

Леса России и хозяйство в них. 2025. № 3 (94). С. 170–184.

Forest of Russia and economy in them. 2025. № 3 (94). P. 170–184.

Научная статья

УДК 666.973.2

DOI: 10.51318/FRET.2025.94.3.017

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ И ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДРЕВЕСНО-МИНЕРАЛЬНОГО КОМПОЗИТА, ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗ МЕХАНОАКТИВИРОВАННОГО ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ

Сергей Николаевич Долматов¹, Николай Витальевич Смертин²

^{1,2} Сибирский государственный университет науки и технологий
им. академика М. Ф. Решетнева, Красноярск, Россия

¹ pipinaskus@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9297-3699>

² kolya.smertin@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-1566-669X>

Аннотация. Переработка низкокачественной древесины и древесных отходов – устойчивый мировой тренд развития лесоперерабатывающей промышленности. Актуальность темы обусловлена наличием значительных объемов неиспользуемых древесных ресурсов, вовлечение в промышленный оборот которых позволит не только получить дополнительные доходы, но и снизить высокую экологическую нагрузку, связанную с негативным влиянием древесных отходов в плане их высокой пожарной опасности и способствования распространению вредителей леса. В работе исследованы физико-механические свойства (плотность, прочность, теплопроводность) древесно-минерального композита (ДМК), изготовленного на основе механоактивированного древесного наполнителя и минерального вяжущего (портландцемента). Механоактивация проводилась путем кавитационной обработки пульпы, содержащей воду и сосновые опилки. Методика исследования заключалась в первоначальном анализе отечественных и зарубежных публикаций по теме исследований композиционных материалов из древесного сырья, проведении натурного эксперимента с изготовлением и испытанием экспериментальных образцов древесно-минерального композита из кавитированных древесных опилок. В результате работы установлено, что кавитационная обработка древесных опилок приводит к резкому повышению прочностных показателей ДМК. Механоактивация древесных опилок позволяет увеличить прочность опилкобетона до величины 15,8 МПа. Величина предела прочности соответствует показателю керамзитобетонного или пескобетонного блока М100 или конструкционного бетона В15. Кавитационная обработка древесного сырья полностью исключает негативное влияние водорастворимых веществ на процессы набора прочности портландцементом. Производство ДМК позволяет вовлекать в переработку лигноцеллюлозные отходы с получением негорючих экологичных материалов, пригодных в качестве стеновых, с возможностью адаптации для выпуска различного вида плит, панелей, крупноформатных строительных конструкций.

Ключевые слова: древесно-минеральный композит, механоактивация, кавитация, плотность, прочность, теплопроводность

Для цитирования: Долматов С. Н., Смертин Н. В. Исследование прочности и теплопроводности древесно-минерального композита, изготовленного из механоактивированного древесного сырья // Леса России и хозяйство в них. 2025. № 3(94). С. 170–184.

Original article

RESEARCH OF STRENGTH AND THERMAL CONDUCTIVITY OF WOOD-MINERAL COMPOSITE MADE FROM MECHANICALLY ACTIVATED WOOD RAW MATERIAL

Sergey N. Dolmatov¹, Nikolay V. Smertin²

^{1,2} Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,
Krasnoyarsk, Russia

¹ pipinaskus@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9297-3699>

² kolya.smertin@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0003-1566-669X>

Abstract. Processing of low-quality wood and wood waste is a stable global trend in the development of the wood processing industry. The relevance of the topic is due to the presence of significant volumes of unused wood resources, the involvement of which in industrial circulation will not only generate additional income, but also reduce the high environmental burden associated with the negative impact of wood waste in terms of their high fire hazard and contributing to the spread of forest pests. The research investigates the physical and mechanical properties (density, strength, thermal conductivity) of wood-mineral composite (WMC) made on the basis of mechanically activated wood filler and mineral binder (portland cement). Mechanical activation was carried out by cavitation treatment of pulp containing water and pine sawdust. The research methodology consisted of the initial analysis of domestic and foreign publications on the topic of research into composite materials from wood raw materials, conducting a full-scale experiment with the production and testing of experimental samples of wood-mineral composite from cavitated wood sawdust. The result of the research is that cavitation treatment of wood sawdust leads to a sharp increase in the strength indicators of WMC. Mechanical activation of wood sawdust allows increasing the strength of sawdust concrete to 15,8 MPa. The value of the ultimate strength corresponds to the indicator of expanded clay concrete or sand concrete block M100 or structural concrete B15. Cavitation treatment of wood raw materials completely eliminates the negative impact of water-soluble substances on the processes of gaining strength of portland cement. The production of wood-mineral composites allows involving lignocellulose waste in processing to produce non-combustible, environmentally friendly materials suitable for wall applications, with the possibility of adaptation for the production of various types of slabs, panels, and large-format building structures.

Keywords: wood-mineral composite, mechanical activation, cavitation, density, strength, thermal conductivity

For citation: Dolmatov S. N., Smertin N. V. Research of strength and thermal conductivity of wood-mineral composite made from mechanically activated wood raw material // Forests of Russia and economy in them. 2025. № 3 (94). P. 170–184.

Введение

Безотходные технологии и бережное потребление невозобновляемых природных ресурсов являются современным трендом стран, имеющих развитую экономику и долгосрочное планирование. Стратегия комплексной переработки, утилизации и обезвреживания отходов потребления

и производства Российской Федерации, запланированная на срок до 2030 г., предусматривает производство бетонов различного назначения на основе органических заполнителей (Стратегия развития промышленности..., 2018). Такие строительные материалы имеют широкое распространение и устойчивый спрос. Это строительный

сектор как индивидуального жилищного строительства, так и сектор промышленной застройки.

Лесопромышленный сектор России ежегодно генерирует не менее 68–74 млн м³ различных древесных отходов, перерабатывается не более 50 %. В Красноярском крае не менее 2,7 млн м³ древесных отходов в год требуют переработки, но никак не осваиваются (Долматов и др., 2024).

Такие существенные объемы вторичных ресурсов, вместо того чтобы приносить дополнительный доход и удовлетворять потребности различных отраслей, напротив, требуют сил и средств на их сжигание или складирование, захоронение. Само их наличие, как пожароопасного материала, повышает риски пожаров. Как лесосеки, так и свалки и полигоны регулярно горят. Являясь пищей для вредителей леса, древесные отходы служат постоянным источником распространения популяции насекомых-вредителей.

