Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-1-267-272 Оригинальная статья/Research article
УДК 678.762.9 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Получение древесно-полимерного композита с применением этенилнафталина

Надежда С. Никулина [1] nad.nikulina2013@ya.ru 0000-0003-2586-7738
Сергей С. Никулин [2] nikulin.nikuli@ya.ru 0000-0002-8141-8008
Лариса А. Власова [2] vllar65@ya.ru 0000-0003-1515-8321
Вячеслав М. Мисин [3] misinnn@gmail.com 0000-0003-4204-8531

1 Воронежский институт федеральной службы исполнения наказаний, ул. Иркутская 1А, г. Воронеж, 394072, Россия
2 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, 394036, Россия
3 Институт биохимической физики РАН им. Н.М. Эмануэля, ул. Косыгина, 4, Москва, 119991, Россия

Аннотация. Настоящее исследование посвящено модификации древесины с использованием этенилнафталина (ЭН) с целью улучшения её эксплуатационных характеристик, таких как водостойкость, влагостойкость и устойчивость к биодеструкции. Основная цель работы — разработка эффективного метода пропитки древесины мягколиственных пород (на примере березы) для создания древесно-полимерного композита с повышенными защитными свойствами. Актуальность исследования обусловлена необходимостью расширения ассортимента экологически безопасных и экономически выгодных пропитывающих составов для древесины. Результаты исследования показали значительное улучшение эксплуатационных свойств модифицированной древесины. Установлено, что увеличение содержания ПЭН в древесине (от 9,3% до 24,6%) приводит к снижению водопоглощения и разбухания, что подтверждает повышение водо- и влагостойкости материала. Контрольные эксперименты подтвердили высокую реакционную способность ЭН и его эффективность в качестве модификатора. Разработанный метод модификации древесины с использованием ЭН может быть применен в строительной, мебельной и деревообрабатывающей промышленности, особенно для малоценных пород древесины. Результаты исследования представляют интерес для решения задач экологии и рационального использования ресурсов, так как ЭН является доступным и экономически выгодным материалом, а его применение позволяет сократить использование дорогостоящих и дефицитных составов. Исследование подтвердило перспективность использования этенилнафталина для модификации древесины. Полученные древесно-полимерные композиты обладают улучшенными физико-механическими и защитными свойствами, что делает их пригодными для широкого промышленного применения. Метод отличается высокой эффективностью, экологичностью и может быть масштабирован для производства

Ключевые слова: древесина, пропитывающий состав, этенилнафталин, модификация, защитные свойства .

Wood Modification Using Ethenylnaphthalene

Nadezhda S. Nikulina [1] nad.nikulina2013@ya.ru 0000-0003-2586-7738
Sergey S. Nikulin [2] nikulin.nikuli@ya.ru 0000-0002-8141-8008
Larisa A. Vlasova [2] vllar65@ya.ru 0000-0003-1515-8321
Vyacheslav M. Misin [3] misinnn@gmail.com 0000-0003-4204-8531

1 Voronezhskiy institut federal'noy sluzhby ispolneniya nakazaniy, ul. Irkutskaya 1A, g. Voronezh, 394072, Rossiya
2 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia
3 Institut biokhimicheskoy fiziki RAN im. N.M. Emanuelya, ul. Kosygina, 4, Moskva, 119991, Rossiya

Abstract. The present study is devoted to the modification of wood using ethenylnaphthalene (EN) in order to improve its performance characteristics, such as water resistance, moisture resistance and resistance to biodegradation. The main objective of the work is to develop an effective method for impregnating softwood (using birch as an example) to create a wood-polymer composite with enhanced protective properties. The relevance of the study is due to the need to expand the range of environmentally friendly and cost-effective impregnating compounds for wood, especially low-value species. The results of the study showed a significant improvement in the performance properties of the modified wood. It was found that an increase in the content of PEN in wood (from 9.3% to 24.6%) leads to a decrease in water absorption and swelling, which confirms an increase in the water and moisture resistance of the material. In addition, the modified samples demonstrated antiseptic properties, which helps to increase the service life of products. Control experiments confirmed the high reactivity of EN and its effectiveness as a modifier. The developed method of wood modification using EN can be applied in the construction, furniture and woodworking industries, especially for low-value wood species. The results of the study are of interest for solving problems of ecology and rational use of resources, since EN is an accessible and cost-effective material, and its use allows to reduce the use of expensive and scarce compounds. The study confirmed the prospects of using ethenylnaphthalene for wood modification. The obtained wood-polymer composites have improved physical, mechanical and protective properties, which makes them suitable for wide industrial use. The method is highly efficient, environmentally friendly and can be scaled up for production. Further research can be aimed at optimizing the impregnation process and studying the long-term stability of modified materials.

