

ПРИМЕНЕНИЕ АРАБИНОГАЛАКТАНА ДЛЯ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ДРЕВЕСИНЫ

Н.В. Килюшева[✉], В.Е. Данилов, А.О. Беляев, А.М. Айзенштадт

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), Россия, 163002,
г. Архангельск, ул. Набережная Северной Двины, д. 17

n.volkova@narfu.ru

Представлены разработанные и научно обоснованные рецептурно-технологические решения, направленные на улучшение физико-химических и физико-механических характеристик строительных материалов из древесины сосны путем минерализации матрицы растительного сырья в результате его обработки водной органоминеральной суспензией на основе арабиногалактана и предварительно механоактивированного кремнеземсодержащего песка. Приведены экспериментальные данные по калориметрическому измерению тепловых эффектов энтальпии комплексообразования для серии опытных образцов с различным содержанием кремнеземсодержащего песка и результаты, подтверждающие высокую эффективность арабиногалактана в качестве поверхностно-активного вещества. Обнаружен факт образования химической связи в процессе пропитки образцов древесины указанной органоминеральной суспензией между органическими макромолекулами (целлюлоза, лигнин, гемицеллюлоза) растительного сырья и диоксидом кремния минерального компонента, что способствует закреплению последнего в структуре древесной матрицы. Установлено, что минерализация поверхности древесины композициями, содержащими арабиногалактан и наночастицы диоксида кремния, увеличивает ее плотность и твердость, а также способствует приобретению гидрофобных свойств и формированию устойчивости к окислительному разрушению, что указывает на возможность использования органоминеральной суспензии данного состава для окаменения древесины. Изложено кинетическое описание процесса комплексообразования, определены условия стабильного длительного существования комплекса в водной среде. Показано, что обработка древесины органоминеральной суспензией в продолжение 24 ч в самопроизвольном режиме рационально подобранным составом приводит к возрастанию плотности растительного сырья на 10 %, приросту прочности вдоль волокон — на 80 %, твердости по Бринеллю — в 3,4 раза. Получены данные о значительной интенсификации процесса минерализации растительного сырья путем пропитки образцов древесины в автоклавном режиме органоминеральной суспензией (под избыточным давлением 1,35...1,40 МПа), а также об увеличении плотности древесины на 70 % за 24 ч, о приросте прочности вдоль волокон до 91 %, о возрастании твердости по Бринеллю в 3,5 раза и уменьшении водопоглощения на 21 %. Установлено, что пропитка древесины суспензией разработанного органоминерального состава не приводит к изменению геометрических размеров и текстуры образцов. Рекомендуется обработка образцов из древесины органоминеральной суспензией с минимальным содержанием компонентов: арабиногалактан — 2 %, механоактивированный кварцсодержащий песок — 9 % в режиме повышенного давления в течение 24 ч для улучшения физико-механических свойств.

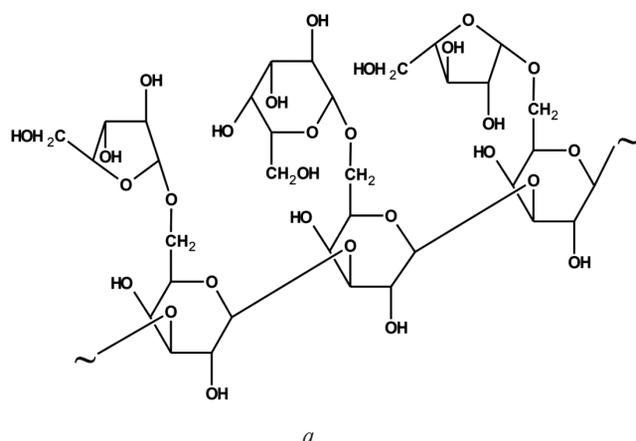
Ключевые слова: арабиногалактан, кремнеземсодержащий песок, петрификация древесины, автоклав, прирост прочности

Ссылка для цитирования: Килюшева Н.В., Данилов В.Е., Беляев А.О., Айзенштадт А.М. Применение арабиногалактана для минерализации древесины // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 2. С. 121–127. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-2-121-127

Древесина является одним из наиболее распространенных строительных материалов, особенно для Северо-Западного региона России. Несмотря на наличие положительных качеств, древесине присущи такие недостатки, как анизотропия, усушка, разбухание при контакте с водой с последующим биологическим разрушением [1–6]. В целях устранения части указанных недостатков в настоящее время используют фунгицидные и антисептирующие составы. Они образуют тонкую пленку или мономолекулярный слой на стенках капилляров, перекрывающие попадание молекул воды, тем самым увеличивая срок службы материала [7]. Однако существующие

в настоящее время композиционные составы характеризуются недолговечностью вследствие окислительной деструкции, негативным воздействием на окружающую среду и незначительной глубиной пропитки [8].

