

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8743

УДК 674.815

Статья

## **Наноструктурированные добавки шунгита и аморфного диоксида кремния в технологии древесно-стружечных плит**

**Панов Николай Геннадьевич**

*кандидат технических наук, доцент, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), [supernikola@yandex.ru](mailto:supernikola@yandex.ru)*

**Васильев Сергей Борисович**

*доктор технических наук, профессор, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), [servas@psu.karelia.ru](mailto:servas@psu.karelia.ru)*

**Колесников Геннадий Николаевич**

*доктор технических наук, профессор, Петрозаводский государственный университет (Российская Федерация), [kgn@petrsu.ru](mailto:kgn@petrsu.ru)*

*Получена: 21 июля 2025 / Принята: 3 сентября 2025 / Опубликовано: 24 сентября 2025*

---

**Аннотация:** Целью исследования являлось определение влияния добавки наноразмерного шунгита и аморфного диоксида кремния в связующее, используемое при производстве древесно-стружечных плит, на их прочность и водостойкость. Для изготовления образцов древесно-стружечных плит была использована смесь стружек из хвойных и лиственных пород. Массовая доля гнили в древесном сырье составляла около 20 %. В ходе исследования готовилось девять видов связующего. По стандартной технологии было приготовлено базовое связующее без добавок. Аморфный диоксид кремния использовался для приготовления четырёх видов связующего. Его содержание составляло 0,10 %, 0,25 %, 0,50 %, 1,00 % от массы абсолютно сухой смолы соответственно для каждого из видов связующего. Наноразмерный шунгит также применялся для приготовления четырёх видов связующего. Его содержание составляло 5 %, 10 %, 15 %, 20 % от массы абсолютно сухой смолы соответственно для каждого из видов связующего. Для всех видов связующего, по общепринятой методике, были определены время желатинизации и вязкость. Образцы древесно-стружечных плит были изготовлены на лабораторном оборудовании по общепринятой методике. В смеси для их изготовления

содержание связующего составляло 10 % от массы стружки. Испытания плит на прочность и водостойкость проводились по стандартным методикам. Результаты исследования влияния аморфного диоксида кремния на технологические характеристики связующего показывают, что при увеличении его массовой доли от 0 до 1 % снижается время желатинизации на 12,3 %. При этом одновременно на 21,0 % снижается и вязкость. Результаты исследования влияния наноразмерного шунгита на технологические характеристики связующего показывают, что при увеличении массовой доли этой добавки от 0 до 10 % происходит снижение времени желатинизации на 5,5 %. Дальнейшее увеличение доли наноразмерного шунгита от 10 до 20 % практически не приводит к изменению этого показателя. Вязкость связующего при увеличении доли наноразмерного шунгита от 0 до 10 % сначала снижается на 9,0 %, а при дальнейшем увеличении содержания добавки до 20 % практически восстанавливается до исходного значения. Результаты исследования прочности и водостойкости образцов древесно-стружечных плит показали наличие оптимальных значений добавок. Наилучшие показатели были достигнуты при концентрации аморфного диоксида кремния 1 масс. %: предел прочности при изгибе возрос на 192 %; предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти возрос на 143 %; разбухание по толщине снизилось на 27 %; водопоглощение по массе снизилось на 34 %. Наилучшие показатели свойств плит, в случае использования наноразмерного шунгита, были достигнуты при его концентрации в связующем 10 масс. %: предел прочности при изгибе возрос на 154 %; предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти возрос на 204 %; разбухание по толщине снизилось на 32 %; водопоглощение по массе снизилось на 62 %. Все показатели даны в сравнении с аналогичными у плит, изготовленных с использованием базового связующего.

**Ключевые слова:** древесно-стружечная плита; прочность; водостойкость; наноразмерный шунгит; аморфный диоксид кремния

---

DOI: 10.15393/j2.art.2025.8743

*Article*

## **Nanostructured additives of shungite and amorphous silicon dioxide in chipboard technology**

**Nikolay Panov**

*Ph. D. in engineering, associate professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),  
supernikola@yandex.ru*

**Sergey Vasiliev**

*D. Sc. in engineering, professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),  
servas-10rus@yandex.ru*

**Gennady Kolesnikov**

*D. Sc. in engineering, professor, Petrozavodsk State University (Russian Federation),  
kgn@petrsu.ru*

*Received: 21 July 2025 / Accepted: 3 September 2025 / Published: 24 September 2025*

---

**Abstract:** The aim of the study was to determine the effect of nanoscale shungite and amorphous silicon dioxide addition to the binder used in the production of particleboard on their strength and water resistance. A mixture of softwood and hardwood shavings was used to make samples of particleboards. The mass fraction of rot in wood raw materials was about 20%. During the study nine types of the binder were prepared. A base binder without additives was prepared using standard technology. Amorphous silicon dioxide was used to prepare four types of the binder. Its contents were 0.10 %, 0.25 %, 0.50 %, 1,00 % of the mass of absolutely dry resin, respectively, for each type of the binder. Nanoscale shungite has also been used to prepare four types of the binder. Its contents were 5 %, 10 %, 15 %, 20 % of the mass of absolutely dry resin, respectively, for each type of the binder. For all types of the binder the gelatinization time and viscosity were determined according to a generally accepted method. The samples of particleboard were manufactured using laboratory equipment according to a generally accepted method. In the mixture for their manufacture the binder content was 10% of the chip weight. The particleboard were tested for strength and water resistance using standard methods. The results of the study of the amorphous silicon dioxide effect on the technological characteristics of the binder show that with an increase in its mass fraction from 0 to 1%, the gelatinization time decreased by 12.3%. At the same time, the viscosity also decreased by 21.0%. The results of the study of the nanoscale shungite

effect on the technological characteristics of the binder show that with an increase in the mass fraction of this additive from 0 to 10%, the gelatinization time decreased by 5.5%. A further increase in the proportion of nanoscale shungite from 10 to 20% practically did not lead to a change in this indicator. With an increase in the proportion of nanoscale shungite from 0 to 10%, the viscosity of the binder initially decreased by 9.0%, and with a further increase in the additive content to 20%, it practically restored to its original value. The results of the study of the strength and water resistance of particleboard samples showed the presence of optimal additive values. The best performance was achieved at a concentration of amorphous silicon dioxide of 1 wt. %: bending strength increased by 192%; tensile strength perpendicular to the formation increased by 143%; thickness swelling decreased by 27%; water absorption by weight decreased by 34%. The best properties of the particleboard in the case of using nanoscale shungite were achieved when its concentration in the binder was 10 wt. %: bending strength increased by 154%; tensile strength perpendicular to the particleboard increased by 204%; thickness swelling decreased by 32%; water absorption by weight decreased by 62%. All indicators are given in comparison with those of particleboard made using a basic binder.

**Keywords:** particleboard; strength; water absorption; swelling; nanoshungite; amorphous silicon dioxide

---

## 1. Введение

Древесно-стружечные плиты (далее — ДСтП), известные с 1930-х гг., получают путём горячего прессования смеси древесных частиц, связующего и отвердителя. Древесные частицы (стружка, опилки) могут быть получены из низкокачественной древесины, что повышает эффективность использования заготовленной древесины за счёт уменьшения отходов её переработки и создаёт подтверждаемые практикой экономические предпосылки роста производства и спроса ДСтП в строительстве, мебельной промышленности и других областях [1], [2].