Keywords: wood, impregnating composition, ethenylnaphthalene, modification, protective properties.

Для цитирования
Никулина Н.С., Никулин С.С., Власова Л.А., Мисин В.М. Получение древесно-полимерного композита с применением этенилнафталина // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 1. С. 267–272. doi:10.20914/2310-1202-2026-1-267-272

For citation
Nikulina N.S., Nikulin S.S., Vlasova L.A., Misin V.M. Wood Modification Using Ethenylnaphthalene. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 1. pp. 267–272. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-1-267-272

© 2026, Никулина Н.С. и др. / Nikulina N.S. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Древесина исторически является основным строительным материалом. На Руси из древесины делали предметы утвари и мебель, игрушки и музыкальные инструменты, строились дома и т. д. В настоящее время древесина и изделия на ее основе находят широкое применение, как в строительстве, так и в качестве интересных дизайнерских решениях. Это связано с уникальными природными свойствами самого материала, а также его экологичностью и эстетичностью [1–3].

В свою очередь для продления срока службы изделиям из древесины, а также для защиты от воздействия воды и влаги, увеличения прочности, твердости и т. д. применяют различные технологические приемы [4–7]. С древних времен в строительстве для защиты от грызунов, гниения и горения использовалась химическая обработка древесины. Для этих целей использовались смеси с добавками медного и железного купороса, соли, смолы и масла.

В условиях современной тенденции для химической обработки используются различные пропитывающие составы. В зависимости от используемого в составе антисептика активного вещества различают органические и неорганические составы [8–12]. Неорганические составы ограничено проходят в структуру древесины, образуя при этом поверхностный защитный слой, который в силу малой глубины проникновения не может обеспечивать высокую эффективность и будет быстро вымываться, что будет вести к снижению защиты, а, следовательно, и срока службы. В свою очередь органические составы легко проникают в структурные элементы древесины, повышаются адгезивные свойства поверхности, повышается сопротивляемость к неблагоприятным факторам воздействия и увеличивается срок службы.

В России насчитывается сравнительно небольшой ассортимент защитных пропитывающих составов, по сравнения с зарубежным рынком. При разработке новых составов часто за базу используют ранее выпускающиеся химические вещества.

В ряде опубликованных работ [13 – 18], посвященных защитной обработке древесины, предложено использовать составы на основе мономеров винилароматического ряда (стирол, дивинилбензол и др.), акрилового (акриловая кислота, метилметакрилат и др.), мочевина и др. соединения с полимеризацией их в проводящих сосудах натуральной древесины.

Перспективными в этом плане могут служить олигомерные материалы, приготовленные из отходов и побочных продуктов химической и нефтехимической промышленности [19–22]. Использование отходов и побочных продуктов для получения олигомерных материалов позволяет решить вопрос не только экологического характера, но и более полно и рационально использовать ценное углеводородное сырье. При этом важно отметить тот факт, что в данном направлении могут применяться олигомерные продукты, которые по своим показателям ограниченно используются в других направлениях. Например, высокая цветность (нельзя использовать в производстве светлых красок), наличие опалесценции (мутный раствор, покрытие теряет прозрачность) и другие недостатки. Однако наличие этих недостатков не является критичным для использования этих растворов для модификации древесины, а также для защитной обработки сушильных камер лесопромышленного комплекса. Из древесины в процессе её сушки выделяются летучие компоненты, обладающие повышенной коррозионной способностью [9, 10].

В качестве примера модификации древесины можно рассмотреть радиационную низкотемпературную полимеризацию мономеров, таких как стирол, акрилонитрил, акриламид и др. в структурах древесины, сопровождающуюся прививкой получаемых полимеров к компонентам древесины. Модифицированные таким образом древесные композиты обладают улучшенным комплексом свойств.