Увеличение срока службы материалов из древесины может быть связано с созданием композиционных структур с верхними слоями, содержащими минеральные микро- и наночастицы. Это, как предполагается, будет способствовать увеличению плотности, прочности, твердости древесины и устойчивости ее к окислительному разрушению. Древесина на 99 % состоит из органических компонентов: около половины ее массы составляет целлюлоза, другую половину — гемицеллюлоза и лигнин.



б

Рис. 1. Арабиногалактан: *a* — фрагмент макромолекулы; *б* — внешний вид

Fig. 1. Arabinogalactan: *a* — macromolecule fragment; *б* — surface appearance

Они также содержат вещества ароматической природы, поли- и моносахариды, органические кислоты. Однако в составе древесины также могут присутствовать минеральные компоненты [9]. Для улучшения сцепления минеральных частиц с поверхностью древесины в суспензии и золи необходимо вводить стабилизирующие агенты [10].

Цель работы

Цель работы — разработка научно обоснованных технологических решений, обеспечивающих получение строительных материалов из древесины с улучшенными физико-механическими свойствами за счет поверхностной минерализации растительной матрицы органоминеральной кварцсодержащей водной суспензией.

Материалы и методы

Используемая нами технология ускоренной минерализации древесины заключается в ее обработке растворимым органоминеральным комплексом, который можно получить из арабиногалактана (АГ) и механоактивированных кремнеземсодержащих горных пород [11–14], например полиминерального кремнеземсодержащего песка (КП), который обладает очень высокой термостойкостью и при использовании в условиях атмосферного воздействия не изменяет свои свойства и не вступает в химические реакции с иными веществами [13, 14]. КП характеризуется весьма многообразным применением, а изделия из него имеют высокие показатели прочности и привлекательный внешний вид [14]. Для интенсификации процессов переработки сырья успешно используются процессы механической и механохимической активации [15]. Степень дисперсности минерального компонента, необходимую для комплексообразования с АГ, получают тонким размолотом в различных помольных агрегатах [16]. Арабиногалактан в составе органо-минерального комплекса стабилизирует агрегативную и седиментационную устойчивость частиц полученных суспензий (рис. 1).

Арабиногалактан — природный полисахарид, содержащийся в древесине лиственных пород, хорошо растворимый в воде [17]. Благодаря определенному строению и свойству проходить через клеточные мембраны древесины АГ в комплексе с нерастворимыми веществами способен действовать как стабилизатор размера частиц и комплексообразователь при минерализации древесины [18–21]. Разработка технологии поверхностной минерализации древесных материалов помогает решить вопрос сохранения конструкций из дерева и полностью исключить гниение и последующее разрушение строений с сохранением текстуры дерева [21]. Для успешного процесса петрификации необходимо определить рациональный пропиточный состав, содержащий наибольшее количество нанодисперсных частиц. Наиболее простым и распространенным методом их получения является золь-гель технология [10]. В золь-гель технологиях для получения наноразмерного дисперсного диоксида кремния применяется реакция гидролиза в растворах с последующими стадиями появления новой фазы и образования геля или отделения осадка [22–24].

Результаты и обсуждение

Известно, что для образования растворимого органоминеральной суспензии из АГ и КП частицы песка должны иметь размерность, близкую к нанометровой [25]. Для решения этой задачи перед смешиванием компонентов песок измельчали на шаровой мельнице методом сухого помола. Ранее нами было установлено, что для эффективного комплексообразования средний размер частиц диоксида кремния не должен превышать 1000 нм.

На рис. 2 представлена зависимость изменения относительной оптической плотности раствора при $\lambda = 700$ нм ($\delta D_{700} = D_{\text{комп}}/D_{\text{АГ}}$) от времени, которая показывает, что процесс комплексообразования проходит в течение 40 мин, причем активное комплексообразование при взаимодействии компонентов протекает 8...10 мин. Кроме того,

Таблица 1

Энтальпия комплексообразования в зависимости от содержания минерального компонента

Enthalpy of complexation depending on the content of the mineral component

Содержание АГ, %	Содержание КП по массе, %	pH	Изменение температуры Δt , °C	Энтальпия $-\Delta H$, кДж/кг
2	3	4,34	0,15	0,281
	6	4,50	0,2	0,375
	9	4,86	0,6	1,125
	12	4,87	0,3	0,563
	15	4,87	0,1	0,188