Современные тренды углеродной нейтральности диктуют необходимость скорейшего перехода на увеличение производства и потребления древесного биотоплива, использование современных высокотехнологичных биопродуктов на основе комплексной переработки древесного сырья (Перспективы развития..., 2023).

Перспективным направлением, являющимся эффективным решением по утилизации древесных отходов, выступает производство композиционных материалов различного вида и назначения. Композитный материал является сочетанием нескольких видов материалов, когда физико-механические свойства конечного продукта обычно принципиально отличаются от свойств исходных компонентов. Основными компонентами композиционного материала является матрица, армирующие волокна и наполнители или добавки. Промышленность освоила выпуск в значительных объемах композитов с синтетическими вяжущими в виде различных смол. Это различного вида плиты и древесно-полимерные пластики. В последнее время из-за повышенного внимания к экологической части производства и применения древесно-полимерных композитов наметилась тенденция по поиску и внедрению материалов с низкой эмиссией фенольных смол. Разрабатываются лигно-

целлюлозные композиты, в которых синтетические вяжущие не используются вовсе. В основе такой технологии лежит гидродинамическая обработка древесного сырья, в процессе которой происходит измельчение древесных частиц и их фибриллирование. Структура древесного композита образуется при восстановлении макромолекулярных водородных связей, которые были разрушены в процессе механоактивации (Формирование..., 2019).

С момента появления гидратируемых вяжущих принимаются активные и успешные попытки применения гипса, извести и цемента для производства древесно-минеральных композитов. Еще в начале XX в. такие материалы были получены в Австрии из гипса и древесной стружки. Промышленное производство древесно-минеральных композитов в виде плит (фирма Durisol) было налажено в 1930-х годах. Дальнейшим развитием стали плиты Velox (1950-е годы) и плиты Duripanel (1970-е годы). С момента первого изобретения этих продуктов в Европе эти материалы получили дальнейшее развитие, с различными названиями распространившись по всему миру. Построено и функционирует значительное количество предприятий по производству древесных композитов (чаще всего различного вида панелей) (Van Elten, 1996).

В СССР в 1960–70-е годы также велись работы по активному освоению технологии древесно-минеральных композитов (ДМК). Были исследованы режимы и закономерности формирования материалов, построен и введен в эксплуатацию ряд заводов по производству блоков и панелей (Проекты ЦНИИМЭ, Гузерипльский ЛПХ (12 тыс. м³ в год панелей ДМК), Солнечногорский ЛПХ (5 тыс. м³ в год мелкоштучных блоков из ДМК)). Разработаны основные рекомендации и положения (Назашвили, 1990). К сожалению, в настоящее время обширного крупномасштабного производства ДМК в РФ нет. По отрывочным сведениям, представленным в сети Интернет, суммарный объем производства ДМК составляет не более 40–50 тыс. м³ в год.

Для сравнения: основной конкурент блоков из ДМК – автоклавный газобетон, который также

не является новинкой и в 2023 г. отметил 100-летие с момента своего появления, выпускается в большем на несколько порядков объеме. Общий объем производства автоклавного газобетона в 2023 г. составил 15,4 млн м³, на долю Сибири и Дальнего Востока приходится около 12,7 % от общего объема производства (Статистика..., 2025).

Сибирский федеральный округ и Красноярский край в частности имеют существенный потенциал в области переработки низкокачественной древесины благодаря наличию доступных ресурсов низкокачественной и поврежденной пожарами и вредителями леса древесины. Общий объем древесины, поврежденной пожарами, лесными вредителями и не включенной в цикл промышленного производства, составляет не менее 200 млн м³. Как правило, эти ресурсы располагаются в малоосвоенных и удаленных районах Красноярского края. Производство древесно-минеральных композиционных материалов с широким использованием в качестве исходного сырья вышеперечисленных ресурсов даст возможность получить доступный строительный материал, обладающий высокой прочностью, пожаробезопасностью, тепловой эффективностью и изготовленный из местного сырья, на простом и доступном технологическом оборудовании (Ковалев, Долматов, 2021).

Цель, задачи, методика и объекты исследования

Цель – исследование прочности и теплопроводности древесно-минерального композита, изготовленного из механоактивированного древесного сырья.

Цель исследования предусматривает решение определенных задач:

- 1) провести анализ применимости технологий кавитационной обработки при производстве древесных композитов;
- 2) изготовить экспериментальные образцы ДМК из механоактивированных древесных опилок;
- 3) определить плотность, прочность и теплопроводность полученного ДМК.

Методика предусматривает анализ работ отечественных и зарубежных авторов в предметной области исследования, анализ нормативных

документов, изготовление опытных образцов ДМК и проведение натурного эксперимента.

Объект исследования – древесно-минеральный композит, изготовленный из механоактивированных древесных опилок.

Предмет исследования – плотность, прочность, теплопроводность древесно-минерального композита.

Результаты и их обсуждение

Из-за широкого спектра переменных свойств композитные материалы из минеральной древесной массы можно в целом разделить на две отдельные группы. Композитные материалы, в которых древесные материалы (т.е. волокна, опилки) включены в качестве заполнителя в минеральную матрицу (например, опилкобетон). Композитные материалы, в которых минеральное связующее действует исключительно как связующее, работающее в контактном слое (например, арболит, фибролит). Классифицировать ДМК на основе гидратуемых вяжущих веществ можно на цементные, гипсовые, известковые, магнезиальные. Все эти вяжущие на минеральной основе использовались для производства низкоплотных теплоизоляционных (300–800 кг/м³) и высокоплотных конструкционных (800–1400 кг/м³) композитов.

Портландцемент – это самый доступный и широко распространенный материал, который при применении в виде вяжущего для ДМК даст водостойкий прочный композит. Гипсовые и магнезиальные вяжущие более чувствительны к влаге. ДМК, изготовленные на их основе, обычно могут применяться ограниченно, только внутри помещений стандартного влажностного режима. ДМК на портландцементе более долговечны, могут быть пригодны как для внутреннего, так и для наружного применения. В России гораздо большее распространение получили панели на основе синтетических смол (МДФ, ДВП, ДСП, облагороженные пластиком, пленкой и т.п.). Они производятся в гораздо больших объемах из-за низкой цены, высокой декоративности, простоты обработки. Однако они недостаточно влагостойки, горят и выделяют в окружающую среду пары фенолов и смол. Панели на основе ДМК обладают выгодными свойствами,

которые делают их более конкурентоспособными для наружного применения. Такие панели не горят и достаточно экологичны. Максимальный объем ДМК в виде облицовочных панелей производится в США. Обычно это сайдинг из целлюлозного волокна и цемента (Stark et al., 2010).

