 МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ  
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 543.544

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-4-173-184

**Использование наноразмерного ZnO  
в составах для защитной обработки древесины***Е.В. Томина<sup>1,2</sup>, д-р хим. наук, доц.; ResearcherID: [ABF-1895-2020](https://orcid.org/0000-0002-5222-0756),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>**А.И. Дмитренко<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [AAO-8606-2020](https://orcid.org/0000-0001-9296-1762),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9296-1762>**К.В. Жужукин<sup>1</sup>, мл. науч. сотр.; ResearcherID: [AAB-2187-2021](https://orcid.org/0000-0002-7093-3274),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7093-3274>*

<sup>1</sup>Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия, 394087; tomina-e-v@yandex.ru, dmitrenkov2109@mail.ru, kinkon18@yandex.ru

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет, Университетская пл., д. 1, г. Воронеж, Россия, 394018; tomina-e-v@yandex.ru

Поступила в редакцию 18.05.21 / Одобрена после рецензирования 15.08.21 / Принята к печати 19.08.21

**Аннотация.** Естественная структура древесины может выступать как матрица для модифицирования наночастицами различной химической природы. Цель работы – получение нанокомпозита на основе древесины путем ее модифицирования составами из отработанного растительного масла и наночастиц оксида цинка и исследование свойств этого нанокомпозита. В качестве объектов изучения были выбраны образцы древесины березы повислой. Масляной основой разрабатываемых пропиточных составов служило оставшееся после приготовления пищи рафинированное подсолнечное масло, наполнителем и модификатором – наноразмерный порошок оксида цинка. Для синтеза наночастиц оксида цинка применяли золь-гель метод, дающий узкий интервал распределения частиц по размерам. Как исходное вещество для синтеза наночастиц ZnO использовали нитрат цинка  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ , как осадитель – водный раствор аммиака. Синтезированные наночастицы оксида цинка не содержали примесей и имели форму близкую к сферической, а их размер не превышал 20 нм. Размер агломератов частиц оксида цинка составлял не более 100 нм, что позволяло им легко проникать в полости древесного материала. Для модифицирования древесины готовили устойчивую суспензию синтезированного нанопорошка оксида цинка в отработанном подсолнечном масле. Обработку образцов древесины осуществляли методом горяче-холодной пропитки. Установлено, что использование наноразмерного оксида цинка ускоряет процесс высыхания покрытия из растительного масла, повышает прочность такого покрытия и его устойчивость к внешним воздействиям. Применение разработанных составов улучшает гидрофобные свойства древесины, ее влаго- и водостойкость, а также уменьшает разбухание в тангенциальном и радиальном направлениях. Выбрана оптимальная дозировка нано-

размерного оксида цинка в составах на основе отработанного растительного масла для защитной обработки древесины березы – 0,1 %. Пропиточные составы на основе отработанного растительного масла обладают низкой токсичностью и их использование позволяет утилизировать отходы пищевого производства.

**Ключевые слова:** наноразмерный оксид цинка, древесина, защитная обработка древесины, суспензия, краевой угол смачивания, водопоглощение, влагопоглощение, разбухание

**Для цитирования:** Томина Е.В., Дмитренко А.И., Жужукин К.В. Использование наноразмерного ZnO в составах для защитной обработки древесины // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 4. С. 173–184. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-173-184>

Original article

### The Use of Nanosized ZnO in Compositions for Wood Protective Treatment

*Elena V. Tomina*<sup>1,2</sup>, Doctor of Chemistry, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ABF-1895-2020](https://orcid.org/0000-0002-5222-0756),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

*Aleksandr I. Dmitrenkov*<sup>1</sup>, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [AAO-8606-2020](https://orcid.org/0000-0001-9296-1762), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9296-1762>

*Konstantin V. Zhuzhukin*<sup>1</sup>, Junior Research Scientist; ResearcherID: [AAB-2187-2021](https://orcid.org/0000-0002-7093-3274),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7093-3274>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, ul. Timiryazeva, 8, Voronezh, 394087, Russian Federation; [tomina-e-v@yandex.ru](mailto:tomina-e-v@yandex.ru), [dmitrenkov2109@mail.ru](mailto:dmitrenkov2109@mail.ru), [kinkon18@yandex.ru](mailto:kinkon18@yandex.ru)

<sup>2</sup>Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, Voronezh, 394018, Russian Federation; [tomina-e-v@yandex.ru](mailto:tomina-e-v@yandex.ru)

Received on May 18, 2020 / Approved after reviewing on August 15, 2021 / Accepted on August 19, 2021