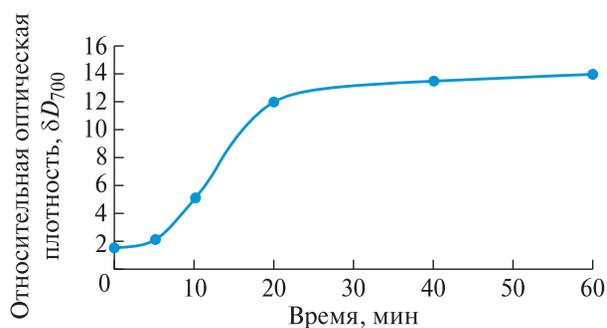


Рис. 2. Изменение относительной оптической плотности суспензии в зависимости от времени

Fig. 2. Change in the relative optical density of the suspension depending on time

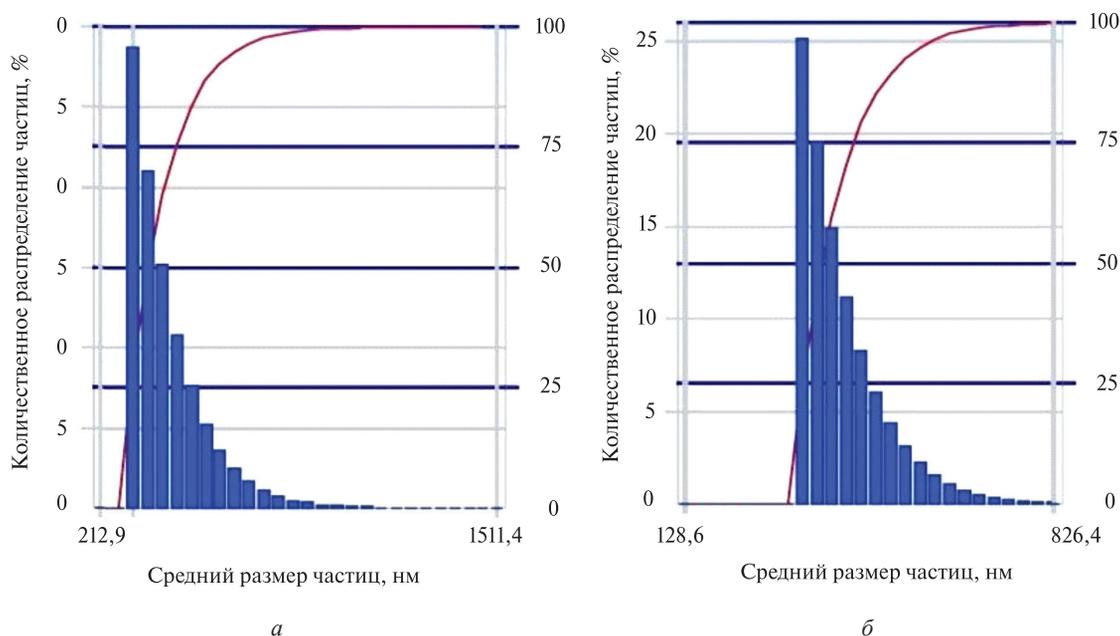


Рис. 3. Количественное распределение частиц (%) по размерам: а — 1 % суспензии диоксида кремния; б — суспензии АГ-КП

Fig. 3. Quantitative particle size distribution (%): а — 1 % silica suspension; б — suspensions of AG-KP

процесс комплексообразования сопровождается изменением окраски раствора (потемнением).

Результаты расчета на основе экспериментальных данных по калориметрическому измерению тепловых эффектов энтальпии комплексообразования для серии опытных образцов с различным содержанием кремнеземсодержащего компонента представлены в табл. 1.

Таким образом, по данным эксперимента рациональный состав компонентов в суспензии характеризуется массовым содержанием АГ 2 % и КП 9 %.

Арабиногалактан в водной суспензии, содержащей микрочастицы (или наночастицы) диоксида кремния выступает в роли комплексообразователя и стабилизатора размерных характеристик.

Параллельно потенциометрически контролировали величину pH исследуемых реакцион-

ных растворов. Данный параметр для всех серий эксперимента изменяется в диапазоне от 4,34 (суспензия с 3%-м содержанием КП) до 4,87 (суспензия с 15%-м содержанием КП). При увеличении концентрации КП значение pH суспензии растет, но при содержании КП 9 % оно стабилизируется. Данный факт, по нашему мнению, также свидетельствует о наличии химического взаимодействия в системе между органическим и минеральными компонентами и подтверждает состав суспензии, определенный калориметрически.