Первоначально в качестве связующего использовалась фенолформальдегидная смола, применение которой обеспечивало достаточную прочность плит, однако эмиссия фенола в процессе использования плит ограничивала область их применения. Несмотря на прогресс в данной области прикладных исследований, вопросы экологической безопасности, наряду с вопросами прочности плит, относятся к наиболее актуальным в настоящее время. Например, исследования [3] показали, что добавка наноцеллюлозы в карбаминоформальдегидную смолу (КФС), используемую в числе других в настоящее время для производства ДСтП, снижает выделение формальдегида на 31 %. Проблема заключается в разработке такой технологии переработки древесины и изготовления плит, которая обеспечивала бы достаточно высокую прочность и минимальную технологически возможную эмиссию формальдегида в соответствии с современными требованиями экологической безопасности [4], [5], [6], [7], [8], [9]. Анализ литературы показал, что массив исследований, ориентированных на решение данной проблемы, может быть систематизирован и разделён на два направления. Оба направления имеют одну и ту же упомянутую выше цель — улучшение прочностных и экологических свойств связующего, однако пути достижения цели различны. Рассмотрим эти направления.

Особенностью работ первого направления является использование органических модификаторов к связующему, например, упомянутая выше наноцеллюлоза как модификатор КФС, а также бутанол поливинилацетатная дисперсия в качестве модификаторов КФС и фенолформальдегидной смолы соответственно [10]. К этому же направлению, наряду с процитированными выше, относится работа [11], в которой по итогам большого количества опытов определено, что ключевым условием повышения экологической безопасности и эффективности производства ДСтП является модифицирование связующего (в данном случае КФС) с целью существенного снижения эмиссии формальдегида из готовых конструкций. Эта задача решена модифицированием как связующего, так и отвердителя. В качестве отвердителя были исследованы хлористый аммоний, щавелевая кислота, соляная кислота и другие вещества. Состав связующего включал КФС и раствор полиакриламида. В итоге был найден вариант модифицированного связующего с уменьшенной эмиссией формальдегида по сравнению с применением не модифицированной КФС. При этом результаты механических испытаний показали повышение примерно в три раза модуля упругости при изгибе плиты, изготовленной с применением разработанной технологии [11].

Положительно оценивая данную работу, отметим, что существенное повышение модуля упругости ДСтП уменьшает деформации плиты при прочих равных условиях, т. е. делает материал более хрупким, в связи с чем целесообразно продолжение исследований. Влияние различных отвердителей на свойства ДСтП исследовано также в работе [12]. Ряд других вопросов модификации связующего с использованием органических веществ рассмотрен в публикациях [13], [14].

Особенностью работ второго из отмеченных выше направлений является использование неорганических и комбинированных модификаторов и добавок к связующему в целях снижения эмиссии формальдегида и повышения прочности ДСтП. В рамках данного направления к настоящему времени известно применение таких добавок в виде порошков, как наноструктурированный шунгит и нанопористый аморфный диоксид кремния. Это направление прикладных исследований инициировано и развивается с 2012 г. в работах [15], [16], [17], [18], [19].

Поясняя использованный выше термин «комбинированный модификатор», отметим, что таким модификатором является шунгит, основными компонентами которого являются углерод (органическое вещество) и диоксид кремния (неорганическое вещество), т. е. этот модификатор является комбинированным, его относят к горным породам [20]. Поэтому появляется вопрос о модифицирующем влиянии каждого из этих компонентов с учётом того обстоятельства, что модификация смолы как нанопорошком шунгита, так и только аморфным диоксидом кремния обеспечивала в экспериментах существенное повышение прочности образцов ДСтП. Предположительно, определённый вклад в повышение прочности плит с наноструктурированным шунгитом вносит открытая недавно графеноподобная фаза углерода в образцах шунгита [21]. Возможно также, что в зависимости от разновидности используемого шунгита его роль как модификатора смолы при изготовлении ДСтП будет различна. Этот вопрос затрагивает также экономические аспекты, т. к. стоимость аморфного диоксида кремния меньше по сравнению с нанопорошком шунгита. Таким образом, проблема повышения прочности древесно-стружечных плит при одновременном улучшении их экологических характеристик является комплексной и объёмной, полное исследование которой выходит за рамки данной работы. Соответственно, дальнейшее изложение будет сфокусировано на наиболее важных аспектах из затронутых выше.

Целью данной работы являлось определение влияния добавки наноразмерного шунгита (далее — НШ) и аморфного диоксида кремния (далее — АДК) в связующее, используемое при производстве ДСтП, на технологические свойства связующего и эксплуатационные свойства плит.

## 2. Материалы и методы

### 2.1. Материалы

Для изготовления образцов ДСтП была использована смесь стружек из хвойных (сосна) и лиственных (берёза, осина) пород. Состав смеси древесных частиц (по массе): 60 % хвойных пород и 40 % лиственных пород. Пористость смеси составляет 80 %, а её насыпная плотность — 309 кг/м<sup>3</sup>. Влажность древесных частиц около 4 %. Массовая доля гнили в древесном сырье составляла около 20 %. Фракционный состав стружки, использовавшейся для изготовления однослойных ДСтП, представлен в таблице 1.

**Таблица 1.** Фракционный состав стружки

**Table 1.** Fractional composition of chips

Размеры отверстий сит, мм	2,0	1,0	0,5	0,2	Поддон
Массовая доля стружки, %	0,3	12,5	44,4	32,6	10,2

Основой для изготовления связующего в ходе исследования служила карбамидоформальдегидная смола. Основные характеристики КФС приведены в таблице 2.

**Таблица 2.** Основные физико-химические показатели КФС

**Table 2.** The main physical and chemical parameters of carbamide-formaldehyde resin

Наименование показателя	Значение
Массовая доля сухого остатка, %	68
Время желатинизации при 100 °С (с 1 %-м хлористым аммонием), с	68
Вязкость условная по ВЗ-246 (сопло 4 мм), с	80
Концентрация водородных ионов при 20 °С, pH	8,1
Показатель преломления при 20 °С	1,471
Предельная смешиваемость смолы с водой, при которой наблюдается коагуляция по объёму	1:4,5

В качестве добавок, влияние которых на связующее изучалось в ходе экспериментального исследования, использовались порошки шунгита и диоксида кремния. Результаты анализа химического состава порошков и их физических свойств приведены в таблице 3.

**Таблица 3.** Результаты анализа свойств добавок

**Table 3.** The results of additives properties analysis

Компоненты	Массовая доля, %	
	Диоксид кремния	Шунгит
C	0	28,0—31,0
SiO <sub>2</sub>	98	56,0—60,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	4,3—5,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1	2,0—6,0
K <sub>2</sub> O	0	1,3—1,5
MgO	0	0,9—1,4
TiO <sub>2</sub>	0	< 0,45
Na <sub>2</sub> O	0	< 0,4
CaO	0	~ 0,1
Сульфаты	1,9	0
Средний диаметр частиц	8 мкм	100 Нм
Удельная поверхность	400 м <sup>2</sup> /г	150 м <sup>2</sup> /г

## 2.2. Приготовление связующего

В ходе исследованияготавливалось девять видов связующего. Прежде всего, было приготовлено связующее без добавок, так называемое «базовое связующее». Оно было приготовлено из водорастворимой смолы, с концентрацией 66 % и добавлением 1 %-го NH<sub>4</sub>Cl (хлорид аммония) в виде водного раствора концентрацией 20 % в качестве отвердителя. С использованием базового связующего изготавливались контрольные образцы ДСтП. В дальнейшем с контрольными образцами сравнивались показатели плит, изготовленных с использованием модифицированных связующих.