По прогнозным оценкам, ожидается рост производства и реализации фиброцемента и сайдинга с уровня в 4,5 млрд долл. в 2024 г. до 8,2 млрд долл. к 2034 г. То есть ежегодные темпы роста составляют не менее 6,2 % (Fiber Cement Siding..., 2025).

В региональном плане на рынке производства ДМК доминирует Северная Америка, поддерживаемая хорошо развитой строительной отраслью и различными программами кредитного строительства. США, в частности, являются ключевым участником из-за сравнительной дороговизны энергоносителей, электричества и, соответственно, наличия спроса на энергоэффективные строительные материалы. Азиатско-Тихоокеанский регион следует за ними, Китай, Южная Корея, Индия урбанизируются и динамично развиваются, что стимулирует рост рынка. Европа в плане производства ДМК также достаточно успешна, поскольку наличествуют весьма строгие законы в области энергосбережения и экологически чистых методов строительства.

Помимо организационных и маркетинговых вопросов, связанных с эффективностью и конкурентоспособностью ДМК, значительные проблемы представляет само сочетание органического древесного наполнителя и минеральной матрицы. Схватывание неорганических вяжущих является результатом достаточно сложной химической реакции, вызывающей последовательность стадий кристаллизации. Лигноцеллюлозный органический наполнитель древесно-минерального композита содержит в своем составе различные ингибиторы кристаллизации минеральных вяжущих. Это целлюлоза, гемицеллюлоза, водорастворимые вещества.

В работе И. Х. Наназашвили (1990) установлено, что наиболее активно ингибируют схватывание глюкоза, сахароза и гемицеллюлозы. Сорбит, являясь продуктом разложения альдегидной группы сахаров, сильнее всего негативно влияет на

процесс гидратации вяжущего. При содержании сорбита в ДМК 0,5 % и более гидратация цемента замедляется или приостанавливается вовсе.

Сахара-мономеры (сахароза, глюкоза) при присутствии в небольшом объеме (0,125 % и менее) даже ускоряют схватывание. Однако при их концентрации 0,25 % и более практически полностью прекращают процесс гидратации цементного камня (Руденко, Плотников, 2019).

Следует сказать, что из-за высокой степени освоения лесов европейской части России зона интенсивных лесозаготовок неуклонно смещается на север страны. Сибирь и Дальний Восток РФ характеризуются суровыми климатическими условиями с серьезными отрицательными температурами весной и осенью и экстремальными морозами зимой. В этих условиях растут породы с содержанием водорастворимых веществ до 17–18 % и даже более (лиственница). Высокий процент сахаров защищает древесину от разрушения морозами. Поскольку водорастворимые вещества, а именно сахара, оказывают максимальное негативное влияние на процессы гидратации карбонатных вяжущих, необходим поиск путей снижения их концентрации или нейтрализации влияния (Влияние..., 2019).

Древесный материал в зависимости от своего размера при работе в составе ДМК может действовать как мелкий заполнитель или как армирующий элемент в матрице на основе минерального вяжущего. Возможны также некоторые промежуточные виды работы древесного материала. Таким образом, форма и размеры древесного сырья, используемого в качестве наполнителя, в достаточной степени влияют на физико-механические свойства ДМК. Установлено (Долматов, 2017а), что опилкобетон на основе опилок более мелкой фракции (опилки от ленточной либо цепной пилы) имеет больший предел прочности на сжатие. Мелкие частицы древесных опилок (полученные при ленточном пилении) достаточно близки по своим размерам к крупному песку. Это приводит к формированию плотного каркаса цементной матрицы с включениями мелких опилок как наполнителя. Крупные же частицы формируют иные по своей сути взаимодействия, основанные на адгезии

поверхности крупных частиц и цементной матрицы, а прочность этих связей невелика. То есть при формировании ДМК из мелкодисперсных древесных частиц основой прочности ДМК будет матрица из карбонатного вяжущего. С увеличением размера частиц возрастает влияние прочности контактного слоя древесина – цемент. И окончательно влияние контактной прочности проявляется на ДМК с волокнистой или игольчатой формой древесного заполнителя (фибролит и арболит). Для создания структурированной прочной матрицы обычно в рецептуры опилкобетона добавляют песок. Песок – достаточно плотный минеральный материал. Его введение существенно увеличивает плотность и теплопроводность материала, что негативно влияет на теплотехнические показатели ДМК.

В работах (Долматов, 2017б; Dolmatov et al., 2019) экспериментальным путем доказана принципиальная возможность изготовления теплоизоляционного материала на основе опилкобетона без добавления песка с достаточной самонесущей способностью. Приемлемую конструкционную группу прочности (В1,5; В2) образцов получить сложно из-за недостаточной прочности получаемого материала. При увеличении содержания цемента до 500–600 кг/м³ теряется практический смысл теплоизоляционного материала, поскольку плотность образцов приближается к 1300 кг/м³, а теплопроводность конкурирует с параметрами шлакобетонов. Добавление эмульсии ПВА при прочих равных условиях повышает прочностные показатели на 25–30 %. При этом практически не происходит повышения плотности и, соответственно, теплопроводности материала.

Приемлемые с точки зрения практического применения застройщиками показатели прочности композита (2,7 МПа) достигаются при затворении смеси латексной эмульсией, приготовленной при смешивании латексной добавки Latexcol-M и воды в пропорции 1:1 и соотношении древесных опилок и цемента как 1:2, т. е. на 1 кг опилок – 2 кг цемента. Плотность древесно-минерального композита равна 1070 кг/м³. Просто опилки и цемент без введения нейтрализаторов сахаров или эмульсий, обволакивающих древесные частицы, дают

прочность образца всего 0,4 МПа (Dolmatov et al., 2019) (рис. 1).

О критическом влиянии содержания сахаров, присутствующих в древесине, вызывающего несовместимость минеральных вяжущих и древесины, особенно в хвойных породах, говорится в работах (A study on the..., 2019; Бозылев, Ягубкин, 2017; Simatupang, Geimer, 1990; A new technique..., 1990). Гидратацию минеральных вяжущих при наличии продуктов экстракции присутствующих в композите частиц древесины улучшают путем обработки частиц или использования специальных добавок. Прежде всего это может быть длительная (до полугода) выдержка измельченной древесины на открытом воздухе либо использование химических компонентов (например, хлористый натрий и кальций, сульфат алюминия, карбонат кальция, жидкое стекло).