**Abstract.** Wood natural structure can be considered as a suitable matrix for modifying with nanoparticles of various chemical nature. The research aims at obtaining a wood-based nanocomposite by modifying wood with compositions of waste vegetable oil and zinc oxide nanoparticles and studying the properties of this nanocomposite. Silver birch (*Betula pendula*) wood samples were chosen as study objects. Refined sunflower oil left after cooking was the oil base of the developed impregnating compositions; nanosized zinc oxide powder was the filler and modifier. The sol-gel method providing a narrow range of particle size distribution was used for synthesis of zinc oxide nanoparticles from  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  as starting material. Aqueous ammonia solution was used as a precipitant. The synthesized zinc oxide nanoparticles contained no impurities, were mostly spherical and had the size less than 20 nm. The size of zinc oxide agglomerates was no more than 100 nm, allowing them to easily penetrate into the wood material cavities. A stable suspension of synthesized zinc oxide nanopowder in used sunflower oil was prepared and applied for wood modification by hot-and-cold bath treatment. It was found that the use of nanoscale zinc oxide accelerates the drying process of vegetable oil coating, increases the strength of such a coating and its resistance to external influences. The use of developed compositions improves the hydrophobic properties of wood, its moisture and water resistance, as well as reduces swelling in the tangential and radial directions. We have chosen the optimal dosage of nanosized zinc oxide (0.1 %) in compositions based on waste vegetable oil for protective



treatment of birch wood. Impregnating compositions on the base of waste vegetable oil are environmentally safe and their use allows recycling food industry wastes.

**Keywords:** nanosized zinc oxide, wood, wood protective treatment, suspension, contact angle, water absorption, moisture absorption, swelling

**For citation:** Tomina E.V., Dmitrenkov A.I., Zhuzhukin K.V. The Use of Nanosized ZnO in Compositions for Wood Protective Treatment. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2022, no. 4, pp. 173–184. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-4-173-184>

### *Введение*

Натуральная древесина является возобновляемым ресурсом и устойчивым материалом с хорошими механическими свойствами, но на нее воздействуют многочисленные вредные факторы: она легко поглощает воду, растрескивается, плесневеет, подвержена биологической и световой деградации. Все это сильно снижает сроки эксплуатации изделий из древесины. Разработка экономичных легкоуправляемых методов создания новых материалов на основе природного полимера древесины – актуальная задача [5]. Нанотехнологии способны предоставить перспективные альтернативы для разработки эффективных методов синтеза материалов. В нанометровом диапазоне измерений изменяются многие физические и химические свойства веществ в сравнении с объемными объектами. Пористая и иерархическая структура древесины может выступать как матрица для модифицирования наночастицами различной химической природы.

В ряде публикаций [11, 14, 20, 24] подтверждаются значительные повышение стойкости к разбуханию, уменьшение водопоглощения, увеличение прочности и антимикробных свойств нанокompозитов на основе древесины, придание древесине супергидрофобных свойств за счет внедрения наноматериалов в природный полимер.

Модификация натуральной древесины составами, содержащими наноразмерные частицы оксида цинка, оксида титана и оксидов других металлов, а также наноглин [14], позволяет не только улучшить водоотталкивающие свойства поверхности древесины, снизить ее водопоглощение, но и повысить устойчивость к воздействию грибов.

Натуральная древесина и материалы на ее основе являются ценным сырьем для различных областей производства и деятельности человека. Интерес к такой древесине постоянно возрастает еще и в связи с ужесточением экологических требований к продукции, находящейся в контакте с человеком.

Модифицирование – один из распространенных методов улучшения свойств малоценной древесины мягких лиственных пород [6, 7, 18]. С целью защиты натуральной древесины для ее модификации применяют разнообразные химические соединения и пропиточные составы, которые должны обладать хорошей проникающей способностью в полости древесного материала, иметь низкую стоимость, быть доступными и безопасными для человека и животных.

При приготовлении продуктов питания в пищевой промышленности образуются большие объемы отходов растительных масел, подвергшихся многократной термической обработке. В основном это рафинированное подсолнечное масло. Такое отработанное подсолнечное масло слабо утилизируется, и его

отходы загрязняют окружающую среду, осложняя работу очистных сооружений. Вместе с тем отработанные растительные масла являются ценным сырьем и могут быть применены в композиционных составах для защитной обработки натуральной древесины.

Пропитка древесины растительным маслом представляет собой древнейший прием ее защиты от неблагоприятных факторов и улучшения свойств природной древесины малоценных пород. В предыдущих работах [2, 3] показана перспективность использования отработанных растительных масел – отходов пищевой промышленности – для защитной обработки и модификации натуральной древесины. Определена [2] оптимальная температура пропитки древесины березы отработанным подсолнечным маслом – 120 °С.