Диоксид кремния использовался для приготовления четырёх видов связующего. Его содержание составляло 0,10 %, 0,25 %, 0,50 %, 1,00 % от массы абсолютно сухой смолы соответственно для каждого из видов связующего.

Порошок шунгита также применялся для приготовления четырёх видов связующего. Его содержание составляло 5 %, 10 %, 15 %, 20 % от массы абсолютно сухой смолы соответственно для каждого из видов связующего.

Выбор объёмов добавок в связующее был обусловлен результатами ранее проведённых работ по модифицированию полимеров схожими материалами [15], [16].

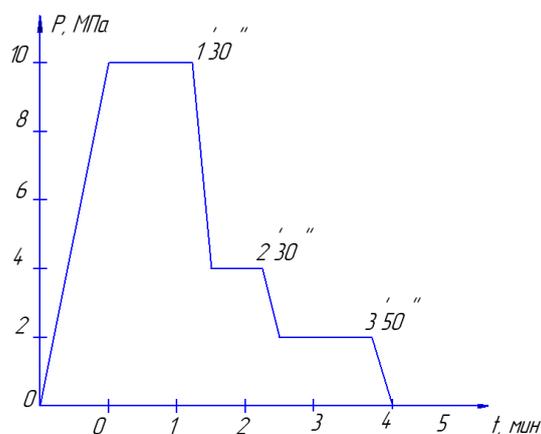
Клеевую композицию готовили путём смешивания составляющих её компонентов. Сначала в ёмкость заливали смолу. Затем при постоянном перемешивании и температуре приблизительно 20 °С добавляли диоксид кремния или шунгит. После гомогенизации полученной смеси, для чего требуется примерно 30 мин, добавляли отвердитель. Полученную композицию тщательно перемешивали и сразу использовали для осмоления стружки. В смеси для изготовления образцов ДСтП содержание связующего (клеевой композиции) составляло 10 % от массы стружки.

### 2.3. Определение времени желатинизации и вязкости связующего

Определение времени желатинизации и вязкости связующего проводилось в соответствии с ГОСТ 14231-88 «Смолы карбамидоформальдегидные. Технические условия». Испытаниям были подвергнуты все виды связующего (клеевой композиции): базовое, четыре вида с добавкой шунгита и четыре вида с добавкой диоксида кремния. Для определения вязкости применяли вискозиметр типа ВЗ-246 «SIMEX» по ГОСТ 9070-75. Диаметр сопла  $d = 4$  мм. За результат испытания принимали среднее арифметическое результатов трёх измерений времени в секундах.

### 2.4. Изготовление образцов плит

Образцы ДСтП были изготовлены на лабораторном оборудовании. После перемешивания в лабораторном смесителе стружки и связующего был подготовлен ковёр. Этот ковёр подвергался холодной подпрессовке. Режимы холодной подпрессовки согласуются с существующими производственными процессами. Полученный древесно-стружечный ковёр помещался в горячий пресс. Температура прессования составляла 190 °С, скорость смыкания плит 3 мм/мин. График прессования представлен на рисунке 1.



**Рисунок 1.** График прессования образцов древесно-стружечных плит [рисунок авторов]

**Figure 1.** Pressing schedule for particle board samples

В результате прессования были получены плиты толщиной 16 мм и с габаритами 280 × 280 мм. Полученные образцы были подвергнуты кондиционной сушке в течение 24 ч при температуре  $20 \pm 2$  °С и влажности  $65 \pm 5$  %. После кондиционной сушки плотность плит составила  $800 \text{ кг/м}^3$  и относительная влажность 10 %. Затем из полученных плит были изготовлены стандартные образцы для экспериментального определения их физико-механических свойств.

### 2.5. Испытание плит на прочность

Образцы прямоугольной формы выпиливались из разных частей плит. Пласти и кромки образцов были взаимно перпендикулярны, кромки — попарно параллельны. Различие образцов как по длине, так и по ширине не превышало 0,5 мм. Различие по толщине не превышало 0,2 мм. Образцы на наружных поверхностях не имели неровностей. Отсутствовали сколы у кромок и выкрашивания углов. Образцы перед испытанием кондиционировались в течение 24 ч при температуре  $20 \pm 2$  °С и относительной влажности воздуха  $65 \pm 5$  %. Для измерения образцов использовались: штангенциркуль с погрешностью измерения 0,1 мм и линейка с погрешностью измерения 1 мм.

Предел прочности при изгибе определялся в соответствии с ГОСТ 10635-88 «Плиты древесно-стружечные. Методы определения предела прочности и модуля упругости при изгибе». Образцы размером 240 × 50 мм устанавливали на опоры в виде стальных цилиндров радиусом 15 мм, расстояние между осями которых составляло 200 мм. Через такой же цилиндр в середине пролёта передавалась вертикальная нагрузка. Продольная ось образца была перпендикулярна осям опорных цилиндров и оси нагружающего цилиндра. Нагрузка на образец увеличивалась с постоянной скоростью до разрушения. Время от начала испытаний до разрушения составляло  $60 \pm 20$  с. Максимальная нагрузка определялась по стрелочному индикатору с точностью 1 %. Значение предела прочности при изгибе вычислялось по формуле

$$\sigma_{изг} = \frac{3Fl}{2bh^2}], \quad (1)$$

где  $F$  — сила, действующая на образец в момент разрушения, Н;  $l$  — расстояние между опорами испытательного устройства, мм;  $b$  — ширина образца, мм;  $h$  — толщина образца, мм.

Результат округлялся до первого десятичного знака.

Предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти плиты определялся в соответствии с ГОСТ 10636-2018 «Плиты древесно-стружечные и древесно-волокнистые. Метод определения предела прочности при растяжении перпендикулярно к пласти плиты». К пластям образца размером 50 × 50 мм с помощью клея-расплава приклеивались специальные колодки. Полученный испытательный блок устанавливался в захваты испытательной машины, после чего расстояние между ними увеличивали с постоянной скоростью  $10 \pm 1$  мм/мин до разрушения образца. Максимальная нагрузка фиксировалась

по стрелочному индикатору с точностью 1 %. Значение предела прочности при растяжении перпендикулярно пласти плиты ( $\sigma_{\perp}$ ) высчитывалось по формуле

$$\sigma_{\perp} = \frac{F}{lb}, \quad (2)$$

где  $F$  — сила нагружения, действующая на образец в момент разрушения, Н;  $l$  — длина образца, мм;  $b$  — ширина образца, мм.

Результат округлялся с точностью до второго десятичного знака.