Среднее значение размера частиц диоксида кремния в водной суспензии составляет 324 нм. После добавления АГ и выдержки в течение 10 сут средний размер частиц составил 361 нм. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность АГ в качестве поверхностно-активного вещества (рис. 3).

Для применения полученной органоминеральной суспензии были изготовлены опытные образцы из древесины сосны с размером основания 20×20 мм и длиной вдоль волокон — 30 мм. Повышение температуры суспензии интенсифицирует процесс комплексообразования, поэтому перед погружением образцов древесины для пропитки суспензию нагревали до 80 °С в течение 1 ч.

Доведенные до постоянной массы в сушильном шкафу образцы древесины обрабатывали в течение 24 ч двумя способами:

- 1) погружением в суспензию (с использованием пригруза) и последующим выдерживанием при температуре 25 °С в естественных условиях;
- 2) обработкой суспензией в автоклаве под избыточным давлением 1,5 МПа.

Для сравнительной оценки изменений эксплуатационных характеристик были изготовлены контрольные образцы древесины, которые не подвергались вышеописанной обработке (рис. 4).

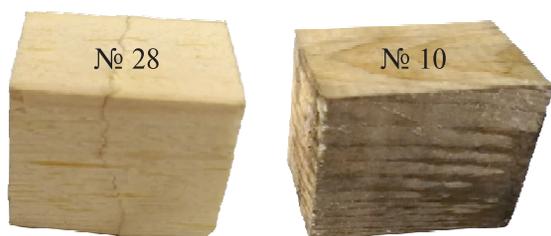


Рис. 4. Опытные образцы: контрольный образец (№ 28) и обработанная древесина (№ 10)

Fig. 4. Experimental samples: control sample (No. 28) and treated wood (No. 10)

Определение механических характеристик (твердости и прочности) древесины до модификации и после нее проводили на прессе испытательном ТП-1-100 и машине испытательной Shimadzu AGS-5kNX.

У обработанных опытных образцов проводили анализ на твердость и прочность. Предел прочности на сжатие (R) вдоль волокон выполняли на установке ТП-1-100 согласно ГОСТ 16483.10–73. Опытный образец размещали между двух опорных частей установки, в компьютер заносили данные скорости нагружения (25000 ± 5000 Н/мин) и размеры образца древесины. По итогу нагружения отмечали наивысшее значение примененной разрушающей нагрузки (P) и проводили расчет предела прочности при сжатии, учитывая площадь поперечного сечения опытных образцов. Твердость образцов определяли по методу Бринелля в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ 9012–59 на испытательной установке Shimadzu-AGS-X. Результаты определения физико-механических свойств образцов древесины приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Физико-механические свойства образцов древесины

Physical and mechanical properties of wood samples

Параметр	Контрольный образец	Пропитка	
		Самопроизвольная	Автоклавная
Предел прочности при сжатии (средний), $R_{ср}$, МПа	42,0	75,2	80,3
Прирост плотности (средний), $\Delta\rho_{ср}$, %	–	10,7	18,3
Твердость, НВW, МПа	1,09	3,71	3,8
Водопоглощение W , %	143,3	136,7	122,0

Полученные данные исследований прочности древесины, модифицированной органоминеральной суспензией, показали, что предел прочности на сжатие вдоль волокон испытанных образцов увеличился по сравнению с контрольными образцами на 80 % при самопроизвольной обработке и на 91 % при автоклавной. Модификация образцов древесины исследуемой органоминеральной суспензией в течение 24 ч также увеличивает твердость (по Бринеллю) обработанной древесины более чем в 3 раза. При повышенном давлении (автоклавной обработке) наблюдается значительное снижение водопоглощения — на 21,3 %. Причем, пропитка древесины разработанной органоминеральной суспензией не влияет на геометрические размеры и текстуру опытных образцов.

Выводы

Модификация образцов из древесины сосны с помощью суспензии, содержащей полисахарид арабиногалактан и полиминеральный кварцевый песок, улучшает физико-механические свойства растительной матрицы. Лучшую интенсификацию процесса минерализации показывает автоклавная пропитка (по сравнению с самопроизвольной). После 24 ч автоклавной пропитки плотность образцов увеличивается на 18 % (при самопроизвольной — на 10 %). Благодаря увеличению плотности опытных образцов возрастает и их прочность на сжатие вдоль волокон — на 80 % при самопроизвольной пропитке и на 91 % при автоклавной. Твердость по Бринеллю не зависит от условий протекания процесса и увеличивается более чем в 3 раза.

