

## Влияние наноразмерного оксида кремния на эксплуатационные характеристики фанеры

Е.В. Кантиева<sup>a</sup>, Л.В. Пономаренко<sup>b</sup>, Е.В. Томина<sup>c</sup>, Д.К. Томенко<sup>d</sup>

Воронежский государственный лесотехнический университет, ул. Тимирязева, 8, Воронеж, Россия  
<sup>a</sup> kantievaev@vglu.ru, <sup>b</sup> ponomarenkoLV@vglu.ru, <sup>c</sup> tomina-e-v@yandex.ru, <sup>d</sup> dimatankov64@gmail.com  
<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1353-2033>,  
<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6100-4433>  
 Статья поступила 01.09.2022 г, принята 15.09.2022

*Использование нанотехнологий в производстве клееных древесных материалов предоставляет многочисленные возможности для получения продукции функционального назначения с улучшенными свойствами. В статье исследовано влияние наноразмерного оксида кремния в составе карбамидоформальдегидного клея на прочность фанеры и эмиссию формальдегида. Наноразмерный диоксид кремния синтезировали золь-гель методом. Преобладающая фракция наночастиц SiO<sub>2</sub>, согласно данным просвечивающей электронной микроскопии, имеет размер в интервале 50–80 нм. В состав клея входили карбамидоформальдегидная смола, хлористый аммоний и наноразмерный оксид кремния в количестве 0–10 м.ч. Полученным клеем склеивали трехслойную 4 мм березовую фанеру. Испытания на прочность при скалывании по клеевому слою фанеры проводили согласно ГОСТ 9624-2009, количество формальдегида определяли с помощью баночного метода (метод WKI). Исследования показали, что добавление наноразмерного оксида кремния в карбамидоформальдегидный клей приводит к увеличению прочности фанеры и снижению эмиссии формальдегида. Наибольшая прочность при скалывании по клеевому слою фанеры наблюдается при 1,5 м.ч. SiO<sub>2</sub>, что на 40 % больше по сравнению с контрольным образцом. Наименьшее значение эмиссии формальдегида наблюдается при добавлении 8,5 м.ч. оксида кремния, что позволяет снизить эмиссию формальдегида на 20 % по сравнению с контрольным образцом, склеенным без SiO<sub>2</sub>. Оптимальный диапазон количества наноразмерных частиц оксида кремния в составе клея для получения фанеры с повышенными прочностными свойствами и низкой токсичностью составляет 1,5–8,5 м.ч. При этом повышение прочности составляет 20–40 %, снижение эмиссии формальдегида — 6–20 %.*

**Ключевые слова:** фанера; наноразмерный оксид кремния; прочность; эмиссия формальдегида.

## The effect of nanoscale silicon oxide on the operational characteristics of plywood

E.V. Kantieva<sup>a</sup>, L.V. Ponomarenko<sup>b</sup>, E.V. Tomina<sup>c</sup>, D.K. Tomenko<sup>d</sup>

Voronezh State Forestry Engineering University; 8, Timiryazev St., Voronezh, Russia  
<sup>a</sup> kantievaev@vglu.ru, <sup>b</sup> ponomarenkoLV@vglu.ru, <sup>c</sup> tomina-e-v@yandex.ru, <sup>d</sup> dimatankov64@gmail.com  
<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-8352-1941>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1353-2033>,  
<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6100-4433>  
 Received 01.09.2022, accepted 15.09.2022

*The use of nanotechnology in the production of glued wood materials provides numerous opportunities for obtaining functional products with improved properties. The article investigates the effect of nanoscale silicon oxide in the composition of urea-formaldehyde glue on the strength of plywood and the emission of formaldehyde. Nanoscale silicon dioxide is synthesized by sol-gel method. The predominant fraction of SiO<sub>2</sub> nanoparticles, according to transmission electron microscopy data, has a size in the range of 50-80 nm. The glue consists of carbamide-formaldehyde resin, ammonium chloride and nanoscale silicon oxide in an amount of 0-10 m.p. The resulting glue is glued together with a three-layer 4 mm birch plywood. Strength tests for chipping on the adhesive layer of plywood are carried out according to GOST 9624-2009, the amount of formaldehyde is determined using the cupping method (WKI method). Studies have shown that the addition of nanoscale silicon oxide to urea-formaldehyde glue leads to an increase in the strength of plywood and a decrease in formaldehyde emissions. The greatest strength when chipping along the adhesive layer of plywood is observed at 1.5 m.p. SiO<sub>2</sub>, which is 40% more compared to the control sample. The lowest value of formaldehyde emission is observed with the addition of 8.5 m.p. silicon oxide, which reduces the emission of formaldehyde by 20% compared to the control sample glued without SiO<sub>2</sub>. The optimal range of the number of nanoscale silicon oxide particles in the composition of the adhesive for the production of plywood with increased strength properties and low toxicity is 1.5-8.5 m.p. At the same time, the increase in strength is 20-40%, and the reduction in formaldehyde emissions is 6-20%.*