## 2.6. Испытание плит на водостойкость

Разбухание в воде по толщине и водопоглощение определялись в соответствии с ГОСТ 10634-88 «Плиты древесно-стружечные. Методы определения физических свойств» на образцах, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда толщиной 16 мм и площадью  $100 \times 100$  мм. Толщина каждого образца измерялась в четырёх точках, каждая из которых была удалена от ближайших двух кромок на 25 мм. За толщину образца принимали среднее арифметическое значение результатов четырёх измерений. Образцы взвешивались с погрешностью 0,1 %. Далее образцы погружались в сосуд с водой, имеющей температуру  $20 \pm 1$  °С. Специальное приспособление позволяло удерживать образцы в вертикальном положении ниже уровня поверхности воды на  $20 \pm 2$  мм. При этом они не соприкасались друг с другом. Время выдержки образцов в воде составляло  $24 \pm 0,25$  ч. После выдержки образцы извлекались из воды, их поверхность осушалась от капель и воды. Не позднее чем через 10 мин после извлечения из воды образцы взвешивались с погрешностью 0,1 % и измерялись по толщине штангенциркулем. Толщина измерялась с той же точностью и в тех же четырёх точках, что и до погружения в воду. За толщину образца, как и вначале опыта, принимали среднее арифметическое значение результатов четырёх измерений. Водопоглощение образца ( $\Delta_w$ ) в процентах вычисляли по формуле

$$\Delta_w = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $m_1$  — масса образца до погружения в воду, г;  $m_2$  — масса образца после извлечения из воды, г.

Разбухание в воде по толщине образца ( $t_w$ ) в процентах вычисляли по формуле

$$t_w = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \cdot 100\%, \quad (4)$$

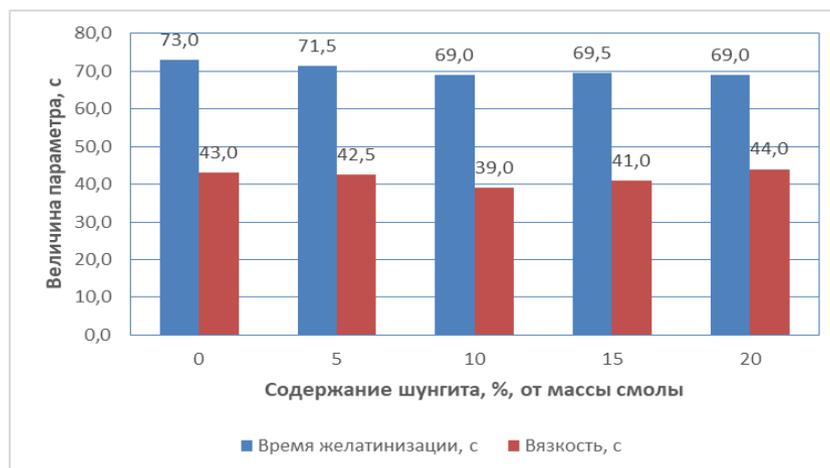
где  $t_1$  — толщина образца до погружения в воду, мм;  $t_2$  — толщина образца после извлечения из воды, мм.

За результат испытания плиты принималось среднее арифметическое значение испытаний всех образцов.

### 3. Результаты

#### 3.1. Влияние добавок на время желатинизации и вязкость связующего

Результаты исследования влияния содержания НШ на технологические характеристики связующего (рисунок 2) показывают, что при увеличении массовой доли НШ от 0 до 10 % происходит снижение времени желатинизации на 5,5 %. В диапазоне доли НШ от 10 до 20 % изменение времени желатинизации практически прекращается.



**Рисунок 2.** Влияние доли добавки шунгита на свойства связующего [рисунок авторов]

**Figure 2.** The effect of the proportion of shungite additive on the properties of the binder

Также наблюдается изменение значения вязкости при увеличении массовой доли НШ. Вязкость связующего сначала снижается на 9,0 % при увеличении доли НШ от 0 до 10 %. Дальнейшее увеличение содержания добавки до 20 % приводит практически к восстановлению исходного значения вязкости.

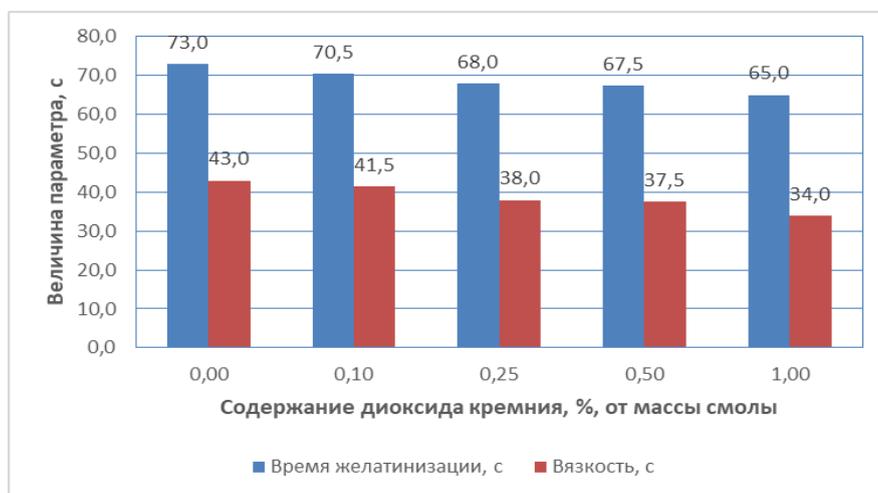
Исследование показало, что при всех значениях добавки связующее сохраняет свои технологические параметры в пределах допустимых значений. Это позволяет использовать его без изменения технологий осмоления стружки, формирования ковра и прессования, что соответствует идеям ресурсосберегающих технологий производства.

Исследование технологических свойств связующего показало, что снижение времени желатинизации связующего на базе КФС наблюдается при введении 10 % НШ.

Кроме того, снижение вязкости связующего на базе КФС наблюдается при введении 10 % НШ.

Результаты исследования влияния содержания АДК на технологические характеристики связующего (рисунок 3) показывают, что при увеличении массовой доли АДК от 0 до 1 % происходит снижение времени желатинизации. Снижение этого показателя происходит на 12,3 %.

Также наблюдается изменение значения вязкости при увеличении массовой доли АДК. Вязкость связующего снижается на 21,0 % при увеличении доли АДК от 0,0 до 1,0 %. Такое снижение вязкости может быть обусловлено высокой активной поверхностью мелкодисперсных частиц, что позволяет добавке более гомогенно распределяться в структуре полимера. Такой эффект может быть полезен при осмолении стружки в производственном



**Рисунок 3.** Влияние доли добавки аморфного диоксида кремния на свойства связующего [рисунок авторов]

**Figure 3.** The effect of the proportion of amorphous silicon dioxide additive on the properties of the binder

процессе, а именно модифицированное связующее более равномерно распределяется на поверхности древесных частиц и, как следствие, улучшает технологические параметры композиции. Несмотря на снижение вязкости связующего, это исследование показало, что модифицированное связующее сохраняет свои технологические параметры в пределах допустимых значений. Это позволяет использовать его без изменения технологий осмоления стружки, формирования ковра и прессования, что соответствует идеям ресурсосберегающих технологий производства.