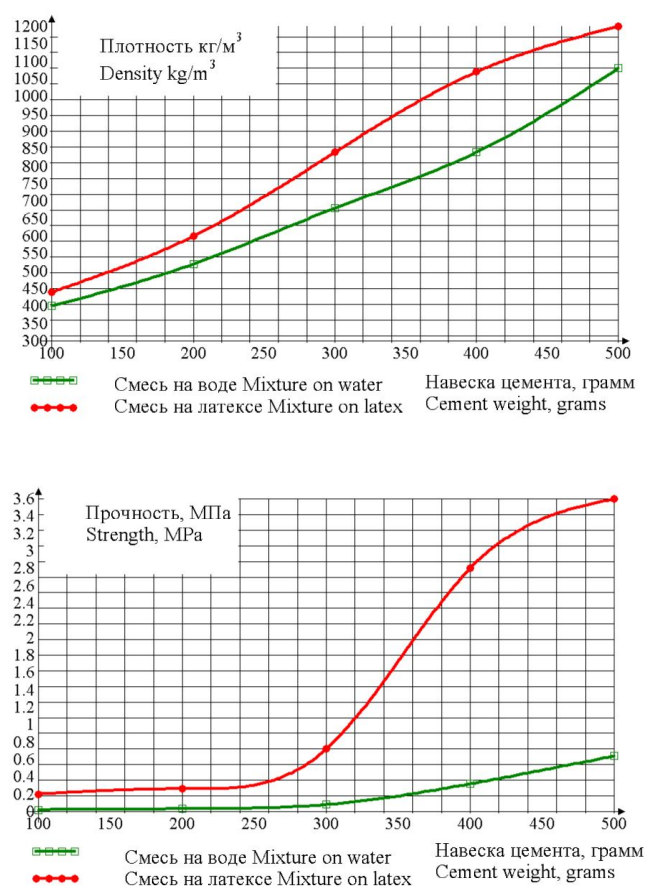


Рис. 1. Показатели плотности и прочности опилкобетона

Fig. 1. Density and strength indicators of sawdust concrete

Поскольку экстракция водорастворимых частиц осуществляется в водной среде, самым простым путем их исключения из состава ДМК будет длительная выдержка или вымачивание древесной дробленки. Вымачивание занимает длительное время. Для снижения содержания водорастворимых компонентов до приемлемого уровня в 4–5 % требуется несколько суток либо подогрев воды. И то и другое достаточно дорого и не может быть рекомендовано к промышленному применению. Кроме того, при обработке, например, опилок не устраняется еще один недостаток – необходимость формирования стабильной минеральной матрицы, для чего в рецептуру вводится песок, повышающий плотность и теплопроводность готового композита. Резко увеличить поверхность активного взаимодействия древесных частиц и извлечь водорастворимые компоненты позволяет процесс кавитационной обработки в водной суспензии. На этом принципе работает технология получения композитов из целлюлозно-лигносодержащего сырья без дополнительного связующего (Патент № 2656067, 2018). Способ получения плитных материалов включает помещение древесины сосны в емкость с водой, которую подвергают кавитационной обработке в течение 30 мин. Такая обработка, сопровождающаяся самопроизвольным разогреванием смеси, обеспечивает необходимую интенсификацию процессов разволокнения частиц и быстрый гидролиз гемицеллюлоз, деградацию лигнина с образованием более реакционноспособных соединений, содействующих образованию устойчивой матрицы древесного композита.

Кавитационная обработка позволяет получать пресс-массу в виде растительного сырья (древесные опилки, солома злаковых и др.) для формирования композиционного материала с физико-механическими показателями, удовлетворяющими требованиям евростандартов (Патент № 2381244, 2010).

В работе И. Б. Катракова и др. (2014) подтверждено, что кавитационная обработка растительного сырья сопровождается разрушением полисахаридной части (содержание в сосне уменьшается на 6,7–12,2 %) и частичной деградацией лигнина, что

способствует переработке в готовые изделия без добавления связующих веществ. Кавитация является рабочим методом, пригодным для изменения структуры растительной пресс-массы в интересах формирования композиционных материалов.

В работе (Новые композиционные материалы..., 2012) обосновано, что путем кавитационного модифицирования обводненной диспергированной древесины сибирской лиственницы (содержание сухого вещества 20 %) цементом М400 в присутствии добавок $AlCl_3$ и Na_2SO_4 , взятых в массовом соотношении 125:20:1, получен материал, характеризующийся плотностью 650 кг/м^3 и пределом прочности 2,6 МПа. При увеличении расхода цемента механическая прочность плитного материала закономерно увеличивается.

В работе Б. Д. Руденко, В. В. Кулак (2019) установлено, что кавитация позволяет практически полностью исключить вредное влияние водорастворимых веществ. Повышение прочности древесно-минерального композита достигается при повышенном расходе вяжущего и изменении формы, размеров и фракционного состава древесного наполнителя (Руденко, 2019).

Объектом исследования является древесно-минеральный композит (опилкобетон), представляющий собой легкий бетон с органическим древесным заполнителем, обработанным путем кавитационного воздействия. Предмет исследования – плотность, прочность, теплопроводность древесно-минерального композита. Для формирования древесного заполнителя использовались опилки древесины сосны, влажность которых составляла 40 %. Опилки просеивались от коры и мелких отходов через сито с ячейкой 5 мм.

Обработка древесного сырья проводилась в лабораторном гидродинамическом диспергаторе роторно-пульсационного типа (рис. 2). Сосновые опилки смешивались с водой температурой от 8 до 10°C в баке 1 до концентрации 6 %. Установка предназначена для обеспечения процесса диспергации древесины в водной среде. Главной частью экспериментальной машины служит диспергатор 3. Диспергатор или рафинер состоит из корпуса, выполненного в виде чугунной отливки. Подвижный ротор и неподвижный статор смонтированы

внутри рабочей камеры корпуса. Трехфазный электродвигатель с короткозамкнутым ротором 2 приводит в движение ротор. Суспензия из воды и опилок, подвергаемая диспергации, циркулирует через задвижку 4 и трубу циркуляции 5.

Конструктивное исполнение ротора предусматривает наличие резонаторов или резонансных камер, расположенных в виде радиальных прорезей (рис. 3).