Еще один способ модификации древесины – обработка ее при повышенной температуре винильными мономерами в сочетании с радикальным инициатором. Способ позволяет одновременно проводить отгонку растворителя, содержащегося в модифицированной древесине. Проведение полимеризационных процессов в клеточных структурах натуральной древесины также не получило своего широкого применения. Это объясняется тем, что радикальные процессы, протекающие в структурах древесины, тормозятся фенольными соединениями, присутствующими в древесине. Данные продукты ингибируют радикальные процессы и снижают выход по полимерам. Неполная конверсия мономеров снижает показатели древесно-полимерного композита. Древесно-полимерный композит будет фонить, например, стиролом, что будет требовать проведения дегазации целевого продукта.

До настоящего времени не проводились комплексные исследования по применению нафталиновых производных для модификации древесины, в том числе и этенильных производных нафталина (ЭН).

Интерес, к процессу, основан на доступности вышеупомянутых соединений [11].

Производные нафталина кипят при температуре свыше 200 о С, это способствует их длительному сохранению в структурах древесины. Необходимо отметить, что высокомолекулярным соединениям на основе ЭН присущи повышенные физико-механические показатели, что создает условия, позволяющие улучшить характеристики мягкой древесины.

Существенный недостаток древесины – невысокая способность сопротивляться действию неблагоприятных факторов: при сушке, хранении и транспортировке древесных материалов не исключена возможность поражения их деревоокрашивающими и плесневыми грибами, что способствует ухудшению товарного вида. Возможно предотвратить разрушение древесины и конструкций из нее применяя антисептики, к которым и относится ЭН. То есть, используя его, возможно комплексно подойти к защитной обработке древесины: повысить водо- и влагостойкость древесины, защитить её от биологического разрушения и продлить срок службы изготовленных изделий.

Так же следует обратить внимание на хорошую совместимость ЭН с компонентами древесины, благодаря наличию в них ароматических фрагментов.

Задача исследования – оценка возможности использования 1-этенилнафталина для модификации древесины.

Важным преимуществом ЭН является его высокая совместимость с древесной структурой, что объясняется химическим сходством с лигнином – природным полимером древесины, содержащим ароматические фрагменты.

Скорость полимеризации этенилнафталина примерно в 2000 раз выше, чем у стирола. Благодаря этому при термообработке пропитанной древесины (160–165 0С) происходит радикальная полимеризация ЭН в её анатомических полостях с образованием полиэтенилнафталина (1):

$$nCH_2 = CH \rightarrow (- CH_2\text{-}CH -) \,||\, C_{10}H_7\ C_{10}H_7 \quad (1)$$

Результаты исследований по модификации натуральной древесины винилнафталином показали, что степень полимеризации данного мономера в древесной структуре достигает 60%. Ограничение выхода полимера связано с присутствием в древесине фенольных соединений, ингибирующих процесс высокотемпературной полимеризации [12]. Дополнительным фактором, снижающим эффективность процесса, является низкая теплопроводность древесины, что приводит к неравномерному протеканию полимеризации – преимущественно в поверхностных слоях и в значительно меньшей степени во внутренних.

Для повышения степени конверсии мономера рекомендуется введение радикальных инициаторов в полимеризуемую систему. Образующийся полиэтенилнафталин (ПЭН) демонстрирует повышенную устойчивость к воздействию неблагоприятных факторов.

Модифицированная таким образом древесина будет приобретать ряд ценных показателей: повышенную механическую прочностью; повышенную водо- и влагостойкость; увеличенный срок эксплуатации изделий.

Материалы и методы

В работе была изучена березы влажностью около 12% мас. и плотностью 640 кг/м^3. Использовались образцы размером 20 × 20 × 30 мм. Количество образцов для каждого испытания составляло 8 шт. Окончательные данные представляли собой среднее арифметическое значение полученных результатов.

Этилникотинат (ЭН) – высоковязкое масло, которое сложно ввести в древесную структуру, так как большая его часть остается на поверхности. Для улучшения пропитки на основе ЭН были приготовлены углеводородные растворы с толуолом в качестве растворителя. Для инициирования полимеризации в раствор добавляли 2,0% мас. радикального инициатора – гидропероксида пинана (ГП), который широко применяется в производстве синтетических каучуков, получаемых эмульсионной полимеризацией [13, 14].