**Keywords:** plywood; nanoscale silicon oxide; strength; formaldehyde emission.

**Введение.** Имея большие площади лесов, российские производители активно занимаются ее переработкой, в том числе производством фанеры. Фанера представляет собой плитный листовой материал, который

широко применяется в мебельной, строительной отрасли, судо- и вагоностроении и т. д. Фанера также является одним из немногих материалов, которые экспортируются в другие страны, так как березовое сырье, используемое для ее производства, благодаря месту и условиям произрастания имеет высокие качественные характеристики. На качество фанеры также оказывают влияние свойства клеевых материалов, которые обуславливают такие эксплуатационные характеристики, как водостойкость, прочность, токсичность и т. д. Большие объемы фанеры производятся с участием карбаминоформальдегидной смолы (КФС) как основы клеевой композиции. КФС является смесью высокомолекулярных продуктов, которые при определенных условиях способны к отверждению. На производство формальдегидных смол приходится половина всего мирового производства терморезактивных смол, а основными производителями являются США, Япония, Германия и Россия. В деревообрабатывающей промышленности России на долю карбаминоформальдегидных смол приходится до 85 % от всех видов клеев. Это обусловлено тем, что карбаминоформальдегидные смолы доступны и являются дешевыми в производстве [1]. Однако смола — не единственный компонент клея. В его состав могут входить отвердители, наполнители, пластификаторы, модификаторы и т. д. Каждый из них придает клею определенные положительные характеристики. В настоящее время в качестве наполнителей смол используются различные нанодобавки [2].

Влияние наночастиц на физические и механические свойства клеев и продукции с их использованием является актуальной темой для изучения. В работах [3; 4] установлено положительное влияние включения небольшого процента наночастиц оксидов  $Al_2O_3$  и  $CuO$  в карбаминоформальдегидную смолу с точки зрения ее реологии, термодинамической механики, термической кинетики и морфологии. Авторы [5] показали, что добавление 5 масс.% нанокристаллического лигнина в клей повышает прочность на сдвиг с 8,7 до 10,9 МПа, открывая возможность использования экологически безопасного наноразмерного лигнина в традиционных фенольных клеях для древесины с улучшенными адгезионными характеристиками.

В работе [6] авторы указывают на повышение водостойкости древесностружечных плит при добавлении в связующее наночастиц кремнезема  $SiO_2$ . Tanveer Ahmed Khan et al. модифицировали карбаминоформальдегидную смолу микроуглеродистыми материалами [7]. Древесностружечные плиты на основе такой смолы имели пониженное содержание свободного формальдегида, меньше разбухали по толщине. Damian Łukawski et al. использовали углеродистые нанотрубки (УНТ) в качестве модификатора для ДСтП [8]. УНТ в виде 0,2%-ной водной суспензии наносили на стружку, которую затем перемешивали с фенолоформальдегидной смолой. Полученные плиты обладали повышенной огнестойкостью. В работе [9] авторы для повышения прочностных свойств фанеры предлагают использовать 2%-ный водный гель нанокристаллической целлюлозы.

R.R. Morais Júnior, G.V. Cardoso, E. S. Ferreira, H.L. Costa в своей работе [10] исследовали характеристики, механические свойства и стойкость к истиранию древесных плит, армированных кристаллами наноцеллюлозы. Б.М. Горелов, В.Н. Мищенко, А.Г. Гирченко в исследовании [11] изучали деструкцию и состав летучих веществ карбаминоформальдегидной смолы, наполненной наноразмерными материалами.

Таким образом, нанокompозиты предоставляют широкие возможности в получении материалов функционального назначения с улучшенными свойствами.

*Цель работы* — совершенствование технологии производства фанеры, направленное на улучшение прочностных и экологических характеристик путем введения в состав карбаминоформальдегидных смол наноразмерных наполнителей.