При включении привода крутящий момент от электродвигателя через промежуточную опору,

необходимую для компенсации угловых перемещений и снижения радиальной нагрузки на опоры ротора электродвигателя, передается на ротор. Ротор начинает вращаться. При этом происходит перекрытие полостей, сформированных конфузоров, полостями, образованными резонансными камерами ротора. За счет того, что ротор вращается с достаточной частотой (число оборотов ротора двигателя 2950 об/мин), происходит высокочастотное пульсирующее изменение давления в этих полостях.

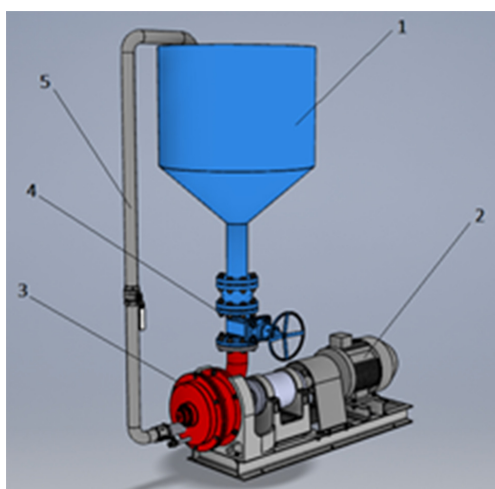


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки РГГД-1:
1 – бак; 2 – электродвигатель; 3 – гидродинамический диспергатор;
4 – запорная арматура (задвижка); 5 – труба циркуляционная
Fig. 2. General view of the experimental setup RGGD-1:
1 – tank; 2 – electric motor; 3 – hydrodynamic disperser;
4 – shut-off valve (gate valve); 5 – circulation pipe

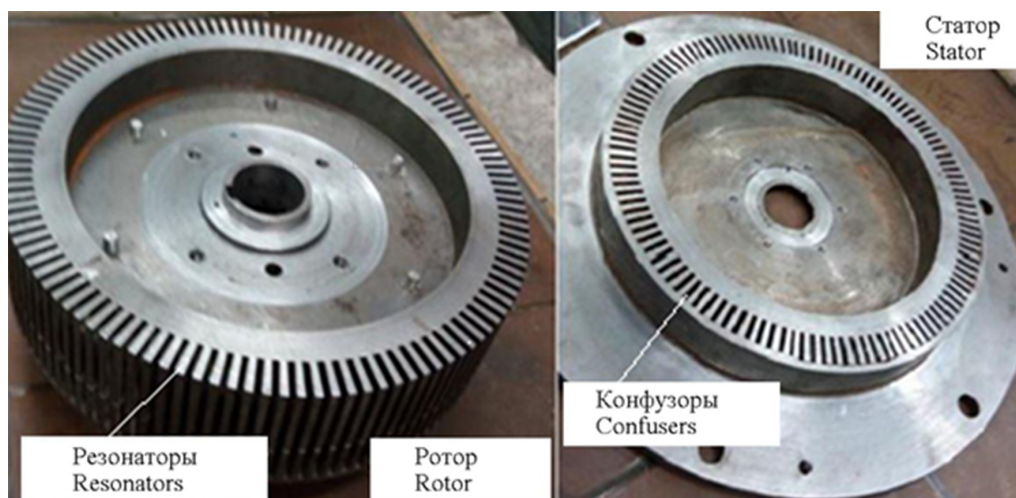


Рис. 3. Устройство рафинера установки диспергации
Fig. 3. Refiner device of the dispersion plant

Частицы древесины в составе пульпы находятся в состоянии гидравлического удара и разрушаются под действием гидродинамических сил в условиях турбулентного потока и явлений кавитации.

После того как суспензия приготавливается в баке 1, осуществляется пуск установки и открывается задвижка 2. Обработка длится 10 мин. Максимальная температура в конце обработки составляла 90 °С. После диспергации древесная масса переливалась в бак. Затем суспензия отстаивалась, для того чтобы из нее вытекли излишки воды.



Рис. 4. Кавитированная древесная масса
Fig. 4. Cavitated wood pulp

После отстаивания изымали часть суспензии и рассчитывали влажность, которая составляла 800 %. После обработки полученная масса отливается на специальную оснастку, представленную на рис. 4.

Подготовленная масса обезвоживается в оснастке с сетчатым дном с размером ячеек 0,25 мм. Под действием силы тяжести вода удаляется через сетку. Влажность древесной массы после ее обезвоживания равна 140–180 %.

Образцы опилкобетона изготавливались следующим образом. Кавитированная древесная масса при помощи электрической дрели и насадки-миксера (венчика) перемешивалась с портландцементом. Использовались две навески портландцемента ПЦ 500 Эксперт /42,5Н ГОСТ 31108–2020 производства ООО «Красноярский цемент». В первом варианте (смесь 1) на 3 кг кавитированной древесной массы приходилось 2 кг цемента. Во втором варианте (смесь 2) на 3 кг кавитированной древесной массы приходилось 4 кг цемента. Полученной смесью заполнялись кубические разъемные металлические формы с размерами 50×50×50 мм и 100×100×100 мм (рис. 5). Проводилось уплотнение ручной трамбовкой. По ГОСТ 19222–2019 изготавливалось по шесть образцов каждого вида. Сушка образцов проводилась при комнатной

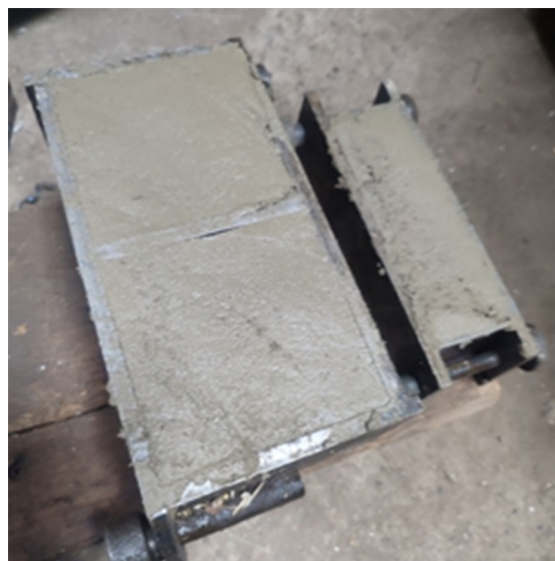


Рис. 5. Смесь после перемешивания и заполненные металлические формы
Fig. 5. Mixture after mixing and filled metal molds

температуре (+18...+22 °С). После 7 сут выдержки образцы освобождались из форм и маркировались. Полученные образцы ДМК находились в помещении при комнатной температуре в условиях естественной влажности 28 сут до момента набора прочности.