Образцы древесины березы выдерживали в растворах в течение 10 часов при температуре 60–70 °С. В данных условиях протекали два процесса: проникновение толуольного раствора ЭН в анатомические структуры древесины и начало полимеризационного процесса ЭН в присутствии радикального инициатора. В дальнейшем повышали температуру до 90–100 °С. Это способсьвлвад ло отгонке толуола, в том числе и в виде водно-толуольного азеотропа, из древесины. При этом протекала дальнейшая полимеризация ЭН и заполнение проводящих сосудов натуральной древесины смесью ЭН с полимером на его основе. После максимального снижения количества толуола в древесине ее образцы подвергали температурному воздействию (160–165 0С) в течение 5 часов. При этом отмечалось повышение молекулярной массы пропитывающего состава по радикальному механизму с образованием ПЭН.

Ниже представлен протекающий полимеризационный процесс ЭН в присутствии ГП:

– распад ГП:

$$R\text{-}COOH \rightarrow R\text{-}CO^{\bullet} + HO^{\bullet},$$

где R – радикал пинана;

– полимеризация ЭН:

$$R\text{-}CO^{\bullet} + CH_2 = CH \rightarrow$$

$$\rightarrow (R\text{-}CO - CH_2\text{-}CH -)n \,||\, C_{10}H_7\ C_{10}H_7 \quad (2)$$

В результате полимеризация этилениорборнена (ЭН) в анатомических структурах древесины может быть описана как процесс, происходящий в микрореакторах, роль которых выполняют естественные сосуды древесины. На начальной стадии реакция протекает по радикальному механизму в толуольном растворе в присутствии гидропероксида (ГП), а завершающая стадия происходит в массе после удаления толуола. Степень конверсии ЭН в полиэтиленорборнен (ПЭН) составила 95%.

Для оценки влияния содержания в композите ЭН были применены модельные растворы ЭН в толуоле с концентрацией его 10–50% мас.

Присутствие ПЭН, с незначительным количеством ЭН, в изготовленных образцах древесины, в зависимости от концентрации вводимого раствора варьировалось от 9,3 до ~ 24,6%. Присутствие в пропитывающей системе небольшого количества ЭН, обладающего высокой температурой кипения (270.9 °С при 760 мм. рт. ст.), не приводит к выделению его в воздушную среду производственных помещений из изделий из древесины в процессе их эксплуатации даже при повышенных температурах. Кроме того ЭН может дополимеризовываться в структурах древесины со временем.

Результаты

Экспериментальные результаты по определению водопоглощения и разбухания натуральной и модифицированной древесины березы после 1 и 30 суток нахождения в воде представлены на рисунках 1–3.

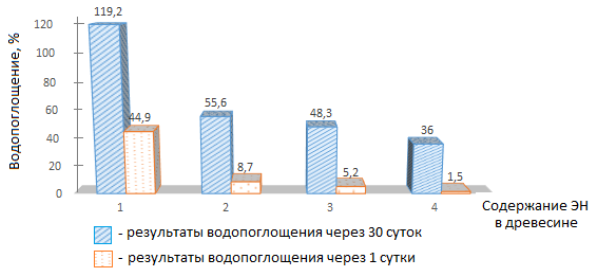


Рисунок 1. Влияние содержания ЭН в древесине березы на водопоглощение

Figure 1. The influence of the ED content in birch wood on water absorption



Рисунок 2. Влияние содержания ЭН в древесине березы на разбухание в радиальном направлении

Figure 2. The influence of the ED content in birch wood on swelling in the radial direction



Рисунок 3. Влияние содержания ЭН в древесине березы на разбухание в тангенциальном направлении

Figure 3. The influence of the ED content in birch wood on swelling in the tangential direction

По результатам проведенных экспериментов (рисунки 1–3) можно утверждать, что возрастание содержания модификатора в березовой древесине способствует снижению её водопоглощения и степени разбухания. Что дает возможность говорить о перспективности применения ЭН в качестве эффективного средства для защиты древесины низкосортных лиственных пород.

Подтверждением высокой эффективности ЭН явилось изучение его полимеризационной способности при 190–195 °С в течение 5 часов. Выход ПЭН достигал практически 95,0%.

Модифицированные таким способом древесные образцы показали повышенную влагоустойчивость. Содержание ЭН в древесине: 1 – 0%; 2 – 9,3%; 3 – 15,8%; 4 – 24,6%.