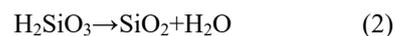
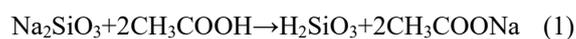
*Материалы и методы.* В работе исследовались свойства фанеры, склеенной карбаминоформальдегидным клеем с наночастицами оксида кремния. Эксперименты проводились в лабораториях на кафедрах механической технологии древесины и химии Воронежского государственного лесотехнического университета.

Для склеивания фанеры использовался березовый лущеный шпон толщиной 1,5 мм. размером 400×400 мм, соответствующий ГОСТ 99-2016 «Шпон лущеный. Технические условия» [12]. Толщина готовой фанеры 4 мм, слойность — 3. Смола карбаминоформальдегидная КФ-Ж по ГОСТ 14231-88 [13]. Рецепт клея, м.ч.:

- а) смола КФ-Ж — 100;
- б) хлористый аммоний — 1;
- в) наноразмерный оксид кремния — 0–10.

Синтез наноразмерного диоксида кремния возможен методами распылительного пиролиза [14; 15], плазмохимическим [16], золь-гель [17; 18].

В данной работе наночастицы  $SiO_2$  синтезировали золь-гель методом. При добавлении к 70%-ному раствору уксусной кислоты ( $CH_3COOH$ ) кристаллогидрата силиката натрия ( $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$ ) при постоянном перемешивании магнитной мешалкой выпадал гелеобразный осадок в соответствии с реакцией (1). Перемешивание продолжали еще 1 ч, потом осадок отфильтровывали, многократно промывали дистиллированной водой, высушивали в сушильном шкафу при 110 °С в течение 30 мин для удаления гидратной воды (реакция 2), получая аморфный оксид кремния:



Формирование кристаллического  $SiO_2$  осуществляли путем прокалывания аморфного порошка при температуре 450 °С в течение 1 ч в муфельной печи «SNOL8.2/1100».

Фазовый состав нанопорошка оксида кремния определяли методом рентгенофазового анализа (РФА, рентгеновский дифрактометр Empyrean B.V. с анодом  $Cu$  ( $\lambda = 1.54060$  нм)). Съемку проводили в интервале углов  $2\theta = 10-80^\circ$  с шагом  $0,02^\circ$ . Размер и морфологию частиц синтезированного  $SiO_2$  оценивали по данным просвечива-

ющей электронной микроскопии (ПЭМ, просвечивающий электронный микроскоп Carl Zeiss Libra-120, Carl Zeiss NTS GmbH, Германия). Гистограмму распределения частиц по размерам строили с использованием программы с открытым исходным кодом «ImageJ», версия 1.53k.

Эксперимент проводился методом униформ-ротатбельного планирования, на основании известных технологических и теоретических данных были определены варьируемые и постоянные факторы.

Переменными факторами являлись расход клея, который варьировался в диапазоне 110–130 г/м<sup>2</sup>, и количество массовых частей наполнителя — 0–10.

В качестве постоянных факторов были приняты количество листов в одном промежутке пресса — 1, давление — 1,8 МПа, температура плит пресса — 120 °С и продолжительность прессования 120 с.

Из полученной фанеры вырезались образцы, размерами и формой соответствующими видам испытаний, не менее чем через 24 ч после прессования. На выходе контролировали предел прочности при скалывании по клеевому слою фанеры, эмиссию формальдегида.

Определение прочности при скалывании по клеевому слою фанеры проводили согласно ГОСТ 9624-2009 «Древесина слоистая клееная. Метод определения прочности при скалывании» [11] после выдержки образцов в воде температурой 20 °С в течение 24 ч.

Предел прочности при скалывании определяли по формуле (3) для каждого образца с точностью до 0,5 МПа:

$$\tau_{ск} = \frac{P_{max}}{b \cdot l}, \quad (3)$$

где  $P_{max}$  — максимальное значение разрушающей нагрузки, Н;  $b$  — ширина образца (плоскости скалывания), мм;  $l$  — длина плоскости скалывания, мм.

В качестве результатов прочности при скалывании принимаем среднее арифметическое всех испытанных образцов каждого типа.