По истечении 28 сут определялась масса образцов и рассчитывалась их плотность. Теплопроводность образцов определялась методом нагретого зонда (ГОСТ 30256–94). Использовался прибор МИТ-1 ООО НПП «Интерприбор». МИТ-1 служит для определения теплопроводности теплоизоляционных, конструкционных, строительных материалов методом нагретого зонда. Измерительный зонд прибора помещался внутрь образцов опилко-

бетона. Для этого в образцах сверлом сверлились отверстия диаметром 6 мм.

Предел прочности при сжатии образцов определялся на гидравлическом испытательном прессе. Образец помещался между подвижными основаниями гидропресса. Включался привод, осуществлялось нагружение образца, определялся и записывался момент потери прочности (разрушения) образца. Фиксировался результат (показание динамометра гидропресса). Этапы проведения работ показаны на рис. 6.

После этого проводилась камеральная обработка экспериментальных данных. За момент разрушения принимался случай потери пропорциональности действующей нагрузки и деформации,



Рис. 6. Измерение массы, теплопроводности и прочности образцов
Fig. 6. Measurement of mass, thermal conductivity and strength of samples

когда образец выходил из зоны действия гуковских сил. Таким образом испытаниям подвергались все 12 образцов. Полученные в процессе эксперимента величины обрабатывались статистическими математическими методами с уровнем достоверности $R=0,95$.

Полученные показатели плотности, прочности и теплопроводности приведены ниже.

Для смеси 1:

- плотность 1042 кг/м³;
- предел прочности (сжатие) 8,4 МПа;
- коэффициент теплопроводности материала 0,41 Вт/(м²·°C).

Для смеси 2:

- плотность 1162 кг/м³;
- предел прочности (сжатие) 15,8 МПа;
- коэффициент теплопроводности материала 0,46 Вт/(м²·°C).

Согласно полученным экспериментальным данным, кавитационная обработка древесных опилок приводит к резкому повышению прочностных показателей. При равной величине плотности опилкобетона прочность при сжатии образцов, изготовленных из некавитированного древесного сырья на латексной эмульсии, составляет 3,3 МПа (см. рис. 1) (Долматов, 2017б). Механоактивация древесных опилок позволяет увеличить прочность опилкобетона до 15,8 МПа. Величина предела прочности соответствует показателю керамзитобетонного или пескобетонного блока М100 или конструкционного бетона В15. Кавитационная обработка древесного сырья полностью исключает негативное влияние водорастворимых веществ на процессы набора прочности портландцемента.

Основными потребителями строительных материалов, изготовленных из древесно-минеральных композитов, являются в основном индивидуальные застройщики. Для таких застройщиков показатель группы прочности строительных материалов может быть определен как В2–В2,5. Это объясняется тем, что индивидуальный застройщик строит, как правило, одно-двухэтажный дом. С одной стороны, группа прочности В15 избыточна. С другой стороны, теплопроводность материала находится в прямой зависимости от его плотности, поэтому потребителю интересен стеновой мате-

риал, может, и не обладающий прочностью по В15, но имеющий высокие теплоизоляционные показатели. Полученный нами опилкобетон по показателю теплопроводности (0,41–0,46 Вт/(м²·°C)) соответствует керамзитобетону (0,25–0,65 Вт/(м²·°C)) и существенно уступает, например, классическому арболиту (0,18–0,25 Вт/(м²·°C)) (Долматов, Никончук, 2019). Однако резерв по снижению прочности с величины 8,4–15,8 МПа до показателей 2–2,5 МПа позволяет предположить возможность получения низкоплотных древесно-минеральных композитов из кавитированного древесного сырья, имеющих высокие эксплуатационные показатели. В дальнейшем планируется определить необходимые оптимальные пропорции рецептуры минеральное вяжущее – древесный наполнитель и времени и параметров кавитационной обработки с целью получения материала с заданными физико-механическими свойствами (плотность, прочность, теплопроводность).

Выводы

Рынок производства и потребления композиционных материалов на основе минеральных вяжущих и древесных наполнителей различается по видам продукции, объемам производства и культуре потребления по всему миру. Тем не менее существует большой потенциал для вовлечения в промышленную переработку древесины и древесных отходов для изготовления композитов на минеральной основе. Такие материалы, как арболит, опилкобетон, фибролит, имеют высокую практическую ценность и могут служить сырьем для производства как стеновых, так и облицовочных декоративных материалов. Эти материалы позволяют вовлекать в переработку лигноцеллюлозные отходы с получением негорючих экологических материалов, пригодных в качестве стеновых, с возможностью адаптации для выпуска различного вида плит, панелей, крупноформатных строительных конструкций.

Натурный эксперимент по изучению свойств древесно-минерального композита, изготовленного из механоактивированных опилок, установил позитивное влияние кавитационной обработки древесного сырья на показатели материала, важные

с точки зрения его практического использования. Установлено, что механоактивация древесного сырья позволяет получать древесно-минеральные композиты высокой прочности, при этом практи-

чески полностью исключается негативное влияние растворимых веществ, находящихся в древесине, на параметры гидратации цементного камня.

