition to an innovative path of forestry development : Scientific and practical conference, Voronezh, October 21-22, 2021. Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov, 2021. – pp. 155-157. – EDN HUSIRF*.
22. Shishlov, O. F. Lignin-containing phenolcardanolformaldehyde resins for plywood and particle boards / O. F. Shishlov, N. S. Baulina, V. V. Glukhikh // *The woodworking industry*. – 2019. – No. 4. – pp. 40-45. – EDN WAQNQS.

Сведения об авторах

✉ Ющенко Екатерина Викторовна – аспирант кафедры древесиноведения, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: 0000-0002-4827-2756, katerina.vgltu@yandex.ru.

Information about the authors

✉ *Yushchenko Ekaterina Viktorovna* – postgraduate student of the Department of Wood Science, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: 0000-0002-4827-2756, katerina.vgltu@yandex.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author