Выбросы формальдегида являются важным фактором при оценке воздействия древесных плит на окружающую среду и здоровье человека. В данной работе количество формальдегида определяли с помощью баночного метода (метод WKI). Испытания проводились на контрольных образцах и на образцах фанеры с добавлением оксида кремния (SiO<sub>2</sub>). В опытах использовали образцы с размерами 25x25 мм, которые попарно подвешивали в герметично закрытых сосудах над дистиллированной водой, объем которой составлял 50 мл, так, чтобы образцы не касались воды. Далее образцы были помещены в сушильный шкаф, где они выдерживались при температуре 70 °С в течение 40 мин, после чего образцы охлаждались до комнатной температуры. Для определения количества выделившегося формальдегида использовали спектрофотометр ПЭ-5400ВИ.

Для этого кювету 10 мм наполняли дистиллированной водой (для контроля), а в другую кювету отбирали раствор из сосуда и добавляли в эту кювету ацетил ацетон в объеме 1 мл для определения количества выделившегося формальдегида. Опыты проводили при длине волны  $\lambda = 414$  нм [12].

**Результаты.** По данным РФА, синтезированный порошок оксида кремния не содержит примесей (ICDD карточка 00-046-1045). На дифрактограмме идентифицируется широкий рефлекс высокой интенсивности, отвечающий оксиду кремния (рис. 1). Значительное уширение рефлекса может быть связано с присутствием значимой доли аморфной фазы оксида кремния, несмотря на отжиг при высокой температуре.

Согласно данным просвечивающей электронной микроскопии, для наночастиц SiO<sub>2</sub> характерна выраженная дисперсия по размерам от 30 до 140 нм (рис. 2). Преобладающая фракция частиц имеет размер в интервале 50–80 нм. Часть частиц имеет огранку, присутствуют частицы с формой, близкой к сферической, что свидетельствует о нахождении их в аморфном состоянии и в целом коррелирует с результатами РФА.