Список источников

- Бозылев В. В., Ягубкин А. Н. Инновационный арболит с заданными свойствами // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС ; редкол. : О. Н. Лешкевич [и др.]. Минск, 2017. Вып. 9. С. 96–112.
- Влияние древесных сахаров на прочностные характеристики древесно-цементных композиций / А. В. Пряничникова, С. Н. Долматов, В. П. Стрижнев, М. З. Шаронова // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : сб. матер. Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Красноярск, 25–26 апреля 2019 года. Красноярск : Сиб. гос. ун-т науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева, 2019. С. 115–117.
- ГОСТ 19222–2019. Введен 2020-01-01. Арболит и изделия из него. Общие технические условия. М. : Стандартинформ, 2019. 36 с.
- ГОСТ 30256–94. Введен 1996-01-01. Материалы и изделия строительные метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом. М. : МНТКС, 1996. 20 с.
- ГОСТ 31108–2020. Введен 2021-03-01. Цементы общестроительные. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2020. 29 с.
- Долматов С. Н. Влияние фракционного состава опилок на прочностные свойства опилкобетона // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. : Техника и технологии. 2017а. Т. 10, № 1. С. 48–51. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-1-48-51
- Долматов С. Н. Прочностные свойства древесных композиций на основе опилок и портландцемента без введения минеральных заполнителей // Вестник научных конференций. 2017б. № 2-6 (18). С. 36–38.
- Долматов С. Н., Колесников П. Г., Пережилин А. И. Освоение низкокачественной поврежденной древесины и древесных отходов в Красноярском крае // Сибирский лесной журнал. 2024. № 6. С. 88–100. DOI: 10.15372/SJFS20240611
- Долматов С. Н., Никончук А. В. Исследование показателей теплопроводности древесно-цементных композитов // Хвойные бореальной зоны. 2019. Т. 37, № 5. С. 341–346.
- Катраков И. Б., Маркин В. И., Базарнова Н. Г. Получение пресс-масс и плитных материалов на основе кавитированного растительного сырья // Известия Алтайского государственного университета. 2014. № 3-1 (83). С. 204–208. DOI: 10.14258/izvasu(2014)3.1-37
- Ковалев Р. Н., Долматов С. Н. Анализ сырьевого потенциала поврежденных лесов Красноярского края в целях промышленного производства древесно-цементных композитов // Хвойные бореальной зоны. 2021. Т. 39, № 6. С. 483–491.
- Наназашвили И. Х. Строительные материалы из древесно-цементных композиций. Л. : Стройиздат, 1990. 416 с.
- Новые композиционные материалы на основе кавитированной древесины / А. Т. Телешев, К. И. Быков, М. П. Коротеев [и др.] // Доклады Академии наук. 2012. Т. 443, № 5. С. 598.
- Патент № 2381244 С2 Российская Федерация, МПК C08L 97/02, B27K 9/00, B27N 3/04. Пресс-масса, способ ее получения и способ получения плитных материалов на ее основе : № 2008100649/02 : заявл. 09.01.2008 : опубл. 10.02.2010 / И. Б. Катраков, Н. Г. Базарнова, В. И. Маркин. EDN MFQSNM.
- Патент № 2656067 С2 Российская Федерация, МПК B27N 3/04, C08L 97/02. Способ получения плитных материалов на основе кавитированного растительного сырья и синтетических связующих :

№ 2016145029 : заявл. 16.11.2016 : опубл. 30.05.2018 / *И. Б. Катраков, В. И. Маркин* ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный университет». EDN SPBCRP.

Перспективы развития низкоуглеродных технологий в лесопромышленном производстве / *А. В. Мехренцев, Э. Ф. Герц, Г. П. Бутко* [и др.] // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : матер. VIII Всерос. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 24–26 мая 2023 года. СПб. : СПб. гос. лесотехн. ун-т им. С. М. Кирова, 2023. С. 701–703.

Руденко Б. Д. Влияние структуры цементно-древесного композита на его прочность // Тенденции развития науки и образования. 2019. № 56–1. С. 67–71. DOI: 10.18411/lj-11-2019-17

Руденко Б. Д., Кулак В. В. Формирование структуры гипсоцементно-древесного композита на основе кавитированных древесных частиц // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2019. № 55. С. 177–180.

Руденко Б. Д., Плотников С. М. Твердение цементно-древесной композиции при использовании сахарозы // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2019. № 54. С. 270–274.

Статистика, собранная о рынке автоклавного газобетона // НААГ : [сайт]. URL: <https://gazo-beton.org/> (дата обращения: 20.03.2025).

Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года : распоряжение Правительства РФ от 25.01.2018 № 84-р // Собрание законодательства РФ. 2018. № 6. Ст. 920.

Формирование структуры плит малой плотности из гидродинамически активированных мягких отходов деревообработки / *В. Н. Ермолин, М. А. Баяндин, С. Н. Казинин, А. В. Намятов* // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2019. № 5(371). С. 148–157. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.148

A new technique to classify the compatibility of wood with cement / *M. Hachmi, A. A. Moslemi, A. G. Campbell, M. Idaho* // Wood Science and Technology. 1990. № 354 (608). P. 345–354.

A study on the production process and properties of cement-based wood composite materials / *H. T. Sahin, A. I. Kaya, O. U. Yalchin* [et al.] // The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University. 2019. № 10(2). P. 219–228.

Dolmatov S. N., Nikonchuk A. V., Martynovskaya S. N. The strength of sawdust concrete, produced without mineral aggregates // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Workshop “Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP : Engineering – 2019”, Krasnoyarsk, 04–06 april 2019. London : Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. Vol. 537. P. 32024. DOI: 10.1088/1757-899X/537/3/032024

Fiber Cement Siding Market Analysis and Forecast to 2034 // GIS : [website]. URL: <https://www.globalinsightservices.com/reports/fiber-cement-siding-market/> (accessed 20.03.2025).

Simatupang M. H., Geimer R. L. Inorganic binder for wood composites : feasibility and limitations // Wood adhesive symposium proceedings, May 16–18, 1990. Madison, WI. P. 169–176.

Stark N. M., Cai Z., Carll C. Wood-based composite materials: Panel products, glued-laminated timber, structural composite lumber, and wood-nonwood composite materials // Wood handbook: wood as an engineering material, USDA Forest Service, FPL; GTR-190. 2010. P. 11.1–11.28.

Van Elten G. J. Innovation in the production of cement-bonded particleboard and wood-wool cement board // 5th Int. Inorganic Bonded Wood and Fiber Comp. Mat. Conf. Spokane, Washington, USA, 1996.