Список литературы

- [1] Marais B., Brischke C., Militz H. Wood durability in terrestrial and aquatic environments – A review of biotic and abiotic influence factors // Wood Material Science & Engineering, 2020, pp. 1–4. DOI: 10.1080/17480272.2020.1779810

- [2] Sivrikaya H., Can A., Yaman B., Palanti S., Morrell J. Effect of tallow impregnation on moisture behavior and decay resistance of various wood species // *Wood Material Science & Engineering*, 2020, no. 15(6), pp. 260–268. DOI: 10.1080/17480272.2020.1862298
- [3] Wentao G., Ying L., Likun G., Xianxu Zh., Jian L. Magnetic Property, Thermal Stability, UV-Resistance, and Moisture Absorption Behavior of Magnetic Wood Composites. DOI:10.1002/pc.23733
- [4] Holy S., Temiz A., Demirel G., Aslan M., Hazim M., Amiri 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. DOI: 10.1080/17480272.2020.1836023
- [5] Zaripov Sh., Chizhov A., Kormienko V., Semenova N. The Influence of Water-Soluble Substances on Moisture Distribution in Larch Lumber Before Drying // *Forestry Journal*, 2019, no. 6, pp. 185–193.
- [6] Dong Y., Yan Y., Ma H., Zhang S., Li J., Xia C., Shi S. Q., Cai L. In-Situ Chemosynthesis of ZnO Nanoparticles to Endow Wood with Antibacterial and UV-Resistance Properties // *J. of Materials Science & Technology*, 2017, № 33(3), pp. 266–270.
- [7] Elam J., Björndal C. A review and case studies of factors affecting the stability of wooden foundation piles in urban environments exposed to construction work // *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2020, 148 p. DOI:10.1016/j.ibiod.2020.104913
- [8] Lesovik V., Ayzenshtadt A., Frolova M., Lesovik R., Strokova V. «Green» Composites for North-Arctic Region Development // *The Open Ecology Journal*, 2014, t. 7, no. 1, pp. 32–36.
- [9] Килушева Н.В., Феклистов П.А., Ежова Н.В., Болотов И.Н., Филиппов Б.Ю. Сравнительный анализ содержания минеральных элементов в древесине сосны и ели // *ИзВУЗ Лесн. журнал*, 2017. № 5. С. 64–72.
- [10] Shin, Y., Liu J., Chang J.H., Nie Z., & Exarhos, G.J. Hierarchically Ordered Ceramics Through Surfactant-Templated Sol-Gel Mineralization of Biological Cellular Structures // *Advanced Materials*, 2001, v. 13, pp. 728–731.
- [11] Danilov V., Ayzenshtadt A., Kilyusheva N., Makhova T., Belyaev A. Colloid chemical aspects accelerated artificial petrification of wood // *J. of Physics: Conference Series*, 2019, v. 1400, p. 077053.
- [12] Данилов В.Е., Туробова М.А., Айзенштадт А.М., Русинова Я.М. Гидрофобные покрытия на основе кремнеземсодержащего сырья низкого качества // *Строительные материалы*, 2019. № 7. С. 61–65.
- [13] Zhang N., Xu M., Cai L. Improvement of mechanical, humidity resistance and thermal properties of heat-treated rubber wood by impregnation of SiO₂ precursor // *Scientific Reports*, 2019, v. 9, article number 982.
- [14] Danilov V., Ayzenshtadt A., Kilyusheva, N., Belyaev A. Wood surface modification with an arabinogalactan-silica composition // *J. of Wood Chemistry and Technology*, 2021, v. 41(6), pp. 1–13.
- [15] Mustoe G.E. Wood Petrification: A New View of Permineralization and Replacement // *Geosciences*, 2017, no. 7 (4), pp. 1191–1191/17. DOI:10.3390/geosciences7040119
- [16] Ишмуратов Ф.Г. Полисахариды: получение и влияние на ингибирование солеотложения и газогидратообразования: автореферат дис. ... канд. техн. наук 02.00.03. ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», 2018.
- [17] Килушева Н.В., Айзенштадт А.М., Данилов В.Е., Беляев А.О. Модификация древесины органоминеральным комплексом // *Промышленное и гражданское строительство*, 2020. № 2. С. 47–51.
- [18] Килушева Н.В., Айзенштадт А.М., Стенин А.А., Морозова М.В. Органоминеральный комплекс для поверхностной минерализации древесины // *Материаловедение*, 2019. № 4. С. 45–48.
- [19] Kilyusheva N., Danilov V., Ayzenshtadt A., Belyaev A. Compounding and technological methods for increasing the efficiency of wood matrix mineralization // *J. of Physics: Conference Series*, 2020, v. 1697, p. 012242.
- [20] Kiliusheva N., Ayzenshtadt A., Danilov V., Stenin A. Organic-mineral modifier for petrification of wood // 18-th International multidisciplinary scientific Geoconference S-GEM-2018: nano, bio and green-technologies for a sustainable future, 2–8 July, 2018, v. 18, pp. 385–392. DOI: 10.5593/sgem2018/6.1/S24.052
- [21] Kilyusheva N., Danilov V., Ayzenshtadt A., Belyaev A. Compounding and technological methods for increasing the efficiency of wood matrix mineralization // *J. of Physics: Conference Series*, 2020, v. 1697, p. 012242.
- [22] Bak M., Molnár F., Németh R. Improvement of dimensional stability of wood by silica nanoparticles // *Wood Material Science & Engineering*, 2019, no. 14, pp. 48–58. DOI: 10.1080/17480272.2018.1528568
- [23] Wentao G., Likun G., Shaoliang X., Wenbo Zh. Transparent magnetic wood composites based on immobilizing Fe₃O₄ nanoparticles into a delignified wood template // *J. of Materials Science*, 2017, v. 52(6). DOI:10.1007/s10853-016-0619-8
- [24] Батин М.О. Повышение биологической стойкости полов из модифицированной древесины введением наноразмерных добавок // *Строительные материалы*, 2018. № 1–2. С. 52–57.
- [25] Semenzin E., Subramanian V., Pizzol L., Zabeo A., Fransman W., Hristozov C., Marcomini A. Controlling the risks of nano-enabled products through the life cycle: The case of nano copper oxide paint for wood protection and nano-pigments used in the automotive industry // *Environment International*, 2019, v. 131, p. 104901. DOI:10.1016/j.envint.2019.06.011