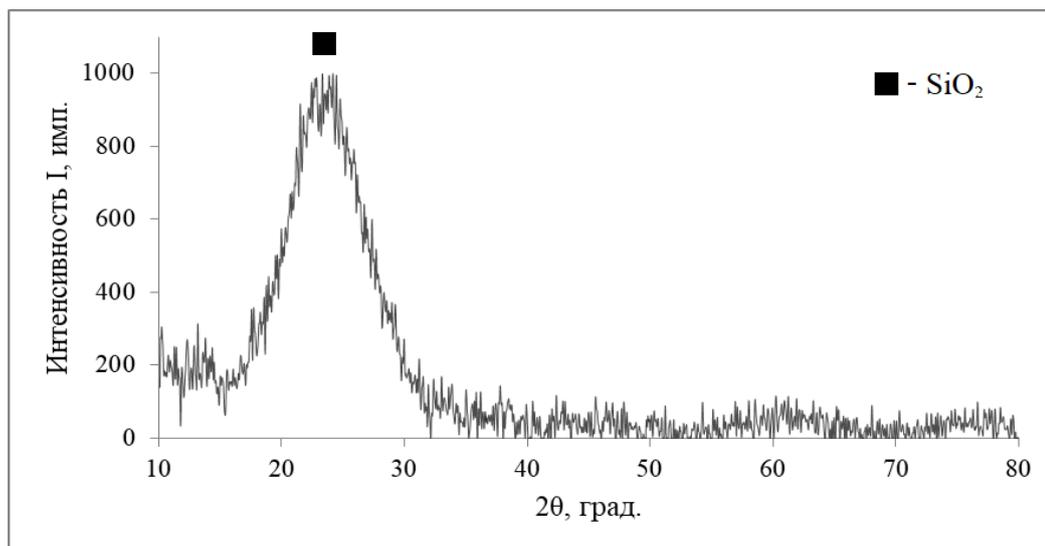


Рис. 1. Дифрактограмма синтезированного порошка оксида кремния

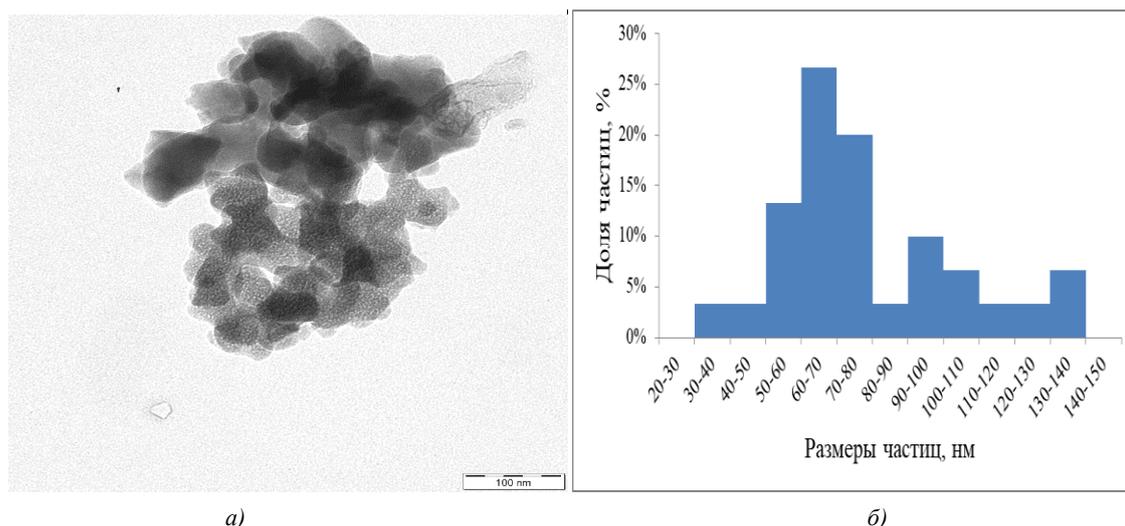
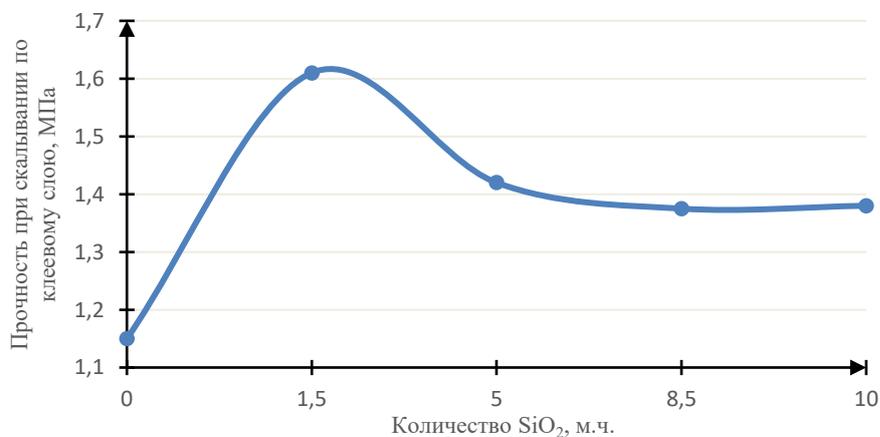


Рис. 2. ПЭМ-изображение (а) и гистограмма распределения по размерам (б) частиц  $\text{SiO}_2$

Влияние оксида кремния в составе клея на исследуемые свойства фанеры показаны на рис. 2, 3. Добавление наноразмерного оксида кремния в карбамидоформальдегидный клей приводит к увеличению прочности фанеры (рис. 3). Так, при добавлении 1,5 м.ч.  $\text{SiO}_2$  прочность фанеры возрастает с 1,15 МПа (контрольный образец) до 1,61 МПа. При дальнейшем увеличении  $\text{SiO}_2$  прочность снижается, и при 10 м.ч. наноразмерного оксида кремния составляет 1,38 МПа. Наибольшая прочность при скальвании по клеевому слою фанеры наблюдается при 1,5 м.ч.  $\text{SiO}_2$ , что на 40 % больше по сравнению с кон-

трольным образцом. Присутствие наноразмерного  $\text{SiO}_2$  в составе клея приводит к снижению эмиссии формальдегида из фанеры (рис. 4). Наименьшее значение эмиссии формальдегида наблюдается при добавлении 8,5 м.ч. оксида кремния и составляет 2,04 %, что позволяет снизить эмиссию формальдегида на 20 % по сравнению с контрольным образцом, склеенным без  $\text{SiO}_2$ . Дальнейшее увеличение количества наноразмерного оксида кремния не приводит к изменению эмиссии формальдегида.