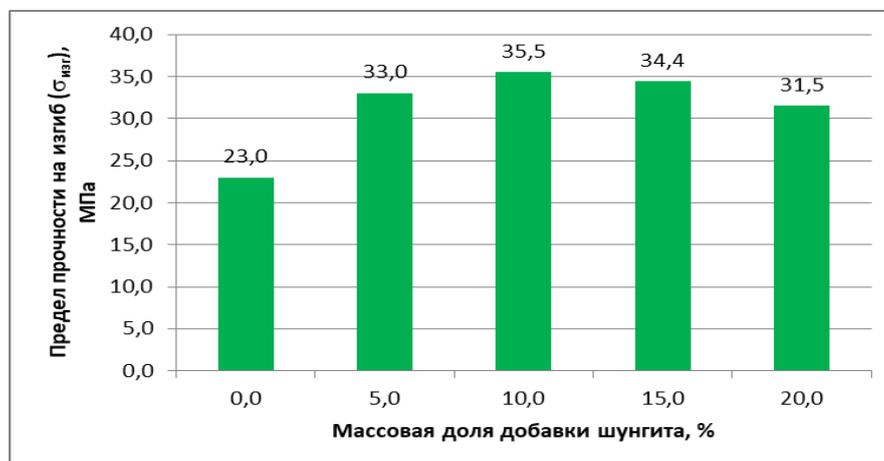
Исследование технологических свойств связующего показало, что снижение времени желатинизации клея на базе КФС наблюдается только при введении 1,0 % АДК.

Кроме того, снижение вязкости связующего на базе КФС наблюдается при введении 1,0 % АДК.

### 3.2. Влияние добавки шунгита на физико-механические свойства плит

Результаты испытаний однослойных ДСтП, модифицированных НШ, на физико-механические свойства показывают, что при введении НШ в однослойные ДСтП наблюдается значительный рост показателей прочности. По сравнению с контрольным

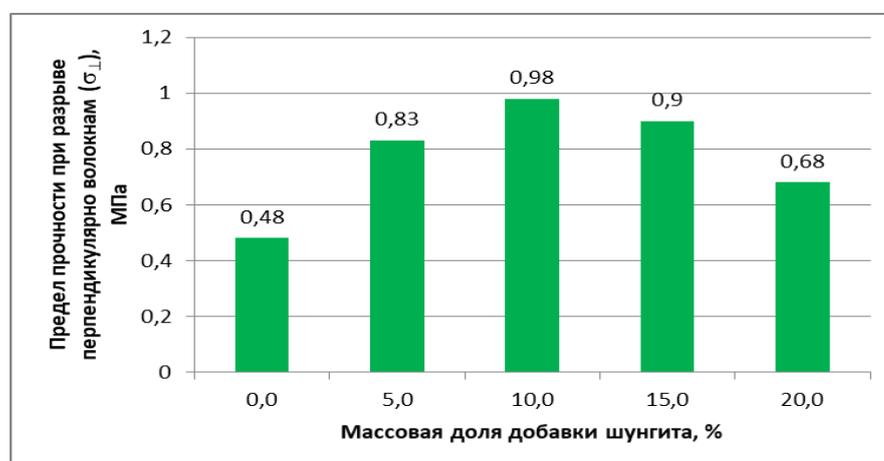
экземпляром прочность при статическом изгибе увеличилась на 41 % (рисунок 4) при концентрации НШ в 10 масс. %, а зависимость данной прочности от концентрации НШ с достаточной точностью может быть описана с помощью полинома второго порядка:  $y = -0,084x^2 + 2,048x + 23,6$ .



**Рисунок 4.** Предел прочности при изгибе в зависимости от концентрации наношунгита [рисунок авторов]

**Figure 4.** Bending strength depending on the concentration of nanoshungite

Прочность при растяжении перпендикулярно пласти плиты выросла на 104 % (рисунок 5) при той же концентрации НШ, а зависимость прочности при растяжении перпендикулярно волокнам (σ<sub>⊥</sub>) от концентрации НШ (Ф%) в изученных пределах с достаточной точностью может быть описана с помощью полинома:  $y = -0,0039x^2 + 0,0877x + 0,4843$ .



**Рисунок 5.** Прочность при растяжении в зависимости от концентрации наношунгита [рисунок авторов]

**Figure 5.** Tensile strength depending on the concentration of nanoshungite

Высокие показатели физико-механических свойств возможно объяснить способностью НШ образовывать трёхмерную наноуглеродную армирующую сетку в структуре ДСтП, распространяющуюся по всему объёму материала, приводящую к формированию более прочной структуры за счёт высокой активной площади удельной поверхности.

При одинаковой концентрации НШ 10 масс. % имеем максимальные значения пределов прочности на растяжение и изгиб, что соответствует максимальной прочности образующейся наноразмерной сетки.

Зависимости показателей водостойкости плит от концентрации НШ описываются полиномами третьего и второго порядка для разбухания и водопоглощения соответственно, а именно:  $y = -0,0073x^3 + 0,36x^2 - 5,3167x + 42,3$  и  $y = 0,0269x^2 - 0,4971x + 8,4629$  (рисунки 6 и 7 соответственно.)



**Рисунок 6.** Зависимости разбухания от концентрации наношунгита [рисунок авторов]

**Figure 6.** Dependence of swelling on the concentration of nanoshungite

При введении НШ в связующее ДСтП происходит значительное уменьшение показателей разбухания и водопоглощения плит. Это показывает повышение водостойкости данного продукта.

Такие показатели можно объяснить высокой прочностью и низкой проницаемостью по воде плёнки смола — наноуглерод, концентрация которой увеличивается на поверхности плиты по сравнению с объёмом при прессовании. Исследования показали, что максимальным показателям водостойкости соответствуют составы с концентрацией НШ 10 % (по массе).

Основные результаты испытаний однослойных ДСтП при максимальной изученной концентрации НШ представлены в таблице 4.



**Рисунок 7.** Зависимости водопоглощения плит от концентрации наношунгита [рисунок авторов]

**Figure 7.** Dependence of the water absorption index of particle board on the concentration of nanoshungite

**Таблица 4.** Физико-механические показатели древесно-стружечной плиты в зависимости от концентрации наношунгита

**Table 4.** Physical and mechanical properties of chipboard depending on the concentration of nanoshungite

Показатель	Обозначение	Единица измерения	Концентрация добавки НШ, %	
			0	10,00
Предел прочности при изгибе	$\sigma_{изг}$	МПа	23	35,50
Предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти	$\sigma_{\perp}$	МПа	0,48	0,98
Показатель разбухания по толщине	$t_w$	%	8,5	5,80
Показатель водопоглощения по массе	$\Delta_w$	%	42	16,00

Исследование влияния концентрации НШ на содержание свободного формальдегида в ДСтП показало, что при введении этой добавки в КФС наблюдается существенное снижение содержания свободного формальдегида. Данный эффект растёт с увеличением концентрации и, видимо, связан с взаимодействием химических веществ, входящих в состав шунгита с формальдегидом.