Заключение

Модифицированные ЭН образцы натуральной древесины обладают повышенными эксплуатационными качествами, делая её более устойчивой к влаге и биоповреждениям. Содержание ПЭН в древесине определяет ее устойчивость к неблагоприятным факторам. Использование ЭН открывает новые возможности для создания древесно-полимерных композитов с улучшенными свойствами, что способствует рациональному использованию древесных ресурсов и снижению зависимости от дорогостоящих пропитывающих составов.

Литература

1 Багаев Е.С., Макаров С.С., Багаев С.С., Чудетский А.И. Береза карельская в Центральной России: биологические особенности и перспективы воспроизводства. Пушкино: ВНИИЛМ, 2022. 125 с.

2 Ветошкин Ю.И., Яцун И.В., Коцюба И.В. Эксплуатационные свойства композиционных материалов на основе древесины. Екатеринбург: УГЛТУ, 2018. 100 с.

3 Sajeena T.A.M., Pallath N. Industrial waste // Handbook of Biomass. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. P. 231–246. doi: 10.1007/978-981-99-6727-8_9

4 Дональдсон Н. Химия и технология соединений нафталинового ряда. М.: ГНТИ, 1963. 656 с.

5 Колесников Г.С. Синтез винильных производных ароматических и гетероциклических соединений. М.: АН СССР, 1960. 303 с.

6 Менсон Дж. Полимерные смеси и композиты. М.: Химия, 1979. 440 с.

7 Ugwu S.C., Obele C.M. A mini-review on expanded polystyrene waste recycling and its applications // World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences. 2023. V. 8. № 1. P. 315–329. doi: 10.30574/wjaets.2023.8.1.0057

8 Никулина Н.С., Вострикова Г.Ю., Дмитренков А.И., Никулин С.С. Применение олигомеров из побочных продуктов производства полибутадиена, модифицированного вторичным пенополистиролом для защитной обработки древесных материалов // Химия, физика и механика материалов. 2018. № 1 (16). С. 23–32.

9 Никулина Н.С., Дмитренков А.И., Никулин С.С., Власова Л.А., Санникова Н.Ю. Перспектива применения для модификации древесных материалов винилнафталина // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2021. № 2. С. 73–79.

10 Бовтрель А.Ю., Божелко И.К., Нехведович П.С., Генюш И.В. Исследование современных биовлагозащитных препаратов для обработки древесины и деревянных конструкций // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2024. № 2 (282). С. 187–193.

11 Гончарова Ю.К., Гончаров С.В., Харитонов Е.М. и др. Антиоксиданты растительного происхождения и их нетрадиционные источники (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2024. Т. 59. № 1. С. 39–53. doi: 10.15389/agrobiology.2024.1.39rus

12 Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: Академия, 2004. 266 с.

13 Suhaimi N.A.S., Muhamad F., Abd Razak N.A., Zeimaran E. Recycling of polyethylene terephthalate wastes: A review of technologies, routes, and applications // Polymer Engineering & Science. 2022. V. 62. № 8. P. 2355–2375. doi: 10.1002/pen.26017

14 Хозин В.Г. Полимеры в строительстве – реальные границы и перспективы эффективного применения // Полимеры в строительстве. 2024. № 1 (1). С. 9–26.

15 Belchinskaya L.I. Elaboration of a composition based on spent engine oil and wood flour for birch wood impregnation and railway sleepers production // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 392. P. 012075. doi: 10.1088/1755-1315/392/1/012075

16 Mubarok M., Gérardin-Charbonnier C., Azadeh E. et al. Modification of wood by Tannin-Furfuryl Alcohol resins-effect on dimensional stability, mechanical properties and decay durability // Journal of Renewable Materials. 2023. V. 11. P. 505–521. doi: 10.32604/jrm.2022.024872

17 Jančíková V., Jablonský M. Thermal Modification of Wood—A Review // Sustainable Chemistry. 2025. V. 6. P. 19. doi: 10.3390/suschem6030019

18 Khan M.A. Studies of physico-mechanical properties of wood and wood plastic composite (WPC) // Journal of Applied Polymer Science. 1992. V. 45. № 1. P. 167–172. doi: 10.1002/app.1992.070450118

19 Khan A., Mishra A., Thakur V.K., Pappu A. Towards sustainable wood–plastic composites: polymer types, properties, processing and future prospects // RSC Sustainability. 2025. V. 3. № 7. P. 2833–2862. doi: 10.1039/D5SU00153F