References

- A new technique to classify the compatibility of wood with cement / M. Hachmi, A. A. Moslemi, A. G. Campbell, M. Idaho // *Wood Science and Technology*. 1990. № 354 (608). P. 345–354.
- A study on the production process and properties of cement-based wood composite materials / H. T. Sahin, A. I. Kaya, O. U. Yalchin [et al.] // *The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University*. 2019. № 10(2). P. 219–228.
- Bozylev V. V., Yagubkin A. N. Innovative arbolite with specified properties // *Problems of modern concrete and reinforced concrete : collection of Scientific research / Institute BelNIIS ; editorial board : O. N. Leshkevich [et al.]. Minsk, 2017. Issue 9. P. 96–112. (In Russ.)*
- Dolmatov S. N. Strength properties of wood compositions based on sawdust and Portland cement without the introduction of mineral fillers // *Bulletin of scientific conferences*. 2017b. № 2–6(18). P. 36–38. (In Russ.)
- Dolmatov S. N. The influence of the fractional composition of sawdust on the strength properties of sawdust concrete // *Journal of the Siberian Federal University. Series: Engineering and technology*. 2017a. Vol. 10, № 1. P. 48–51. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-1-48-51 (In Russ.)
- Dolmatov S. N., Kolesnikov P. G., Perezhilin A. I. Development of low-quality damaged wood and wood waste in the Krasnoyarsk Territory // *Siberian Forest Journal*. 2024. № 6. P. 88–100. DOI :10.15372/SJFS20240611 (In Russ.)
- Dolmatov S. N., Nikonchuk A. V., Martynovskaya S. N. The strength of sawdust concrete, produced without mineral aggregates // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Workshop “Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP : Engineering – 2019”, Krasnoyarsk, 04–06 april 2019. London : Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. Vol. 537. P. 32024. DOI: 10.1088/1757-899X/537/3/032024*
- Dolmatov S. N., Nikonchuk A. V. Investigation of the thermal conductivity of wood-cement composites // *Conifers of the boreal zone*. 2019. Vol. 37, № 5. P. 341–346. (In Russ.)
- Fiber Cement Siding Market Analysis and Forecast to 2034 // GIS : [website]. URL: <https://www.globalinsightservices.com/reports/fiber-cement-siding-market/> (accessed 20.03.2025).
- Formation of the structure of low-density slabs from hydrodynamically activated soft woodworking waste / V. N. Ermolin, M. A. Bayandin, S. N. Kazitsin, A. V. Namyatov // *News of Higher Educational Institutions. Forest magazine*. 2019. № 5(371). P. 148–157. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.5.148 (In Russ.)
- GOST 19222–2019. Arbolite and products made from it. General technical specifications. Moscow : Standartinform, 2019. 36 p.
- GOST 30256–94. Building materials and products are a method for determining thermal conductivity with a cylindrical probe. Moscow : MNTKS, 1995. 20 p.
- GOST 31108–2020. General construction cements. Technical specifications. Moscow : Standartinform, 2020. 29 p.
- Industrial development strategy for the processing, utilization and neutralization of industrial and consumer waste for the period up to 2030 : Decree of the Government of the Russian Federation dated 25.01.2018 № 84-r // *Collection of Legislation of the Russian Federation*. 2018. № 6. St. 920. (In Russ.)
- Katrakov I. B., Markin V. I., Bazarnova N. G. Production of press masses and plate materials based on cavitated vegetable raw materials // *Proceedings of the Altai State University*. 2014. № 3-1(83). P. 204–208. DOI: 10.14258/izvasu(2014)3.1-37 (In Russ.)
- Kovalev R. N., Dolmatov S. N. Analysis of the raw material potential of the damaged forests of the Krasnoyarsk Territory for the industrial production of wood-cement composites // *Conifers of the boreal zone*. 2021. Vol. 39, № 6. P. 483–491. (In Russ.)
- Nanazashvili I. H. Building materials from wood-cement compositions. Leningrad : Stroyizdat, 1990. 416 p.

- New composite materials based on cavitated wood / *A. T. Teleshev, K. I. Bykov, M. P. Koroteev* [et al.] // Reports of the Academy of Sciences. 2012. Vol. 443, № 5. P. 598. (In Russ.)
- Patent № 2381244 C2 Russian Federation, IPC C08L 97/02, B27K 9/00, B27N 3/04. The press mass, the method of its preparation and the method of obtaining plate materials based on it : № 2008100649/02 : application 09.01.2008 : published 10.02.2010 / *I. B. Katrakov, N. G. Bazarnova, V. I. Markin*. EDN MFQSNM.
- Patent № 2656067 C2 Russian Federation, IPC B27N 3/04, C08L 97/02. Method of obtaining slab materials based on cavitated vegetable raw materials and synthetic binders : № 2016145029 : application 16.11.2016 : published 30.05.2018 / *I. B. Katrakov, V. I. Markin* ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Altai State University”. EDN SPBCRP.
- Prospects for the development of low-carbon technologies in timber processing / *A.V. Mehrentsev, E. F. Hertz, G. P. Butko* [et al.] // Forests of Russia: politics, industry, science, education : Proceedings of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference, St. Petersburg, May 24–26, 2023. St. Petersburg : St. Petersburg State Forestry Technical University named after S. M. Kirov, 2023. P. 701–703. (In Russ.)
- Rudenko B. D.* The influence of the cement-wood composite structure on its strength // Trends in the development of science and education. 2019. № 56–1. P. 67–71. DOI 10.18411/lj-11-2019-17 (In Russ.)
- Rudenko B. D., Kulak V. V.* Formation of the gypsum-cement-wood composite structure based on cavitated wood particles // Actual problems of the forest complex. 2019. № 55. P. 177–180. (In Russ.)
- Rudenko B. D., Plotnikov S. M.* Hardening of the cement-wood mixture using sucrose // Actual problems of the forest complex. 2019. № 54. P. 270–274. (In Russ.)
- Simatupang M. H., Geimer R. L.* Inorganic binder for wood composites : feasibility and limitations // Wood adhesive symposium proceedings, May 16–18, 1990. Madison, WI. P. 169–176.
- Stark N. M., Cai Z., Carll C.* Wood-based composite materials: Panel products, glued-laminated timber, structural composite lumber, and wood-nonwood composite materials // Wood handbook: wood as an engineering material, USDA Forest Service, FPL; GTR-190. 2010. P. 11.1–11.28.
- Statistics collected on the autoclaved aerated concrete market // NAAG : [website]. URL: <https://gazo-beton.org/> (accessed 20.03.2025).
- The influence of wood sugars on the strength characteristics of wood-cement compositions / *A. V. Pryanichnikova, S. N. Dolmatov, V. P. Strizhnev, M. Z. Sharonova* // Young scientists in solving urgent scientific problems : Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists, Krasnoyarsk, April 25–26, 2019. Krasnoyarsk : Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev”, 2019. P. 115–117. (In Russ.)
- Van Elten G. J.* Innovation in the production of cement-bonded particleboard and wood-wool cement board // 5th Int. Inorganic Bonded Wood and Fiber Comp. Mat. Conf. Spokane, Washington, USA, 1996.

Информация об авторах

С. Н. Долматов – кандидат технических наук, доцент;
Н. В. Смертин – аспирант.

Information about the authors

S. N. Dolmatov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;
N. V. Smertin – postgraduate student.

Статья поступила в редакцию 19.04.2025; принята к публикации 24.05.2025.

The article was submitted 19.04.2025; accepted for publication 24.05.2025.