### 3.3. Влияние добавки диоксида кремния на физико-механические свойства плит

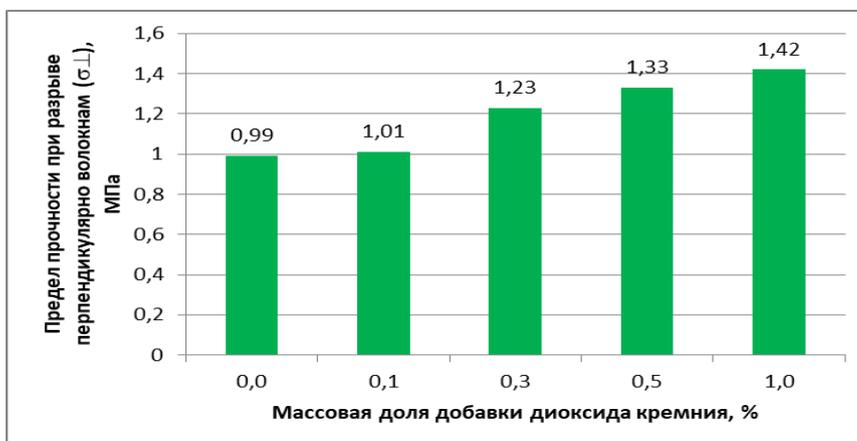
Результаты испытаний однослойных ДСтП, модифицированных АДК на физико-механические свойства, показывают, что при введении АДК в однослойные ДСтП также наблюдается значительный рост показателей прочности. По сравнению с контролем прочность при статическом изгибе увеличилась на 192 % (рисунок 8) при концентрации АДК в 1 % (по массе).



**Рисунок 8.** Предел прочности при изгибе в зависимости от концентрации аморфного диоксида кремния [рисунок авторов]

**Figure 8.** Bending strength as a function of amorphous silicon dioxide concentration.

Прочность при растяжении перпендикулярно пласти плиты выросла на 104 % (рисунок 9) при той же концентрации АДК.



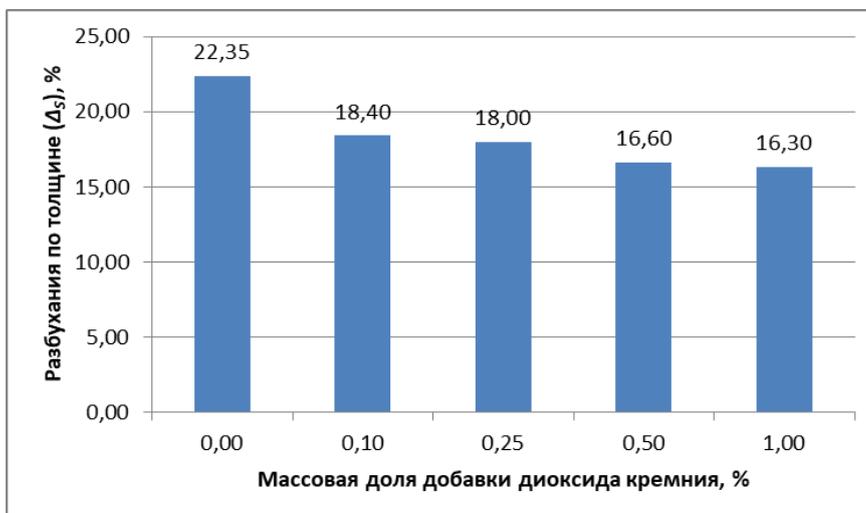
**Рисунок 9.** Предел прочности при растяжении в зависимости от концентрации аморфного диоксида кремния [рисунок авторов]

**Figure 9.** Tensile strength as a function of amorphous silicon dioxide concentration

Высокие показатели физико-механических свойств можно объяснить способностью АДК образовывать наноармирующую сетку диоксида кремния, равномерно распределённую во всём объёме связующего. Эта сетка является основой для формирования более прочной структуры за счёт отмеченной выше высокой удельной площади поверхности частиц.

При одинаковой концентрации АДК 1 % (по массе) получены максимальные значения пределов прочности на растяжение и изгиб, что соответствует максимальной прочности образующейся наноразмерной сетки. По данным обработки статистических данных выявлено, что коэффициент детерминации близок к единице, что указывает на высокую воспроизводимость эксперимента.

Результаты исследований показателей водостойкости плит от концентрации АДК показали, что разбухание по толщине  $t_w$  снизилось на 27 %, а водопоглощение по массе  $\Delta_w$  снизилось на 34 % (рисунки 10 и 11 соответственно.)



**Рисунок 10.** Зависимости показателя разбухания плит от концентрации аморфного диоксида кремния [рисунок авторов]

**Figure 10.** Dependence of the swelling index of the boards on the concentration of amorphous silicon dioxide

При введении АДК в связующее ДСтП происходит значительное уменьшение показателей разбухания и водопоглощения плит. Это показывает повышение водостойкости данного образца.

Такие показатели можно объяснить высокой прочностью и низкой проницаемостью по воде плёнки диоксида кремния, которая является прочной гомогенной структурой, значительно задерживающей молекулы воды на своей поверхности за счёт химических и физических связей состава. Исследования показали, что максимальным показателям водостойкости соответствуют составы с концентрацией АДК 1 масс. %.



**Рисунок 11.** Зависимость показателя водопоглощения плит от концентрации аморфного диоксида кремния [рисунок авторов]

**Figure 11.** Dependence of the water absorption index of boards on the concentration of amorphous silicon dioxide

Основные результаты испытаний однослойных ДСтП при оптимальной концентрации АДК представлены в таблице 5.

**Таблица 5.** Физико-механические показатели ДСтП в зависимости от концентрации аморфного диоксида кремния

**Table 5.** Physical and mechanical parameters of chipboard depending on the concentration of amorphous silicon dioxide

Концентрация добавки АДК, %	0	1
Предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ , МПа	31,6	60,6
Предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти $\sigma_{\perp}$ , МПа	0,99	1,42
Показатель разбухания по толщине $t_w$ , %	22,35	16,30
Показатель водопоглощения по массе $\Delta_w$ , %	43,80	29,10

Исследование влияния концентрации АДК на содержание свободного формальдегида в ДСтП показало, что при введении АДК в карбамидоформальдегидную смолу не наблюдается снижения содержания свободного формальдегида.

Данный эффект обусловлен отсутствием активного углерода в структуре, что приводит к сохранению этого параметра в стандартных пределах, отвечающих международным требованиям.

#### 4. Обсуждение и заключение

Исследование основных физико-механических и технологических параметров древесных композитов, таких как однослойных ДСтП, показало, что применение нанодисперсных структур, таких как порошок наношунгита и порошок диоксида кремния, возможно с практической и производственной точек зрения. Сравнение показателей представлено в таблице 6.

**Таблица 6.** Влияние добавок наношунгита и аморфного диоксида кремния

**Table 6.** The effect of nanoshungite and amorphous silicon dioxide additives

Концентрация добавки, %	0 %	10,00 %
<b>НШ</b>		
Предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ , МПа	23	35,5
Предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти $\sigma_{\perp}$ , МПа	0,48	0,98
Показатель разбухания по толщине $t_w$ , %	8,5	5,8
Показатель водопоглощения по массе $\Delta_w$ , %	42	16
<b>АДК</b>		
Предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ , МПа	31,6	60,6
Предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти $\sigma_{\perp}$ , МПа	0,99	1,42
Показатель разбухания по толщине $t_w$ , %	22,35	16,30
Показатель водопоглощения по массе $\Delta_w$ , %	43,80	29,10

Анализ данных показывает, что для добавки НШ выявлены следующие эффекты при оптимальной концентрации в 10 масс. %:

- Предел прочности при изгибе  $\sigma_{изг}$  возрос на 154 %.
- Предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти  $\sigma_{\perp}$  возрос на 204 %.
- Разбухание по толщине снизилось на 32 %.
- Водопоглощение по массе  $\Delta_w$  снизилось на 62 %.