Сведения об авторах

Килушева Наталья Владимировна — соискатель кафедры «Композиционные материалы и строительная экология», ФГАУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), n.volkova@narfu.ru

Данилов Виктор Евгеньевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Композиционные материалы и строительная экология», ФГАУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), v.danilov@narfu.ru

Беляев Александр Олегович — аспирант кафедры «Композиционные материалы и строительная экология», ФГАУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), mr.oba0509@mail.ru

Айзенштадт Аркадий Михайлович — д-р хим. наук, профессор, зав. кафедрой «Композиционные материалы и строительная экология», ФГАУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ), a.isenshtadt@narfu.ru

Поступила в редакцию 25.11.2022.

Одобрено после рецензирования 10.01.2023.

Принята к публикации 25.01.2023.

ARABINO GALACTAN APPLICATION FOR WOOD MINERALIZATION

N.V. Kilyusheva[✉], V.E. Danilov, A.O. Belyaev, A.M. Ayzenshtadt

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 17, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 163002, Arkhangelsk, Russia

n.volkova@narfu.ru

Formulation and technological solutions aimed at improving the physico-chemical and physico-mechanical characteristics of pine wood construction materials by mineralization of the plant raw materials matrix due to its treatment with an aqueous organomineral suspension based on arabinogalactan and pre-mechanoactivated silica-containing sand have been developed and scientifically substantiated. The natural polysaccharide arabinogalactan isolated from larch wood can act as a stabilizer of aggregation and sedimentation stability of suspension particles for wood processing. Experimental data on the thermal effect calorimetric measurement of the enthalpy of complexation for a series of experimental samples with different contents of a silica-containing component are presented. The results confirming the high efficiency of arabinogalactan as a surfactant have been obtained. The fact of the formation of a chemical bond during the impregnation of wood samples with an organomineral suspension between organic macromolecules (cellulose, lignin, hemicellulose) of vegetable raw materials and silica of the mineral component was found, which contributes to the consolidation of the latter in the structure of the wood matrix. Mineralization of the wood surface with compositions containing arabinogalactan and silica nanoparticles gives an increase in density and hardness, as well as the acquisition of hydrophobic properties and resistance to oxidative degradation. This indicates the possibility of using this composition for petrifying wood. The kinetic description of the complexation process is given, the conditions of stable long-term existence of the complex in an aqueous medium are established. It is shown that the treatment of wood with suspension for 24 hours in a spontaneous mode with a rationally selected composition leads to an increase in the density of vegetable raw materials by 10 %, an increase in strength along the fibers by 80 %, Brinell hardness by 3,4 times. Impregnation of wood samples in autoclave mode with a similar suspension (under an excess pressure of 1,35...1,40 MPa) significantly intensifies the process of mineralization of plant raw materials. Thus, over a time period of 24 hours, the density of wood increases by 70 %, the increase in strength along the fibers was 91 %, Brinell hardness increases by 3,5 times, water absorption decreases by 21 %. It was found that the impregnation of wood with a suspension of the developed organomineral composition does not lead to a change in the geometric dimensions and texture of the samples.