20 Wang Y., Ge-Zhang S., Mu P. et al. Advances in sol-gel-based superhydrophobic coatings for wood: a review // International Journal of Molecular Sciences. 2023. V. 24. № 11. P. 9675. doi: 10.3390/ijms24119675

21 Wang J., Zhang D., Chu F. Wood-derived functional polymeric materials // Advanced Materials. 2021. V. 33. № 28. P. 2001135. doi: 10.1002/adma.202001135

22 Woźniak M. Antifungal agents in wood protection—A review // Molecules. 2022. V. 27. № 19. P. 6392. doi: 10.3390/molecules27196392

23 Blanchet P., Pepin S. Trends in chemical wood surface improvements and modifications: A review of the last five years // Coatings. 2021. V. 11. № 12. P. 1514. doi: 10.3390/coatings11121514

24 Liu H., Zhou T., Sun X., Zong G. Organosilane-modified Wood Materials: A Review of Research and Applications // BioResources. 2023. V. 18. № 3. P. 6561–6582.

References

1 Bagaev E.S., Makarov S.S., Bagaev S.S., Chudetsky A.I. Karelian Birch in Central Russia: Biological Features and Prospects for Reproduction. Pushkino: VNIILM, 2022. 125 p. (in Russian).

2 Vetoshkin Yu.I., Yatsun I.V., Kotsyuba I.V. Operational Properties of Composite Materials Based on Wood. Yekaterinburg: USFTU, 2018. 100 p. (in Russian).

3 Sajeena T.A.M., Pallath N. Industrial waste. In: Handbook of Biomass. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024. pp. 231–246. doi: 10.1007/978-981-99-6727-8_9.

4 Donaldson N. Chemistry and Technology of Naphthalene Series Compounds. Moscow: GNTI, 1963. 656 p. (in Russian).

5 Kolesnikov G.S. Synthesis of Vinyl Derivatives of Aromatic and Heterocyclic Compounds. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1960. 303 p. (in Russian).

6 Manson J. Polymer Blends and Composites. Moscow: Khimiya, 1979. 440 p. (in Russian).

7 Ugwu S.C., Obele C.M. A mini-review on expanded polystyrene waste recycling and its applications. World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences. 2023. vol. 8. no. 1. pp. 315–329. doi: 10.30574/wjaets.2023.8.1.0057.

8 Nikulina N.S., Vostrikova G.Yu., Dmitrenkov A.I., Nikulin S.S. Application of Oligomers from By-Products of Polybutadiene Production Modified with Secondary Polystyrene Foam for Protective Treatment of Wood Materials. Chemistry, Physics and Mechanics of Materials. 2018. no. 1 (16). pp. 23–32. (in Russian).

9 Nikulina N.S., Dmitrenkov A.I., Nikulin S.S., Vlasova L.A., Sannikova N.Yu. Prospect of Using Vinylnaphthalene for Modification of Wood Materials. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2021. no. 2. pp. 73–79. (in Russian).

10 Bovtrel A.Yu., Bozhelko I.K., Nekhvedovich P.S., Genyush I.V. Study of Modern Bio-Moisture Protection Preparations for Wood and Wooden Structures Treatment. Proceedings of BSTU. Series 1: Forestry, Nature Management and Processing of Renewable Resources. 2024. no. 2 (282). pp. 187–193. (in Russian).

11 Goncharova Yu.K., Goncharov S.V., Kharitonov E.M. et al. Plant-Derived Antioxidants and Their Unconventional Sources (Review). Agricultural Biology. 2024. vol. 59. no. 1. pp. 39–53. doi: 10.15389/agrobiology.2024.1.39rus (in Russian).

12 Ugolev B.N. Wood Science and Forest Commodity Science. Moscow: Akademiya, 2004. 266 p. (in Russian).

13 Suhaimi N.A.S., Muhamad F., Abd Razak N.A., Zeimaran E. Recycling of polyethylene terephthalate wastes: A review of technologies, routes, and applications. Polymer Engineering & Science. 2022. vol. 62. no. 8. pp. 2355–2375. doi: 10.1002/pen.26017.

14 Khozin V.G. Polymers in Construction – Real Boundaries and Prospects for Effective Application. Polymers in Construction. 2024. no. 1 (1). pp. 9–26. (in Russian).