В [13, 22, 23] приводятся результаты разработки пропиточных составов на основе льняного, подсолнечного и других растительных масел с целью получения композитных материалов из древесины, используемых в строительстве и быту. Авторы [19] для химической модификации и улучшения стойкости и стабильности размеров древесины различных пород применяли составы на основе растительных масел, парафина и пчелиного воска, с последующей термической обработкой изделий.

В работе [8] предложены пропиточные составы на основе различных растительных масел, улучшающие свойства древесины. Для создания древесных композитов с повышенными гидрофобными показателями и защиты древесных изделий от УФ-излучения использовались [10, 16] эмульсии растительных масел.

Экологически безопасными являются составы для обработки древесины на основе силиконов [12, 15, 17]. После нанесения на древесину и последующего нагревания происходит химическое взаимодействие компонентов состава с компонентами древесного вещества, и на поверхности древесины образуется водоотталкивающее покрытие, эффективно защищающее изделие от влаги и других неблагоприятных воздействий.

Целью работы стало получение нанокompозита на основе древесины березы путем ее модифицирования составами из отработанного растительного масла и наночастиц оксида цинка и исследование свойств этого нанокompозита.

#### *Объекты и методы исследования*

Для синтеза оксидных наночастиц среди наиболее простых в исполнении методов «мягкой химии» особое место занимает золь-гель метод, позволяющий при относительно низких температурах получать наноматериалы с узким распределением частиц по размерам, используя простое и недорогое оборудование. В качестве исходного вещества для синтеза наночастиц ZnO нами использован нитрат цинка  $Zn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$  (х.ч.). Применение в качестве осадителя водного раствора аммиака (25 мас. %, ч.д.а.) за счет образования буферной смеси ( $NH_4^+$  и  $NH_4OH$ ) позволяло поддерживать pH на уровне 9. Образовавшийся гелевидный осадок отделяли на вакуум-фильтре, многократно промывали дистиллированной водой, высушивали при комнатной температуре до постоянной массы, отжигали на воздухе при температуре 240 °С в течение 2 ч.

Фазовый состав синтезированных образцов определяли методом рентгенофазового анализа (РФА) с использованием рентгеновского дифрактометра

Empyrean V.V. с анодом Cu ( $\lambda = 1,54060$  нм). Съемку проводили в интервале углов  $2\theta = 10\text{--}80^\circ$  с шагом 0,0200. Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) по данным РФА для образцов оксида цинка рассчитывали по формуле Шеррера:

$$D_{hkl} = \frac{k\lambda}{\beta_{hkl} \cos\theta},$$

где  $D_{hkl}$  – средний размер частиц, Å;  $k$  – поправочный коэффициент,  $k = 0,9$  для сферических частиц;  $\lambda$  – длина волны рентгеновской трубки;  $\beta_{hkl}$  – истинное физическое уширение дифракционного максимума, рад;  $\theta$  – положение максимума пика, град.

Размер и морфологию частиц синтезированного порошка определяли по данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) при помощи просвечивающего электронного микроскопа Carl Zeiss Libra 120.

В качестве объектов исследования взяты образцы древесины березы повислой (*Betula pendula*), заготовленные в опытном учебном лесничестве Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова. Эта порода выбрана потому, что она относится к самым распространенным листовым породам Российской Федерации. Для проведения экспериментов готовили образцы древесины размером 20×20 мм в радиальном и тангенциальном направлениях, высотой вдоль волокон 10 мм. Средняя плотность образцов составляла 635 кг/м<sup>3</sup>.

Все образцы древесины высушивали при температуре 103 °С до постоянной массы. Для модифицирования древесины применяли использованное в пищевой индустрии рафинированное подсолнечное масло, которое предварительно отстаивали и профильтровывали. Для усиления модифицирующего воздействия отработанного масла в состав композиций вводили добавки нанопорошка оксида цинка в дозировке от 0,1 до 1,0 %. Согласно Федеральному классификационному каталогу отходов (редакция от 18.11.2021), отходы фритюра на основе растительного масла имеют низкую токсичность и относятся к отходам 4-го класса опасности (код: 736 111 11 3 24).

Модифицирование осуществляли методом горяче-холодных ванн. Для приготовления устойчивой суспензии синтезированного нанопорошка оксида цинка в отработанном подсолнечном масле к заданному объему растительного масла постепенно добавляли определенное количество нанопорошка при перемешивании магнитной мешалкой. Суспензию нагревали до 120 °С, помещали в нее образцы древесины и выдерживали в течение 30 мин. Затем образцы переносили в суспензию, имеющую температуру окружающей среды, на такое же время. Содержание пропиточного состава в древесине (%) определяли гравиметрическим методом по разности масс до и после пропитки. Взвешивание пропитанных образцов проводили после стекания масла и образования на поверхности древесины твердой эластичной пленки.