Р и с . 3. Предел прочности при скальвании по клеевому слою фанеры от количества оксида кремния в клею

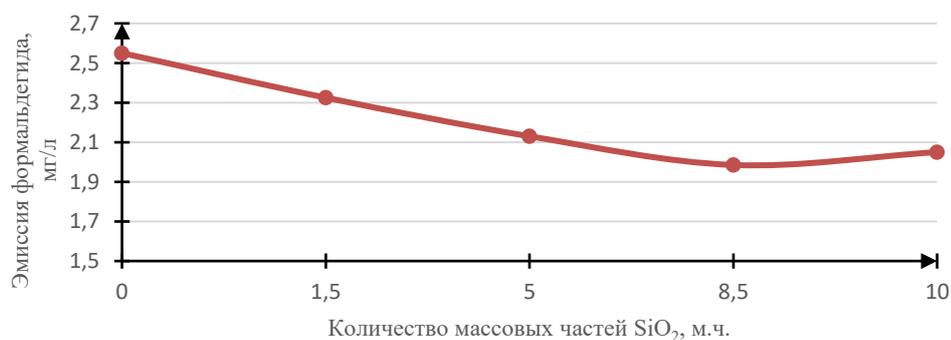


Рис. 4. Эмиссия формальдегида в зависимости от количества оксида кремния в клею

Вероятно, эффект от введения наноразмерного оксида кремния может быть связан с образованием разветвленных цепочек  $\sim\text{Si-O-Si}\sim$ , которые связывают свободный формальдегид в процессе отверждения, углубляют поликонденсацию карбаминоформальдегидной смолы и увеличивают прочность склеивания.

Оптимальные значения содержания оксида кремния, соответствующие экстремумам прочности склеивания фанеры и выделения формальдегида, разные. Так для получения фанеры наибольшей прочности необходимо введение 1,5 м.ч. оксида кремния, а для минимальной эмиссии формальдегида — 8,5 м.ч. Таким образом, оптимальное количество  $\text{SiO}_2$  для изготовления фанеры составляет 1,5–8,5 м.ч. При использовании фанеры внутри помещений (отделка помещений, изготовление мебели) рекомендуется брать максимальное количество оксида кремния из указанного диапазона. При использовании фанеры в каче-

стве конструкционного материала, где важна повышенная прочность, необходимое количество  $\text{SiO}_2$  должно быть в пределах 1,5 м.ч.

#### Заключение

1. Введение наноразмерных частиц оксида кремния увеличивает прочность фанеры на 40 %. Оптимальное количество данного наполнителя составляет 1,5 м.ч.

2. Использование наночастиц оксида кремния способствует снижению эмиссии формальдегида до 20 %. Оптимальное количество данного наполнителя составляет 8,5 м.ч.

3. Оптимальный диапазон количества наноразмерных частиц оксида кремния в составе клея для получения фанеры с повышенными прочностными свойствами и низкой токсичностью составляет 1,5–8,5 м.ч. При этом повышение прочности составляет 20–40 %, а снижение эмиссии формальдегида — 6–20 %.