15 Belchinskaya L.I. Elaboration of a composition based on spent engine oil and wood flour for birch wood impregnation and railway sleepers production. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. vol. 392. article 012075. doi: 10.1088/1755-1315/392/1/012075.

16 Mubarok M., Gérardin-Charbonnier C., Azadeh E. et al. Modification of wood by Tannin-Furfuryl Alcohol resins-effect on dimensional stability, mechanical properties and decay durability. Journal of Renewable Materials. 2023. vol. 11. pp. 505–521. doi: 10.32604/jrm.2022.024872.

17 Jančíková V., Jablonský M. Thermal Modification of Wood—A Review. Sustainable Chemistry. 2025. vol. 6. Article 19. doi: 10.3390/suschem6030019.

18 Khan M.A. Studies of physico-mechanical properties of wood and wood plastic composite (WPC). Journal of Applied Polymer Science. 1992. vol. 45. no. 1. pp. 167–172. doi: 10.1002/app.1992.070450118.

19 Khan A., Mishra A., Thakur V.K., Pappu A. Towards sustainable wood–plastic composites: polymer types, properties, processing and future prospects. RSC Sustainability. 2025. vol. 3. no. 7. pp. 2833–2862. doi: 10.1039/D5SU00153F.

20 Wang Y., Ge-Zhang S., Mu P. et al. Advances in sol-gel-based superhydrophobic coatings for wood: a review. International Journal of Molecular Sciences. 2023. vol. 24. no. 11. article 9675. doi: 10.3390/ijms24119675.

21 Wang J., Zhang D., Chu F. Wood-derived functional polymeric materials. Advanced Materials. 2021. vol. 33. no. 28. article 2001135. doi: 10.1002/adma.202001135.

22 Woźniak M. Antifungal agents in wood protection—A review. Molecules. 2022. vol. 27. no. 19. article 6392. doi: 10.3390/molecules27196392.

23 Blanchet P., Pepin S. Trends in chemical wood surface improvements and modifications: A review of the last five years. Coatings. 2021. vol. 11. no. 12. article 1514. doi: 10.3390/coatings11121514.

24 Liu H., Zhou T., Sun X., Zong G. Organosilane-modified Wood Materials: A Review of Research and Applications. BioResources. 2023. vol. 18. no. 3. pp. 6561–6582.

Сведения об авторах

Надежда С. Никулина к.т.н., доцент, кафедра технических комплексов и связи, Воронежский институт федеральной службы исполнения наказаний, Иркутская, 1А, г. Воронеж, 394072, Россия, nad.nikulina2013@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-2586-7738

Сергей С. Никулин д.т.н., профессор, кафедра технологии органического синтеза и переработки полимеров, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, nikulin.nikuli@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-8141-8008

Лариса А. Власова к.т.н., доцент, кафедра промышленной экологии и техносферной безопасности, Воронежский государственный университет инженерных технологий,, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, vllar65@ya.ru
https://orcid.org/*0000-0003-1515-8321*

Вячеслав М. Мисин д.т.н, профессор, ведущий научный сотрудник, отдел электроники органических материалов и наноструктур, Институт биохимической физики РАН им. Н.М. Эмануэля, Место для ввода текста., ул. Косыгина 4, г. Москва, 119991, Россия, misinnn@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-4204-8531

Information about authors

Nadezhda S. Nikulina , Cand. Sci. (Engin.), technical complexes and communications department , Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service, nad.nikulina2013@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-2586-7738

Sergey S. Nikulin DR. Sci. (Engin.), professor, technologies of organic compounds and polymer processingdepartment, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, nikulin.nikuli@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-8141-8008

Larisa A. Vlasova Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, industrial ecology and technosphere safety department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19, Voronezh, 394036, Russia, vllar65@ya.ru
https://orcid.org/0000-0003-1515-8321

Vyacheslav M. Misin Dr. Sci. (Engin.), professor leading researcher, department of electronics of organic materials and nanostructures Institute of Biochemical Physics of the Russian Academy of Sciences named after N.M. Emanuel, Место для ввода текста., Kosygina 4, Moscow, 119991, Russia, misinnn@gmail.com
https://orcid.org/0000-0003-4204-8531

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 10/01/2026	**После редакции** 19/01/2026	**Принята в печать** 22/02/2026
Received 10/01/2026	**Accepted in revised** 19/01/2026	**Accepted** 22/02/2026