Для определения влагопоглощения образцы высушивали в бюксах до абсолютно сухого состояния согласно требованиям ГОСТ 16483.7–71 и взвешивали с погрешностью не более 0,001 г. На дно эксикатора наливали насыщенный раствор соды. Образцы устанавливали боковой поверхностью на вставку эксикатора так, чтобы они не касались один другого и стенок эксикатора, закрывали крышкой и выдерживали при температуре 20±2 °С. Образцы периодически

взвешивали в бюксах с погрешностью не более 0,001 г. Первое взвешивание производили через сутки с момента помещения образцов в эксикатор, последующие – через 2, 3, 6, 9, 13, 20 и далее через каждые 10 сут. Минимальная продолжительность выдерживания образцов – 30 сут.

Количество поглощенной влаги в процентах вычисляли с точностью до 0,1 % по формуле

$$W = \frac{m_n - m_1}{m_1 - m} \cdot 100,$$

где  $m_n$  – масса бюкса с образцом, взвешенной через  $n$  суток с момента первоначального помещения образца в эксикатор, г;  $m_1$  – масса бюкса с образцом в абсолютно сухом состоянии, г;  $m$  – масса бюкса, г.

При определении водопоглощения образцы высушивали при 103 °С в бюксах до абсолютно сухого состояния, после чего опускали их под эксикаторную вставку и наливали дистиллированную воду выше уровня вставки. Количество поглощенной воды вычисляли по приведенной формуле. Взвешивание образцов проводили через 1, 3, 10 и 30 сут.

Образцы, используемые для определения водопоглощения, через заданное время вынимали из эксикатора и измеряли в тангенциальном и радиальном направлениях с точностью до 0,01 мм. Затем устанавливали разбухание в тангенциальном и радиальном направлениях:

$$a_t = \frac{L_{t\max} - L_{t\min}}{L_{t\min}} \cdot 100 \% ;$$
$$a_R = \frac{L_{R\max} - L_{R\min}}{L_{R\min}} \cdot 100 \% ,$$

где  $L_{t\max}$ ,  $L_{R\max}$  – размеры образца после выдерживания в воде 1, 3, 10, 30 сут в тангенциальном и радиальном направлениях соответственно;  $L_{t\min}$ ,  $L_{R\min}$  – размеры образца в абсолютно сухом состоянии в тангенциальном и радиальном направлениях соответственно.

Поверхностное натяжение древесины устанавливали по краевому углу смачивания. Краевой угол смачивания древесины дистиллированной водой измеряли методом лежащей капли на собранном в лаборатории гониометре с использованием программы NView 10. Жидкость на поверхность древесины наносили микрошприцом объемом 0,01 мл. Изображение регистрировали с помощью портативной камеры микроскопа Digital Microscope (Ruihoge, Китай) и фиксировали в течение 1, 30, 60 и 90 с.

Кинематическую вязкость исследуемых пропиточных составов на основе растительного масла определяли при помощи вискозиметра ВПЖ-3.

#### *Результаты исследования и их обсуждение*

Влияние pH среды в ходе золь-гель синтеза на морфологию наночастиц ZnO исследовано в работах [9, 21]. Порошки оксида цинка, синтезированные при pH, равном 6 или 7, аморфны, что может быть связано с подавлением гидролиза в данных условиях реакции. Проведение процесса при pH = 9, согласно [4], способствует формированию кристаллических образцов. Это под-

тверждают свидетельствующие о высокой степени кристалличности образцов узкие рефлексы высокой интенсивности, отвечающие оксиду цинка на дифрактограмме (рис. 1). Однако достаточно высокий уровень фона может быть результатом присутствия некоторой доли аморфной фазы оксида цинка. Согласно данным РФА, синтезированные образцы ZnO не содержат примесей (JCPDS, карточка 36-1451).

