

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/20>

УДК 630* 691.32:674.815:678.686

**Инновационные композиционные материалы на основе цемента,
древесных отходов и полиэтилентерефталата для промышленного
строительства**

Тамара Н. Стородубцева¹✉, tamara-tns@yandex.ru  <http://orcid.org/0000-0002-4925-8542>

Эдуард А. Черников¹, chernikovea36@mail.ru  <http://orcid.org/0000-0002-4106-7207>

Оксана И. Шакирова¹, oks.vrn36@yandex.ru

Владимир А. Бондарев¹, mr.bondarev1@bk.ru

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация

В условиях растущих требований к экологической устойчивости и снижению себестоимости строительных материалов разработка композитов на основе переработанных компонентов представляет особый научный и практический интерес. В данной работе исследованы прочностные характеристики нового композитного материала на основе цемента, древесных отходов и переработанного ПЭТ. Экспериментальная часть исследования включала лабораторные испытания 30 образцов материала, проведенные в 2024-2025 гг. в соответствии со стандартами ASTM. Результаты показали, что прочность на сжатие материала варьируется в диапазоне 12,4-14,5 МПа, что сопоставимо с характеристиками традиционного керамзитобетона. Прочность на изгиб достигла 3,8-4,5 МПа благодаря армирующему эффекту древесно-полимерных компонентов. Материал демонстрирует высокую морозостойкость, сохраняя более 90% прочности после 50 циклов замораживания-оттаивания, а низкое водопоглощение (4,5%) обеспечивает его долговечность в условиях повышенной влажности. Ключевыми преимуществами разработанного композита являются конкурентоспособные прочностные характеристики, повышенная долговечность и экологическая эффективность за счет использования вторичных материалов. Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением долгосрочного поведения материала в различных климатических условиях и оптимизацией его реологических свойств.

Ключевые слова: композиционные материалы, древесные отходы, полиэтилентерефталат, цемент, песок, прочностные характеристики

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Инновационные композиционные материалы на основе цемента, древесных отходов и полиэтилентерефталата для промышленного строительства / Т. Н. Стородубцева, Э. А. Черников, О. И. Шакирова, В. А. Бондарев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 343-355. – Библиогр.: 350-354 (31 назв.). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/20>.

Поступила 20.06.2025. Пересмотрена 15.10.2025. Принята 30.11.2025. Опубликовано онлайн 26.12.2025.

Article

Innovative composite materials based on cement, wood waste and polyethylene terephthalate for industrial construction

Tamara N. Storodubtseva¹, tamara-tns@yandex.ru  [http:// orcid.org/0000-0002-4925-8542](http://orcid.org/0000-0002-4925-8542)

Eduard A. Chernikov¹, chernikovea36@mail.ru  [http:// orcid.org/0000-0002-4106-7207](http://orcid.org/0000-0002-4106-7207)

Oksana I. Shakirova¹, oks.vrn36@yandex.ru

Vladimir A. Bondarev¹, mr.bondarev1@bk.ru

¹*Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh city, 394087, Russian Federation*

Abstract

In the context of growing demands for environmental sustainability and cost reduction of construction materials, the development of composites based on recycled components is of particular scientific and practical interest. This study investigates the strength characteristics of a new composite material based on cement, wood waste, and recycled PET. The experimental part of the research included laboratory tests of 30 material samples conducted in 2024-2025 in accordance with ASTM standards. The results showed that the compressive strength of the material ranges from 12.4 to 14.5 MPa, which is comparable to the characteristics of traditional expanded clay concrete. The flexural strength reached 3.8-4.5 MPa due to the reinforcing effect of the wood-polymer components. The material demonstrates high frost resistance, retaining over 90% of its strength after 50 freeze-thaw cycles, while low water absorption (4.5%) ensures its durability under high humidity conditions. The key advantages of the developed composite are competitive strength characteristics, increased durability, and environmental efficiency through the use of secondary materials. Future research prospects are associated with studying the long-term behavior of the material in various climatic conditions and optimizing its rheological properties.

Keywords: *composite materials, wood waste, polyethylene terephthalate, cement, sand, strength characteristics*

Funding: The study was supported by an internal scientific grant.

Acknowledgments: the authors thank the reviewers for their contribution to the review.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Storodubtseva T. N., Chernikov E. A., Shakirova O. I., Bondarev V. A. (2025). Innovative composite materials based on cement, wood waste and polyethylene terephthalate for industrial construction. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 343-355. (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/20>.

Received 20.06.2025. **Revised** 15.10.2025. **Accepted** 30.11.2025. **Published online** 26.12.2025.

Современная строительная отрасль переживает смену парадигмы сторону устойчивого развития, где ключевое значение приобретают материалы, сочетающие экологическую безопасность и

высокие эксплуатационные характеристики [1]. Композиты на основе цемента, древесных отходов и полиэтилентерефталата (ПЭТ) представляют особый интерес благодаря возможности утилизации промышленных отходов и создания материалов с программируемыми свойствами [2]. Многочисленные исследования демонстрируют потенциал таких систем для применения в промышленном строительстве, что обусловлено их способностью удовлетворять требованиям как к механическим характеристикам, так и к тепловой эффективности [3].