Keywords: arabinogalactan, silica-containing sand, petrification of wood, autoclave, strength gain

Suggested citation: Kilyusheva N.V., Danilov V.E., Belyaev A.O., Ayzenshtadt A.M. *Primenenie arabinogalaktana dlya mineralizatsii drevesiny* [Arabinogalactan application for wood mineralization]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 2, pp. 121–127. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-2-121-127

References

- [1] Marais B., Brischke C., Militz H. Wood durability in terrestrial and aquatic environments – A review of biotic and abiotic influence factors. *Wood Material Science & Engineering*, 2020, pp. 1–4. DOI: 10.1080/17480272.2020.1779810
- [2] Sivrikaya H., Can A., Yaman B., Palanti S., Morrell J. Effect of tallow impregnation on moisture behavior and decay resistance of various wood species. *Wood Material Science & Engineering*, 2020, no. 15(6), pp. 260–268. DOI: 10.1080/17480272.2020.1862298
- [3] Wentao G., Ying L., Likun G., Xianxu Zh., Jian L. Magnetic Property, Thermal Stability, UV-Resistance, and Moisture Absorption Behavior of Magnetic Wood Composites. DOI:10.1002/pc.23733
- [4] Holy S., Temiz A., Demirel G., Aslan M., Hazim M., Amini 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. DOI: 10.1080/17480272.2020.1836023
- [5] Zaripov Sh., Chizhov A., Kornienko V., Semenova N. The Influence of Water-Soluble Substances on Moisture Distribution in Larch Lumber Before Drying. *Forestry Journal*, 2019, no. 6, pp. 185–193.
- [6] Dong Y., Yan Y., Ma H., Zhang S., Li J., Xia C., Shi S. Q., Cai L. In-Situ Chemosynthesis of ZnO Nanoparticles to Endow Wood with Antibacterial and UV-Resistance Properties. *J. of Materials Science & Technology*, 2017, № 33(3), pp. 266–270.
- [7] Elam J., Björndal C. A review and case studies of factors affecting the stability of wooden foundation piles in urban environments exposed to construction work. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2020, 148 p. DOI:10.1016/j.ibiod.2020.104913
- [8] Lesovik V., Ayzenshtadt A., Frolova M., Lesovik R., Strokova V. «Green» Composites for North-Arctic Region Development. *The Open Ecology Journal*, 2014, t. 7, no. 1, pp. 32–36.
- [9] Kilyusheva N.V., Feklistov P.A., Ezhova N.V., Bolotov I.N., Filippov B.Yu. *Sravnitel'nyy analiz sodержaniya mineral'nykh elementov v drevesine sosny i eli* [Comparative analysis of the content of mineral elements in pine and spruce wood]. *Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal)*, 2017, no. 5, pp. 64–72.
- [10] Shin, Y., Liu J., Chang J.H., Nie Z., & Exarhos, G.J. Hierarchically Ordered Ceramics Through Surfactant-Templated Sol-Gel Mineralization of Biological Cellular Structures. *Advanced Materials*, 2001, v. 13, pp. 728–731.
- [11] Danilov V., Ayzenshtadt A., Kilyusheva N., Makhova T., Belyaev A. Colloid chemical aspects accelerated artificial petrification of wood. *J. of Physics: Conference Series*, 2019, v. 1400, p. 077053.