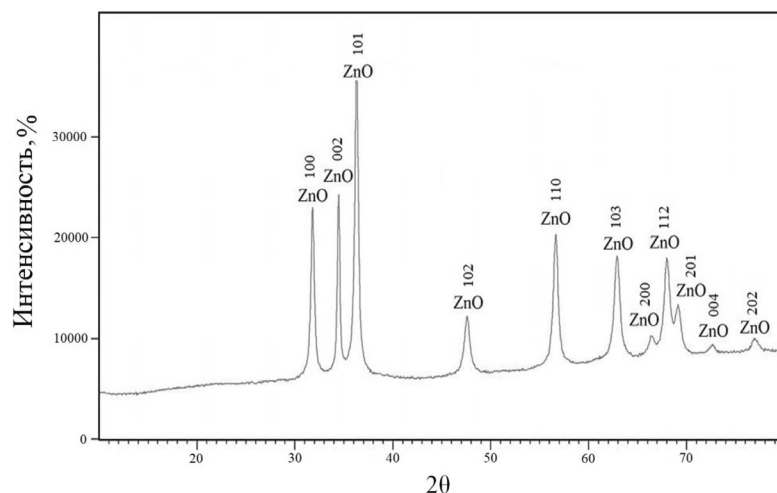


Рис. 1. Дифрактограмма образца ZnO, синтезированного золь-гель методом с осадителем  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Fig. 1. Diffraction pattern of a ZnO sample synthesized by the sol-gel method with a precipitant  $\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Среднее значение ОКР частиц оксида цинка, рассчитанное по формуле Шеррера, составляет  $22 \pm 2$  нм (табл. 1).

Таблица 1

**Среднее значение областей когерентного рассеяния частиц синтезированного образца ZnO**  
**The average value of the coherent-scattering regions of the synthesized ZnO sample particles**

Диаметр ОКР частиц ZnO	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_{cp}$
Значение, нм	$19 \pm 3$	$20 \pm 2$	$26 \pm 1$	$22 \pm 2$

Результаты ПЭМ хорошо коррелируют с данными РФА (рис. 2). На ПЭМ-изображениях видно, что частицы ZnO, синтезированные золь-гель методом, имеют форму, близкую к сферической. Размер большинства частиц не превышает 20 нм, степень агломерации невелика, размер агломератов – менее 100 нм.

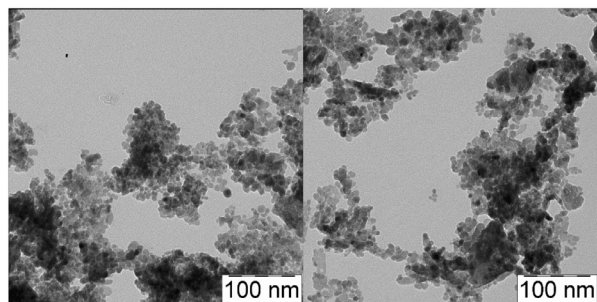


Рис. 2. Просвечивающая электронная микроскопия различных участков желатинового слоя с распределенным в нем нанопорошком ZnO

Fig. 2. Transmission electron microscopy images of various sections of the gelatin coating with ZnO nanopowder distributed in it

Такие характеристики наночастиц оксида цинка позволяют ожидать достаточно легкого допирования древесины березы через ее проводящие элементы – сосуды, диаметр которых обычно составляет от 0,02 до 0,50 мм.

В табл. 2 представлены результаты определения пропиточного состава и краевого угла смачивания воды для древесины березы.

Таблица 2

**Пропиточный состав и краевой угол смачивания  
для древесины березы**  
**The impregnation composition content and the contact angle for birch wood**

Модифицирующий состав	Содержание пропиточного состава в древесине, %	Краевой угол смачивания, ...°
Отсутствует	–	30
Отработанное растительное масло	74,1	49
Отработанное масло с 1,0 % наноразмерного ZnO	58,8	62
Отработанное масло с 0,5 % наноразмерного ZnO	68,2	67
Отработанное масло с 0,1 % наноразмерного ZnO	81,2	72

На рис. 3 представлены результаты определения влагопоглощения, водопоглощения, разбухания в радиальном и тангенциальном направлениях необработанной древесины березы и древесины березы, модифицированной различными составами на основе отработанного растительного масла.

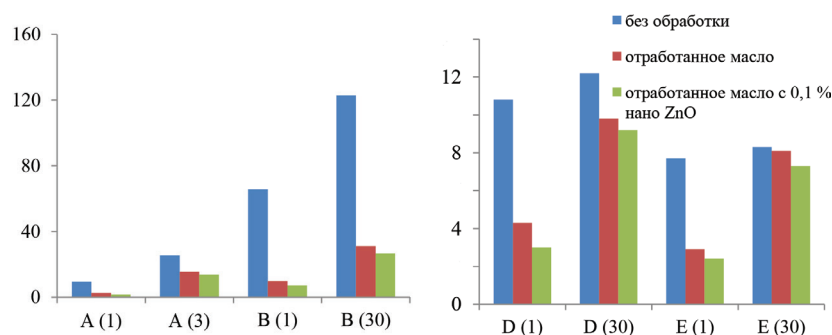


Рис. 3. Влагопоглощение (А), водопоглощение (В), разбухание в радиальном (D) и тангенциальном (E) направлениях древесины березы после 1 и 30 сут. испытаний, % (в скобках на горизонтальной оси – продолжительность испытания, сут.)