#### Литература

1. Волинский В.Н. Технология клеёных материалов. 2-е изд. СПб.: Лань, 2020. 320 с.
2. Гуц И.И., Кантиева Е.В., Пономаренко Л.В. Обзор способов повышения качества клееных древесных материалов // Эколого-ресурсосберегающие технологии в науке и технике: материалы Всерос. науч.-технической конф. (19-20 окт. 2021 г.). Воронеж, 2021. С. 60-66.
3. Pedro Henrique Gonzalez de Cademartori, Mirela Angelita Artner, Rilton Alves de Freitas, Washington Luiz Esteves Magalhaes. Alumina nanoparticles as formaldehyde scavenger for urea-formaldehyde resin: Rheological and in-situ cure performance // Composites. 2019. Part B 176. P. 107281.
4. Tengfei Yi Congnan Guo, Sisi Zhao, Ke Zhan, Wei Gao, Long Yang. The simultaneous preparation of nano cupric oxide (CuO) and phenol formaldehyde (PF) resin in one system: aimed to apply as wood adhesives // Guanben Du European Journal of Wood and Wood Products. 2020. V. 78. P. 471-482.
5. Sandhya P.K., Sreekalab M.S., Moothetty Padmanabhana, Sabu Thomas. Mechanical and thermal properties of ZnO anchored GO reinforced phenol formaldehyde resin // Diamond & Related Materials. 2020. V. 108. P. 107961.
6. Ana C.M. Valle, Bruno S.Ferreira, Glauçia A.Prates, Danielle Gouveia, Cristiane I. de Campos. Physical and mechanical properties of particleboard from Eucalyptus grandis produced by urea formaldehyde resin with  $\text{SiO}_2$  nanoparticles Engenharia Agrícola, Jaboticabal. V. 40, № 3,may/jun. 2020. P. 289-293. URL: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n3p289-293/2020> (дата обращения: 15.09.2022).
7. Tanveer Ahmed Khan, Seounguk Jang, Hyun-Joong Kim, Arun Gupta, Saidatul Shima Jamari, Mohammed Nasir, M. Asim. Synthesis of micro carbonaceous material by pyrolysis of rubber wood and its effect on properties of urea-formaldehyde (UF) resin // International Journal of Adhesion & Adhesives 99, June 2020, 102589. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102589> (дата обращения: 15.09.2022).
8. Łukawski Damian, Dudkowiak Alina, Grześkowiak Wojciech, Dukarska Dorota, Mazela Bartłomiej, Lekawa-Raus Agnieszka. The influence of surface modification of wood particles with carbon nanotubes on properties of particleboard glued with phenol-formaldehyde resin Drewno. 2019. V. 62. № 203. P. 93-105.
9. Шамаев В.А., Разиньков Е.М., Ищенко Т.Л. Повышение прочности склеивания шпона в технологии фанеры // Древесные плиты и фанера: теория и практика: материалы XXIV Всерос. науч.-практическая конф. (17-18 марта 2021 г.). СПб.: Политех-пресс, 2021. С. 117-120.
10. Morais Júnior R.R., Cardoso G.V., Ferreira E.S., Costa H.L. Surface characterization, mechanical and abrasion resistance of nanocellulose reinforced wood panels Surface Topography: Metrology and Properties. V. 8. № 2, 24 April 2020. URL: <https://doi.org/10.1088/2051-672X/ab8aa5> (дата обращения: 15.07.2022).
11. Gorelov B.M., Mishchenko V.N., Girchenko A.G. Destruction of urea-formaldehyde resin filled with silica materials. Surface. 2009. Issue 1 (16). Bibliogr.: 19 titles. Rus. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/39295> (дата обращения: 15.09.2022).
12. ГОСТ 99-2016. Шпон лущёный. Технические условия. Введ. с 01.04.2018. М.: Стандартинформ, 2017. 11 с.
13. ГОСТ 14231-88. Смолы карбаминоформальдегидные. Технические условия. Введ. с 01.07.1989. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. 14 с.
14. Mueller R., Mädle L., Patsinis S.E. Nanoparticle synthesis at high production rates by flame spray polsis // Chemical Engineering Science. 2003. V. 58, iss. 10. P. 1969-1976.
15. Wegner K. Pilot plants for industrial nanoparticle production by flame spray pyrolysis // KONA Powder and Particle Journal. 2011. № 29. P. 251-265.
16. Im J.H., Lee J.H., Park D.W. Synthesis of nano sized tin oxide powder by argon plasma jet at atmospheric pressure // Surface & Coatings Technology. 2008. V. 202. P. 5471-5475.
17. Шабанова Н.А., Саркисов П.Д. Основы золь-гель технологии нанодисперсного кремнезема. М.: Академкнига, 2004. 208 с.
18. Rahman I.A. An optimized sol-gel synthesis of stable primary equivalent silica particles // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2007. V. 294, iss. 1. P. 102-110.
19. ГОСТ 9624-2009. Древесина слоистая клеёная. Метод определения прочности при скалывании. Введ. с 01.01.2011. М.: Стандартинформ, 2010. 11 с.
20. ISO 12460-4:2016. Wood-based panels. Determination of formaldehyde release. Part 4: Desiccator method: International standard: 2015-11-24 / the International Organization for Standardization. Official publication. Geneva: ISO, 2015. 14 p.

#### References

1. Volynskij V.N. Technology of glued materials. 2-e izd. SPb.: Lan', 2020. 320 p.
2. Guc I.I., Kantieva E.V., Ponomarenko L.V. Overview of ways to improve the quality of glued wood materials // Ekologo-resursosberegayushchie tekhnologii v nauke i tekhnike: mate-