- [12] Danilov V.E., Turobova M.A., Ayzenshtadt A.M., Rusinova Ya.M. *Gidrofobnye pokrytiya na osnove kremnezemsoderzhashchego syr'ya nizkogo kachestva* [Hydrophobic coatings based on low quality silica-containing raw materials]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials], 2019, no. 7, pp. 61–65.
- [13] Zhang N., Xu M., Cai L. Improvement of mechanical, humidity resistance and thermal properties of heat-treated rubber wood by impregnation of SiO₂ precursor. *Scientific Reports*, 2019, v. 9, article number 982.
- [14] Danilov V., Ayzenshtadt A., Kilyusheva, N., Belyaev A. Wood surface modification with an arabinogalactan–silica composition. *J. of Wood Chemistry and Technology*, 2021, v. 41(6), pp. 1–13.
- [15] Mustoe G.E. Wood Petrification: A New View of Permineralization and Replacement. *Geosciences*, 2017, no. 7 (4), pp. 119/1–119/17. DOI:10.3390/geosciences7040119
- [16] Ishmuratov F.G. *Polisakharidy: poluchenie i vliyanie na ingibirovanie soleotlozheniya i gazogidratoobrazovaniya* [Polysaccharides: obtaining and influence on the inhibition of scaling and gas hydrate formation]. Abstract Diss. Cand. Sci. (Tech.) 02.00.03. Ufa State Oil Technical University, 2018.
- [17] Kilyusheva N.V., Ayzenshtadt A.M., Danilov V.E., Belyaev A.O. *Modifikatsiya drevesiny organomineral'nym kompleksom* [Modification of wood with an organomineral complex]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and civil construction], 2020, no. 2, pp. 47–51.
- [18] Kilyusheva N.V., Ayzenshtadt A.M., Stenin A.A., Morozova M.V. *Organomineral'nyy kompleks dlya poverkhnostnoy mineralizatsii drevesiny* [Organo-mineral complex for surface mineralization of wood]. *Materialovedenie*, 2019, no. 4, pp. 45–48.
- [19] Kilyusheva N., Danilov V., Ayzenshtadt A., Belyaev A. Compounding and technological methods for increasing the efficiency of wood matrix mineralization. *J. of Physics: Conference Series*, 2020, v. 1697, p. 012242.
- [20] Kilyusheva N., Ayzenshtadt A., Danilov V., Stenin A. Organic-mineral modifier for petrification of wood. 18-th International multidisciplinary scientific GeoconferenceSGEM-2018: nano, bio and green-technologies for a sustainable future, 2–8 July, 2018, v. 18, pp. 385–392. DOI: 10.5593/sgem2018/6.1/S24.052
- [21] Kilyusheva N., Danilov V., Ayzenshtadt A., Belyaev A. Compounding and technological methods for increasing the efficiency of wood matrix mineralization. *J. of Physics: Conference Series*, 2020, v. 1697, p. 012242.
- [22] Bak M., Molnár F., Németh R. Improvement of dimensional stability of wood by silica nanoparticles. *Wood Material Science & Engineering*, 2019, no. 14, pp. 48–58. DOI: 10.1080/17480272.2018.1528568
- [23] Wentao G., Likun G., Shaoliang X., Wenbo Zh. Transparent magnetic wood composites based on immobilizing Fe₃O₄ nanoparticles into a delignified wood template. *J. of Materials Science*, 2017, v. 52(6). DOI:10.1007/s10853-016-0619-8
- [24] Batin M.O. *Povyshenie biologicheskoy stoykosti polov iz modifitsirovannoy drevesiny vvedeniem nanorazmernykh dobavok* [Improving the biological resistance of floors made of modified wood by introducing nano-sized additives]. *Stroitel'nye materialy* [Building materials], 2018, no. 1–2, pp. 52–57.
- [25] Semenzin E., Subramanian V., Pizzol L., Zabeo A., Fransman W., Hristozov C., Marcomini A. Controlling the risks of nano-enabled products through the life cycle: The case of nano copper oxide paint for wood protection and nano-pigments used in the automotive industry // *Environment International*, 2019, v. 131, p. 104901. DOI:10.1016/j.envint.2019.06.011

Authors' information

Kilyusheva Natal'ya Vladimirovna [✉] — pg. of the Department of Composite Materials and Construction Ecology, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, n.volkova@narfu.ru

Danilov Viktor Evgen'evich, — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Composite Materials and Construction Ecology, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, v.danilov@narfu.ru

Belyaev Aleksandr Olegovich — pg. of the Department of Composite Materials and Construction Ecology, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, mr.oba0509@mail.ru

Ayzenshtadt Arkadiy Mikhaylovich — Dr. Sci. (Chem.), Professor, Head of the Department of Composite Materials and Building Ecology. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, a.isenshtadt@narfu.ru

Received 25.11.2022.

Approved after review 10.01.2023.

Accepted for publication 25.01.2023.

Вклад авторов: все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article
The authors declare that there is no conflict of interest