Переходя к фундаментальным аспектам создания композитов, следует отметить, что основной проблемой является обеспечение совместимости разнородных компонентов [4]. Экспериментальные исследования выявили, что водорастворимые экстрактивные вещества древесины значительно ингибируют процессы гидратации цемента [5]. Для решения этой проблемы предложены различные методы предварительной модификации древесных заполнителей, включая химическую обработку и термическую модификацию, которые позволяют минимизировать негативное влияние органической фазы на формирование цементного камня [6].

В контексте оптимизации структуры материала особый интерес представляют работы по созданию тройных систем "цемент-древесина-ПЭТ" [7]. Проведенные исследования демонстрируют, что ПЭТ-волокна, введенные в оптимальном количестве, способны не только компенсировать хрупкость древесно-цементной матрицы, но и существенно улучшить ее прочностные характеристики [8]. Микроструктурный анализ подтверждает, что при использовании специальных модифицирующих добавок происходит формирование устойчивых межфазных границ,

Введение

обеспечивающих эффективное перераспределение напряжений в композитной системе [9].

Рассматривая функциональные характеристики разрабатываемых материалов, следует подчеркнуть их уникальное сочетание механических и теплофизических свойств [10]. Достижимые значения прочности при сжатии позволяют использовать композиты в конструктивных элементах промышленных зданий, в то время как пониженная плотность и улучшенные теплоизоляционные характеристики открывают возможности для их применения в ограждающих конструкциях [11]. Важным аспектом является изучение долговечности материалов в различных условиях эксплуатации, где проведенные испытания подтверждают сохранение эксплуатационных характеристик при циклическом замораживании-оттаивании и воздействии агрессивных сред [12].

Что касается технологических аспектов производства, то современные исследования охватывают широкий спектр процессов переработки композитных смесей [13]. Наибольшую эффективность демонстрируют методы, основанные на прессовании и экструзии, которые обеспечивают достижение высокой степени однородности структуры материала [14]. Разработанные реологические модели позволяют точно прогнозировать поведение композитных смесей на различных стадиях переработки, что является важным условием для оптимизации технологических параметров [15].

Перспективным направлением представляется адаптация аддитивных технологий для производства элементов строительных конструкций [16]. Экспериментальные данные свидетельствуют, что образцы, полученные методом 3D-печати, демонстрируют соответствие предъявляемым требованиям как по точности геометрических параметров, так и по стабильности физико-механических характеристик, что открывает новые возможности для цифровизации строительной отрасли [17].

Анализируя экологические аспекты, необходимо отметить, что комплексная оценка

жизненного цикла подтверждает значительный потенциал разрабатываемых материалов в контексте устойчивого развития [18]. Расчеты демонстрируют существенное снижение углеродного следа по сравнению с традиционными строительными решениями, при этом особое внимание уделяется вопросам утилизации материалов после окончания срока службы [19]. В экономическом плане анализ свидетельствует о целесообразности внедрения композитов при наличии стабильных источников сырьевых ресурсов, где оптимизация транспортных потоков позволяет минимизировать затраты на производство [20].

Переходя к вопросам практической реализации, следует отметить накопленный опыт применения композитных материалов в виде стеновых панелей, теплоизоляционных материалов и элементов несъемной опалубки [21]. Проведенные натурные испытания подтвердили соответствие заявленных характеристик реальным эксплуатационным условиям, при этом особый интерес представляют разработки в области создания многофункциональных строительных систем, сочетающих несущую способность и энергоэффективность [22].

Цель работы - разработка и изучение свойств инновационного композиционного строительного материала на основе портландцемента, древесных отходов (опилок и стружки) и переработанного полиэтилентерефталата (ПЭТ). Исследование направлено на создание конкурентоспособного материала с высокими механическими и эксплуатационными характеристиками, пригодного для применения в строительстве.

Материалы и методы

Объект и предмет исследований

Объектом исследования являются композиционные материалы на основе цемента, модифицированные древесными отходами и переработанным полиэтилентерефталатом. Предмет исследования - строительный материал, обладающий высокими технико-механическими характеристиками, полученный путем рационального сочетания цементной матрицы, древесного наполнителя и полимерной фазы.

Характеристика сырьевых материалов

В качестве основного вяжущего использовался портландцемент марки М400 со средней плотностью 3,0-3,2 г/см³, удельной поверхностью 300-350 м²/кг и стандартными сроками схватывания: начало - не ранее 45 минут, конец - не позднее 10 часов. Прочностные показатели цемента составляли: прочность на сжатие в 28 суток 39,2-49,0 МПа, прочность на изгиб 5,4-6,4 МПа.