Анализ данных показывает, что для добавки АДК выявлены следующие эффекты при оптимальной концентрации в 1 масс. %:

- Предел прочности при изгибе  $\sigma_{изг}$  возрос на 192 %.
- Предел прочности при растяжении перпендикулярно пласти  $\sigma_{\perp}$  возрос на 143 %.
- Разбухание по толщине снизилось на 27 %.
- Водопоглощение по массе  $\Delta_w$  снизилось на 34 %.

Анализ данных в таблице 6 показывает, что применение АДК улучшает свойства плит. Однако при использовании НШ положительный эффект был достигнут при меньшей

концентрации добавки. Одной из причин этого эффекта может быть трёхмерная сетка, которая, как показало исследование [22], образуется при конденсации водной дисперсии наноструктурированного шунгитового углерода, причём при высушивании и, вероятно, при горячем прессовании структура сетки сохраняется, сопротивляясь отрыву склеенных древесных частиц друг от друга и повышая тем самым прочность изготовленных ДСтП.

Комментируя указанные в таблице 6 результаты влияния второй добавки, отметим, что свойства АДК в качестве армирующей добавки для полимеров известны достаточно давно. Относительно низкая стоимость аморфного диоксида кремния даёт возможность его масштабного применения для многих полимерных систем, однако большинство исследований, как показала их история с середины XX в., относятся к разработке резиновых смесей для производства автомобильных шин [23].

Таким образом, результаты данного исследования вносят определённый вклад в развитие охарактеризованного в первом разделе данной статьи относительно нового направления использования наноструктурированных добавок шунгита и аморфного диоксида кремния в технологии изготовления ДСтП. Практическая значимость представленных выше результатов заключается в возможности их использования для обоснования рекомендаций по совершенствованию технологии производства древесно-стружечных плит и повышения их технико-экономических, физико-механических и экологических характеристик. Новизну результатов данного исследования и их техническую эффективность подтверждают патенты [24], [25], [26]. Полученные в данной работе количественные оценки указывают на новые возможности повышения технико-экономической эффективности древесно-стружечных плит, в связи с чем целесообразно продолжить исследование влияния различных сочетаний моди-фицированного связующего и отвердителей на характеристики плит с учётом современных экологических норм.

## Список литературы

1. Геометрические аспекты моделирования прочности древесно-стружечной плиты при растяжении перпендикулярно пласти / С. Б. Васильев, Н. Г. Панов, Н. А. Доспехова [и др.] // Resources and Technology. 2021. № 2. С. 1—17.
2. Global Perspectives on Particleboard Production: Key Trends, Challenges, and Opportunities / I. Aksenov, G. Trunin, M. Tuzhilova [et al.] // International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering — MPCPE. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024. P. 17—26.
3. *Yildirim M., Candan Z., Gonultas O.* Chemical performance analysis of nanocellulose/boron-compound-reinforced hybrid UF resin // Green Materials. 2021. No. 10 (2). P. 90—96.
4. *Леонович А. А.* О подходах к изучению механизма образования древесных плит // Древесные плиты и фанера: теория и практика: XXVIII Всерос. научно-практич. конф. СПб., 2025. С. 4—9.
5. Условия применения малотоксичных карбамидоформальдегидных клеёв при склеивании мебельных щитов / Д. О. Чернышев, В. А. Романов, А. А. Пыкин [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2024. № 1 (88). С. 165—170.

6. Eco-friendly particleboards with low formaldehyde emission and enhanced mechanical properties produced with foamed urea-formaldehyde resins / O. Kelleci, S. E. Koksal, D. Aydemir [et al.] // *Journal of Cleaner Production*. 2022. No. 379. P. 134785.
7. Разиньков Е. М., Сладких Г. А. Исследование физико-механических свойств древесно-стружечных плит // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика*. 2016. Т. 4, № 5-2. С. 205—210.
8. *Волынский В. Н.* Технология древесных плит и композиционных материалов. СПб.: Лань, 2020. 332 с.
9. Использование модифицированного лигнина для снижения токсичности древесных плит / И. В. Тимофеев, Д. В. Иванов, А. А. Леонович [и др.] // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2018. № 222. С. 240—253.
10. Угрюмов С. А., Цветков В. Е. Наномодифицированные клеевые составы для производства плитных материалов на основе древесных наполнителей и костры льна // *Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник*. 2012. № 7. С. 127—130.
11. Клеевая композиция для изготовления древесно-стружечных композиционных материалов / В. С. Пикулев, Ю. С. Саркисов, Н. П. Горленко [и др.] // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. № 4. С. 145—154.
12. Мачнева О. П. Влияния различных отвердителей на свойства древесно-стружечных плит // *Наука без границ*. 2018. №. 10 (27). С. 57—61.
13. Разработка технологии модификации карбамидоформальдегидных смол / Д. А. Перминова, В. С. Мальков, А. С. Князев [и др.] // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. № 1. С. 159—162.
14. Древесные композиционные материалы на основе карбамидоформальдегидных смол, модифицированных гликолурилом / Д. А. Перминова, В. С. Мальков, И. А. Курзина [и др.] // *Вестник Томского государственного университета*. 2015. № 391. С. 238—241.
15. Древесно-стружечные плиты на основе карбамидоформальдегидной смолы, модифицированной наноразмерным шунгитом // Н. Г. Панов, А. В. Питухин, С. С. Рожков [и др.] // *Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник*. 2012. № 2. С. 135—138.
16. Panov N. G., Vasiliev S. B., Kolesnikov G. N. Influence of Shungite Modifier on Technological Properties of Polymeric Glue Based on Urea-Formaldehyde Resin // *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2020. Vol. 992. P. 434—438.
17. The effect of the size and shape of wood particles on the tensile strength perpendicular to the plane of the particleboard: experiments and modeling / S. Vasiliev, N. Panov, N. Dospekhova [et al.] // *Journal of Applied Engineering Science*. 2021. Vol. 19, no. 2. P. 383—389.
18. Использование модифицированной клеевой композиции для изготовления древесно-стружечных плит из низкокачественной древесины / А. В. Питухин, С. Б. Васильев, Г. Н. Колесников [и др.] // *Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник*. 2016. Т. 20, № 3. С. 41—47.
19. Панов Н. Г. Модификация связующего наноматериалом для производства древесных композиционных материалов // *I Международный инженерный форум «Ресурсы и технологии: интеграция науки и бизнеса»*. Петрозаводск, 2024. С. 186—188.
20. Шунгитовые породы Карелии: от геологических исследований к перспективам использования в инновационных технологиях / Ю. Е. Дейнес, В. В. Ковалевский, А. В. Первунина [и др.] // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2021. № 7. С. 72—88.