Fig. 3. Moisture absorption (A), water absorption (B), swelling in the radial (D) and tangential (E) directions of birch wood after 1 and 30 days of testing, % (on the horizontal axis in brackets – test duration, days)

На основании результатов эксперимента можно сделать вывод, что отработанное растительное масло легко и на достаточную глубину проникает в древесину. Многократная термическая обработка масла при повышенных температурах приводит к заметным изменениям в его структуре, усилению полимеризационных и окислительных процессов. Маркером эффективности



модифицирующей обработки служит количество масла, введенного в древесину. Сравнение этого показателя для отработанного растительного масла и подсолнечного масла, не подвергавшегося термической обработке, говорит о том, что эффективность пропитки отработанным растительным маслом несколько выше. Это, по-видимому, связано с увеличением содержания жирных кислот в результате окислительных превращений растительного масла при его многократной термической обработке. Образуются новые функциональные группы (карбонильные, карбоксильные, оксогруппы). Все это приводит к образованию новых связей растительного масла со структурой древесины и способствует его закреплению в полостях древесного материала.

Анализ краевого угла смачивания воды на поверхности обработанной и необработанной древесины березы показывает, что модификация маслом закрывает мельчайшие поры древесины за счет протекающих на поверхности образцов полимеризационных процессов. Масляное покрытие с наноразмерным оксидом цинка делает древесину гидрофобной. Так, обработка древесины отработанным растительным маслом без добавок позволяет более чем в 1,5 раза увеличить краевой угол смачивания модифицированной древесины по сравнению с необработанной. Использование наноразмерного оксида цинка в составах на основе отработанного растительного масла в оптимальной дозировке (0,1 %) повышает краевой угол смачивания модифицированной древесины почти в 2,5 раза, делая ее поверхность особенно гидрофобной.

Растительные масла при нанесении на древесину под действием кислорода воздуха и света полимеризуются, превращаясь в твердую, эластичную пленку. Это связано с наличием в них полиненасыщенных жирных кислот, таких как линолевая и линоленовая. Чем их больше, тем большей способностью высыхания обладает масло. Использование наноразмерного оксида цинка ускоряет процесс высыхания покрытия из растительного масла, повышает прочность такого покрытия и его устойчивость к внешним воздействиям. Кроме того, в отработанном масле вследствие его многократного нагревания разлагаются вещества, замедляющие отверждение покрытия на основе этого масла.

Использование в качестве наполнителя наноразмерного оксида цинка способствует закреплению растительного масла в полостях древесного материала, о чем говорит количество введенного модифицирующего состава при оптимальном содержании нанопорошка в нем. Возможно, этому способствует взаимодействие полярной реакционноспособной поверхности  $O-ZnO$  с функциональными группами компонентов древесины (например,  $OH$ -группами целлюлозы), приводящее к образованию водородных связей [1].

При таком содержании нанопорошка  $ZnO$  в масле кинематическая вязкость пропиточного состава при температуре  $120\text{ }^{\circ}C$  практически не отличается от вязкости чистого отработанного подсолнечного масла (27 с). Дальнейшее увеличение содержания оксида цинка приводит к снижению количества введенного пропиточного состава из-за роста его вязкости, что сказывается на свойствах модифицированной древесины. Так, кинематическая вязкость отработанного растительного масла с 1 % нанопорошка оксида цинка равнялась 36 с.

Заполнение полостей древесного материала отработанным растительным маслом позволяет существенно снизить влаго- и водопоглощение древесины березы. После суток испытаний водопоглощение пропитанной маслом дре-

веса снизилось в 3,5 раза, водопоглощение – более чем в 6 раз по сравнению с натуральной древесиной. Еще более эффективно защищает природную древесину от влаги и воды состав, содержащий 0,1 % наноразмерного оксида цинка. Влагопоглощение пропитанной таким составом древесины через 24 ч уменьшилось более чем в 4 раза, а водопоглощение – более чем в 7 раз. После 30 сут испытаний эффективность защиты несколько снижается, но все равно показатели влаго- и водопоглощения модифицированной древесины существенно ниже, чем у необработанной, – в 1,5 и в 4 раза соответственно.

Обработка древесины березы составами на основе отработанного подсолнечного масла позволяет уменьшить разбухание древесины как в радиальном, так и в тангенциальном направлениях. После суток нахождения в воде разбухание древесины, модифицированной чистым маслом, снизилось как в тангенциальном, так и в радиальном направлениях приблизительно в 2,5 раза по сравнению с необработанной древесиной. При модифицировании древесины отработанным растительным маслом с 0,1 % нанопорошка оксида цинка разбухание в тангенциальном направлении уменьшилось в 3,6 раза, в радиальном – в 3,2 раза в сравнении с натуральной древесиной. После 30 сут испытаний снижение разбухания древесины не так значительно и достигает в радиальном направлении 25 %.