- rialy Vseros. nauch.-tehnicheskoy konf. (19-20 okt. 2021 g.). Voronezh, 2021. P. 60-66.
3. Pedro Henrique Gonzalez de Cademartori, Mirela Angelita Artner, Rilton Alves de Freitas, Washington Luiz Esteves Magalhaes. Alumina nanoparticles as formaldehyde scavenger for urea-formaldehyde resin: Rheological and in-situ cure performance // *Composites*. 2019. Part B 176. P. 107281.
  4. Tengfei Yi Congnan Guo, Sisi Zhao, Ke Zhan, Wei Gao, Long Yang. The simultaneous preparation of nano cupric oxide (CuO) and phenol formaldehyde (PF) resin in one system: aimed to apply as wood adhesives // *Guanben Du European Journal of Wood and Wood Products*. 2020. V. 78. P. 471-482.
  5. Sandhya R.K., Sreekalab M.S., Moothetty Padmanabhana, Sabu Thomas. Mechanical and thermal properties of ZnO anchored GO reinforced phenol formaldehyde resin // *Diamond & Related Materials*. 2020. V. 108. P. 107961.
  6. Ana C.M. Valle, Bruno S.Ferreira, Glaucia A.Prates, Danielle Goveia, Cristiane I. de Campos. Physical and mechanical properties of particleboard from *Eucalyptus grandis* produced by urea formaldehyde resin with SiO<sub>2</sub> nanoparticles *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*. V. 40, № 3,may/jun. 2020. P. 289-293. URL: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n3p289-293/2020> (data obrashcheniya: 15.09.2022).
  7. Tanveer Ahmed Khan, Seounguk Jang, Hyun-Joong Kim, Arun Gupta, Saidatul Shima Jamari, Mohammed Nasir, M. Asim. Synthesis of micro carbonaceous material by pyrolysis of rubber wood and its effect on properties of urea-formaldehyde (UF) resin // *International Journal of Adhesion & Adhesives* 99, June 2020, 102589. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102589> (data obrashcheniya: 15.09.2022).
  8. Łukawski Damian, Dudkowiak Alina, Grześkowiak Wojciech, Dukarska Dorota, Mazela Bartłomiej, Lekawa-Raus Agnieszka. The influence of surface modification of wood particles with carbon nanotubes on properties of particleboard glued with phenol-formaldehyde resin *Drewno*. 2019. V. 62. № 203. P. 93-105.
  9. SHamaev V.A., Razin'kov E.M., Ishchenko T.L. Increasing the strength of veneer bonding in plywood technology // *Drevesnye plity i fanera: teoriya i praktika: materialy HKHIV Vseros. nauch.-prakticheskaya konf. (17-18 marta 2021 g.)*. SPb.: Politekh-press, 2021. P. 117-120.
  10. MoraisJúnior R.R., Cardoso G.V., Ferreira E.S., Costa H.L. Surface characterization, mechanical and abrasion resistance of nanocellulose reinforced wood panels *Surface Topography: Metrology and Properties*. V. 8. № 2, 24 April 2020. URL: <https://doi.org/10.1088/2051-672X/ab8aa5> (data obrashcheniya: 15.07.2022).
  11. Gorelov B.M., Mishchenko V.N., Girchenko A.G. Destruction of urea-formaldehyde resin filled with silica materials. *Surface*. 2009. Issue 1 (16). Bibliogr.: 19 titles. Rus. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/39295> (data obrashcheniya: 15.09.2022).
  12. GOST 99-2016. The veneer is peeled. Technical specifications. Vved. s 01.04.2018. M.: Standartinform, 2017. 11 p.
  13. GOST 14231-88. Carbamide-formaldehyde resins. Technical specifications. Vved. s 01.07.1989. M.: IPK Izd-vo standartov, 2003. 14 p.
  14. Mueller R., Mädle L., Patsinis S.E. Nanoparticle synthesis at high production rates by flame spray polsis // *Chemical Engineering Science*. 2003. V. 58, iss. 10. P. 1969-1976.
  15. Wegner K. Pilot plants for industrial nanoparticle production by flame spray pyrolysis // *KONA Powder and Particle Journal*. 2011. № 29. P. 251-265.
  16. Im J.H., Lee J.H., Park D.W. Synthesis of nano sized tin oxide powder by argon plasma jet at atmospheric pressure // *Surface & Coatings Technology*. 2008. V. 202. P. 5471-5475.
  17. SHabanova N.A., Sarkisov P.D. Fundamentals of sol-gel technology of nanodispersed silica. M.: Akademkniga, 2004. 208 p.
  18. Rahman I.A. An optimized sol-gel synthesis of stable primary equivalent silica particles // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2007. V. 294, iss. 1. P. 102-110.
  19. GOST 9624-2009. Laminated glued wood. Method for determining the strength during chipping. Vved. s 01.01.2011. M.: Standartinform, 2010. 11 p.
  20. ISO 12460-4:2016. Wood-based panels. Determination of formaldehyde release. Part 4: Desiccator method: International-standart: 2015-11-24 / the International Organization for Standardization. Official publication. Geneva: ISO, 2015. 14 p.