21. Исследование наноразмерного кварца шунгитовых пород / Н. Д. Шарпарь, А. А. Ковальчук, А. С. Горюнов [и др.] // *Оптический журнал*. 2023. Т. 90, № 9. С. 102—113.
22. Рожкова Н. Н. Агрегация и стабилизация наночастиц углерода шунгитов // *Экологическая химия*. 2012. Т. 21, № 4. С. 240—251.
23. Сугопяко Д. В., Зенитова Л. А. Диоксид кремния как армирующий наполнитель полимерных материалов // *Вестник Казанского технологического университета*. 2015. Т. 18, № 5. С. 94—100.
24. Клеевая композиция с наномодификатором для древесно-стружечных плит / Рожкова Н. Н., Панов Н. Г., Питухин А. В., Васильев С. Б., Колесников Г. Н., Рожков С. С. Патент RU 2520449. Опубл. 25.04.2014.
25. Клеевая композиция с нанопористым модификатором для изготовления древесно-стружечных плит и изделий из дерева / Панов Н. Г., Питухин А. В., Колесников Г. Н., Васильев С. Б. Патент RU 2642568. Опубл. 25.01.2018.
26. Древесно-стружечная плита / Питухин А. В., Костюкевич В. М., Васильев С. Б., Панов Н. Г., Сюнёв В. С., Колесников Г. Н. Патент 148212. Опубл. 28.10.2014.

## References

1. Vasiliev S. B., Panov N. G., Dospekhova N. A., Kolesnikov G. N. Geometric aspects of modeling the strength of particleboard under tension perpendicular to the plate. *Resources and Technology*, 2021, no. 18 (2), pp. 1—17. (In Russ.)
2. Aksenov I., Trunin G., Tuzhilova M., Popova M. Global Perspectives on Particleboard Production: Key Trends, Challenges, and Opportunities. In *International Conference on Materials Physics, Building Structures & Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering — MPCPE*. Cham, Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 17—26.
3. Yildirim M., Candan Z., Gonultas O. Chemical performance analysis of nanocellulose/boron-compound-reinforced hybrid UF resin. *Green Materials*, 2021, no. 10 (2), pp. 90—96.
4. Leonovich A. A. On approaches to studying the mechanism of formation of wood boards. In *the collection: Wood boards and plywood: theory and practice: XXVIII All-Russian scientific and practical conference*. Saint Petersburg, 2025, pp. 4—9. (In Russ.)
5. Chernyshev D. O., Romanov V. A., Pykin A. A., Sedykh A. V. Conditions of application of low-toxic urea-formaldehyde adhesives in gluing furniture panels. *Forests of Russia and their management*, 2024, no. 1 (88), pp. 165—170. (In Russ.)
6. Kelleci O., Koksal S. E., Aydemir D., Sancar S. Eco-friendly particleboards with low formaldehyde emission and enhanced mechanical properties produced with foamed urea-formaldehyde resins. *Journal of Cleaner Production*, 2022, no. 379, pp. 134785.
7. Razinkov E. M., Sladkikh G. A. Study of physical and mechanical properties of wood chipboards. *Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2016, vol. 4, no. 5-2, pp. 205—210. (In Russ.)
8. Volynsky V. N. Technology of wood boards and composite materials. Saint Petersburg, Lan, 2020. 332 p. (In Russ.)
9. Timofeev I. V., Ivanov D. V., Leonovich A. A., Krutov S. M. Use of modified lignin to reduce the toxicity of wood-based panels. *Bulletin of the St. Petersburg Forest Engineering Academy*, 2018, no. 222, pp. 240—253. (In Russ.)
10. Ugryumov S. A., Tsvetkov V. E. Nanomodified adhesive compositions for the production of board materials based on wood fillers and flax shives. *Bulletin of the Moscow State Forest University — Forest Bulletin*, 2012, no. 7, pp. 127—130. (In Russ.)

11. Pikulev V. S., Sarkisov Yu. S., Gorlenko N. P., Klopotov A. A., Rakhmanova I. A. Adhesive composition for the production of wood-chip composite materials. *Bulletin of Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*, 2018, no. 20 (4), pp. 145—154. (In Russ.)
12. Machneva O. P. Influence of various hardeners on the properties of particle boards. *Science without borders*, 2018, no. 10 (27), pp. 57—61. (In Russ.)
13. Perminova D. A., Malkov V. S., Knyazev A. S., Dakhnavi E. M. Development of technology for modification of urea-formaldehyde resins. *Bulletin of Kazan Technological University*, 2015, no. 18 (1), pp. 159—162. (In Russ.)
14. Perminova D. A., Malkov V. S., Kurzina I. A., Babushkina T. B. Wood composite materials based on urea-formaldehyde resins modified with glycoluril. *Bulletin of Tomsk State University*, 2015, no. 391, pp. 238—241. (In Russ.)
15. Panov N. G., Pitukhin A. V., Rozhkov S. S., Tsvetkov V. E., Sanaev V. G., Filyulina O. V. Chipboards based on urea-formaldehyde resin modified with nanosized shungite. *Lesnoy Vestnik*, 2012, no. 2 (85), pp. 135—138. (In Russ.)
16. Panov N. G., Vasiliev S. B., Kolesnikov G. N. Influence of Shungite Modifier on Technological Properties of Polymeric Glue Based on Urea-Formaldehyde Resin. *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2020, vol. 992, pp. 434—438.
17. Vasiliev S., Panov N., Dospekhova N., Rakovskaya M., Pronin I., Kolesnikov G. The effect of the size and shape of wood particles on the tensile strength perpendicular to the plane of the particleboard: Experiments and modeling. *Journal of Applied Engineering Science*, 2021, no. 19 (2), pp. 383—389.
18. Pitukhin A. V., Vasiliev S. B., Kolesnikov G. N., Panov N. G., Tsvetkov V. E., Sanaev V. G. Use of a modified adhesive composition for the production of particleboards from low-quality wood. *Lesnoy Vestnik*, 2016, no. 20 (3), pp. 41—47. (In Russ.)
19. Panov N. G. Modification of a binding nanomaterial for the production of wood composite materials. *I International Engineering Forum «Resources and Technologies: Integration of Science and Business»*. Petrozavodsk, 2024, pp. 186—188. (In Russ.)
20. Deines Yu. E., Kovalevsky V. V., Pervunina A. V., Romashkin A. E., Rychanchik D. V., Ieshko E. P. Shungite rocks of Karelia: from geological research to prospects for use in innovative technologies. *Transactions of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2021, no. 7, pp. 72—88. (In Russ.)
21. Sharpar N. D., Kovalchuk A. A., Ekimova T. A., Rozhkova N. N. Study of nano-sized quartz from shungite rocks. *Optical journal*, 2023, vol. 90, no. 9, pp. 102—113. (In Russ.)
22. Rozhkova N. N. Aggregation and stabilization of shungite carbon nanoparticles. *Ecological chemistry*, 2012, vol. 21, no. 4, pp. 240—251. (In Russ.)
23. Sugonyako D. V., Zenitova L. A. Silicon dioxide as a reinforcing filler for polymeric materials. *Bulletin of the Kazan Technological University*, 2015, vol. 18, no. 5, pp. 94—100 (In Russ.)
24. Rozhkova N. N., Panov N. G., Pitukhin A. V., Vasiliev S. B., Kolesnikov G. N., Rozhkov S. S. Adhesive composition with nanomodifier for chipboards. Patent RU 2520449. Published 25.04.2014. (In Russ.)
25. Panov N. G., Pitukhin A. V., Kolesnikov G. N., Vasiliev S. B. Adhesive composition with nanoporous modifier for the production of chipboards and wood products. Patent RU 2642568. Published 01.25.2018. (In Russ.)
26. Pitukhin A. V., Kostyukevich V. M., Vasiliev S. B., Panov N. G., Syuney V. S., Kolesnikov G. N. Chipboard. Patent RU 148212. Published 10.28.2014. (In Russ.)