#### Заключение

Разработаны и исследованы новые составы на основе отработанного подсолнечного масла с наноразмерным оксидом цинка для модификации натуральной древесины. Золь-гель методом синтезированы наночастицы оксида цинка, имеющие форму близкую к сферической и размеры до 20 нм, что позволяет им легко проникать в полости древесины. Предлагаемые модифицирующие составы существенно улучшают гидрофобные свойства поверхности древесины, понижают ее влаго- и водостойкость, а также разбухание в радиальном и тангенциальном направлениях. Оптимальное содержание нанопорошка оксида цинка в составах на основе отходов растительного масла – 0,1 %. Оно позволяет достигать минимальных влаго- и водопоглощения модифицированной древесины. Полученные пропиточные составы, основа для которых – отход пищевой промышленности, – являются малоопасными для человека и животных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Врублевская В.И., Матусевич В.О., Кузнецова В.В. Обоснование механизма взаимодействия компонентов древесины с влагой // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 3. С. 152–163.

Vrublevskaya V.I., Matusevich V.O., Kuznetsova V.V. Substantiation of the Interaction Mechanism of Wood Components and Water. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 3, pp. 152–163. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2017.3.152>

2. Дмитренко А.И., Никулин С.С., Никулина Н.С., Боровской А.М., Недзельская Е.А. Исследование процесса пропитки древесины березы отработанным растительным маслом // Лесотехн. журн. 2020. Т. 10, № 2. С. 161–168.

Dmitrenkov A.I., Nikulin S.S., Nikulina N.S., Borovskoy A.M., Nedzelskaya E.A. Research of the Process of Birch Wood Impregnation with the Used Vegetable Oil. *Forestry*

*Engineering Journal*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 161–168. (In Russ.). <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/16>

3. Дмитренко А.И., Ходосова Н.А., Боровской А.М., Недзельская Е.А., Заяц В.В. Использование отработанного растительного масла для получения древесных композитов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2021. Т. 21, № 1. С. 127–133.

Dmitrenkov A.I., Khodosova N.A., Borovskoy A.M., Nedzelskaya E.A., Zayats V.V. Use of Waste Vegetable Oil for the Production of Wood Composites. *Sorption and Chromatography Processes*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 127–133. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3228>

4. Карпова С.С., Мошников В.А., Мякин С.В., Коловангина Е.С. Функциональный состав поверхности и сенсорные свойства ZnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47, вып. 3. С. 369–372.

Karpoval S.S., Moshnikov V.A., Mjakin S.V., Kolovangina E.S. Surface Functional Composition and Sensor Properties of ZnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* = Semiconductors, 2013, vol. 47, iss. 3, pp. 369–372. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1063782613030123>

5. Куницкая О.А., Бурмистрова С.С., Хитров Е.Г., Минаев А.Н. Математическое моделирование процесса пропитки древесины в пьезопериодическом поле // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 5. С. 168–180.

Kunitskaya O.A., Burmistrova S.S., Khitrov E.G., Minaev A.N. Mathematical Modeling of Impregnation of Wood in Piezo Periodic Field. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2018, no. 5, pp. 168–180. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.5.168>

6. Шамаев В.А. Исследование модифицированной древесины методом электронной микроскопии // Изв. вузов. Лесн. журн. 2020. № 1. С. 190–199.

Shamaev V.A. Study of Modified Wood by Electron Microscopy. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2020, no. 1, pp. 190–199. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-1-190-199>

7. Шамаев В.А., Никулина Н.С., Медведев И.Н. Модифицирование древесины: моногр. М.: Флинта, 2013. 448 с.

Shamaev V.A., Nikulina N.S., Medvedev I.N. *Wood Modification*. Moscow, Flinta Publ., 2013. 448 p. (In Russ.).

8. Ahmed S.A., Morén T., Sehlstedt-Persson M., Blom Å. Effect of Oil Impregnation on Water Repellency, Dimensional Stability and Mold Susceptibility of Thermally Modified European Aspen and Downy Birch Wood. *Journal of Wood Science*, 2017, vol. 63, pp. 74–82. <https://doi.org/10.1007/s10086-016-1595-y>

9. Alias S.S., Ismail A.B., Mohamad A.A. Effect of pH on ZnO Nanoparticle Properties Synthesized by Sol–Gel Centrifugation. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, vol. 499, iss. 2, pp. 231–237. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.03.174>

10. Berube M.-A., Schorr D., Ball R., Landry V., Blanchet P. Determination of *in situ* Esterification Parameters of Citric Acid-Glycerol Based Polymers for Wood Impregnation. *Journal of Polymers and the Environment*, 2018, vol. 26, iss. 3, pp. 970–979. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-1011-8>

11. Cai T., Shen X., Huang E., Yan Y., Shen X., Wang F., Wang Z., Sun Q. Ag Nanoparticles Supported on MgAl-LDH Decorated Wood Veneer with Enhanced Flame Retardancy, Water Repellency and Antimicrobial Activity. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, vol. 598, art. 124878. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124878>

12. Cappelletto E., Maggini S., Girardi F., Boichicchio G., Tessadri B., Di Maggio R. Wood Surface Protection with Different Alkoxysilanes: A Hydrophobic Barrier. *Cellulose*, 2013, vol. 20, pp. 3131–3141. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-0038-9>

13. Croitoru C., Patachia S., Lunguleasa A. A Mild Method of Wood Impregnation with Biopolymers and Resins Using 1-Ethyl-3-Methylimidazolium Chloride as Carrier. *Chemical Engineering Research and Design*, 2015, vol. 93, pp. 257–268. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2014.04.031>
14. Holy S., Temiz A., Demirel G.K., Aslan M., Amini M.H.M. Physical Properties, Thermal and Fungal Resistance of Scots Pine Wood Treated with Nano-Clay and Several Metal-Oxides Nanoparticles. *Wood Material Science & Engineering*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 176–185. <https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1836023>
15. Kumar A., Ryparová P., Škapin A.S., Humar M., Pavlič M., Tywoniak J., Hajek P., Žigon J., Petrič M. Influence of Surface Modification of Wood with Octadecyltrichlorosilane on Its Dimensional Stability and Resistance against *Coniophora puteana* and Molds. *Cellulose*, 2016, vol. 23, pp. 3249–3263. <https://doi.org/10.1007/s10570-016-1009-8>
16. Lahtela V., Kärki T. Improving the UV and Water-Resistance Properties of Scots Pine (*Pinus sylvestris*) with Impregnation Modifiers. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2014, vol. 72, pp. 445–452. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0804-x>
17. Lin W., Huang Y., Li J., Liu Z., Yang W., Li R., Chen H., Zhang X. Preparation of Highly Hydrophobic and Anti-Fouling Wood Using Poly(methylhydrogen)siloxane. *Cellulose*, 2018, vol. 25, pp. 7341–7353. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2074-y>
18. Medvedev I., Shamayev V., Parinov D. Resource-Saving Production Sleepers of Modified Wood. *Railway Track and Facilities*, 2018, no. 11, pp. 30–32.
19. Németh R., Bak M., Ábrahám J., Fodor F., Horváth N., Báder M. Wood Modification Research at the University of Sopron. *Siberian Journal of Forest Science*, 2019, no. 3, pp. 20–25. <https://doi.org/10.15372/SJFS20190303>
20. Qiu Z., Xiao Z., Gao L., Li J., Wang H., Wang Y., Xie Y. Transparent Wood Bearing a Shielding Effect to Infrared Heat and Ultraviolet via Incorporation of Modified Antimony-Doped Tin Oxide Nanoparticles. *Composites Science and Technology*, 2019, vol. 172, pp. 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.01.005>
21. Rani S., Suri P., Shishodia P.K., Mehra R.M. Synthesis of Nanocrystalline ZnO Powder via Sol-Gel Route for Dye-Sensitized Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, vol. 92, no. 12, pp. 1639–1645. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.07.015>
22. Rousset P., Perré P., Girard P. Modification of Mass Transfer Properties in Poplar Wood (*P. robusta*) by a Thermal Treatment at High Temperature. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 2004, vol. 62, pp. 113–119. <https://doi.org/10.1007/s00107-003-0459-5>
23. Schwarzkopf M., Burnard M., Tverezovskiy V., Treu A., Humar M., Kutnar A. Utilisation of Chemically Modified Lampante Oil for Wood Protection. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2018, vol. 76, pp. 1471–1482. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1336-6>
24. Xu L., Xiong Y., Dang B., Ye Z., Jin C., Sun Q., Yu X. *In-situ* Anchoring of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/ZIF-67 Dodecahedrons in Highly Compressible Wood Aerogel with Excellent Microwave Absorption Properties. *Materials & Design*, 2019, vol. 182, art. 108006. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108006>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest

---

**Вклад авторов:** Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
**Authors' Contribution:** All authors contributed equally to the writing of the article