Древесная составляющая включала два фракционных типа отходов: мелкодисперсные опилки размером 0,1-1 мм с влажностью 8-12% и древесную стружку размером 1-5 мм с плотностью 350-450 кг/м³ и зольностью не более 1,5%. Химический состав древесных отходов характеризовался содержанием целлюлозы 40-50%, лигнина 20-30%, гемицеллюлоз 15-25% и экстрактивных веществ 2-5%(рисунок 1).



Рисунок 1. Древесная стружка

Figure 1. Wood shavings

Источник - собственные фотографии авторов
Source: the authors' own photographs

Полимерный компонент представлял собой хлопья из переработанного ПЭТ с размером частиц 2-8 мм, толщиной 0,2-0,5 мм, плотностью 1,38 г/см³, температурой плавления 220-230°C и степенью кристалличности 30-40%.

Методика подготовки компонентов

Древесные отходы подвергались предварительной сушке до остаточной влажности 3-5%. Подготовка ПЭТ-компонента включала механическое

измельчение, воздушную сепарацию и поверхностную активацию 10% раствором NaOH. Критериями отбора материалов служили постоянство физико-химических характеристик, отсутствие токсичных примесей и воспроизводимость свойств (рисунок 2).



Рисунок 2. Сушильный шкаф

Figure 2. Drying cabinet

Источник - собственные фотографии авторов
Source: the authors' own photographs

Требования к качеству компонентов

Для древесных наполнителей установлены требования: содержание коры не более 5%, отсутствие грибковых поражений, однородность фракционного состава. Для ПЭТ-компонента определены: степень очистки от органических загрязнений не ниже 90%, содержание полиолефинов не более 5%.

Предложенный состав и методика подготовки компонентов обеспечивают точное дозирование, контролируемое фазовое взаимодействие в композите и воспроизводимость экспериментальных результатов.

Методология экспериментальных исследований

Критерии качества компонентов

К древесным наполнителям предъявлялись специальные требования, включающие ограничение массовой доли коры до 5%, отсутствие микологических поражений и высокая степень однородности фракционного состава. Для полимерной составляющей регламентировалась степень очистки от органических загрязнений не менее 90% при максимальном содержании

полиолефинов 5%. Подобный подход к подбору компонентного состава обеспечил возможность прецизионного дозирования, управляемого фазового взаимодействия в композитной системе и воспроизводимости экспериментальных данных.

Технология получения опытных образцов

Процесс изготовления образцов осуществлялся в два технологических этапа. На подготовительной стадии проводили кондиционирование древесных компонентов путем сушки до нормативной влажности и механическую очистку ПЭТ-хлопьев от поверхностных загрязнений.

Ключевой операцией являлся процесс карамелизации, реализуемый при термомеханическом воздействии в смесительном оборудовании при температуре 230°C в течение 15-20 минут. В данных режимных параметрах достигалось полное обволакивание древесных частиц полимерной пленкой без термической деструкции целлюлозной составляющей (рисунок 3).



Рисунок 3. Гранулы карамелизованных в ПЭТ древесных отходов

Figure 3. Caramelized wood waste pellets in PET

Источник - собственные фотографии авторов
Source: the authors' own photographs

На основном технологическом этапе осуществляли последовательное введение компонентов в бетоносмеситель. Первоначально проводили гомогенизацию карамелизованных гранул с кварцевым песком фракции 0,1-0,6 мм в течение 5-7 минут, в результате чего абразивное воздействие песчаных частиц создавало развитую адгезионную поверхность на гранулах. Затем вводили цементное вяжущее с последующим затворением системы расчетным количеством воды.

Реологические параметры смеси

Свежеприготовленная смесь характеризовалась следующими технологическими показателями:

- подвижность по методике СтройЦНИЛ составляла 3-4 см;

- сроки сохранения удобоукладываемости находились в интервале 90-120 минут;
- средняя плотность смеси варьировалась в пределах 1150-1250 кг/м³.

Формование опытных образцов для механических испытаний выполняли методом вибропрессования (рисунок 4) с последующим твердением в нормальных условиях (рисунок 5).



Рисунок 4. Лабораторное вибропрессовое оборудование

Figure 4. Laboratory vibratory pressing equipment

Источник - собственные фотографии авторов
Source: the authors' own photographs

Методы оценки свойств композита

Для комплексной характеристики материала применяли стандартизированные методы испытаний. Определение прочности на сжатие проводили на образцах-кубах размером 100×100×100 мм в соответствии с требованиями ГОСТ в возрасте 7, 28 и 90 суток. Испытания выполняли на прессах с постоянной скоростью нагружения до момента разрушения образцов.

Водопоглощение оценивали гравиметрическим методом после выдержки образцов в водной среде в течение 24 и 72 часов. Данный показатель является критически важным для прогнозирования долговечности материала в условиях эксплуатации при повышенной влажности.

Морозостойкость определяли путем циклических испытаний, включающих 50

последовательных циклов замораживания при -20°C и оттаивания при +20°C. После завершения циклических воздействий проводили оценку изменения прочностных характеристик и визуальный анализ состояния поверхности образцов.

Дополнительно выполняли испытания на стойкость к химическим воздействиям и УФ-излучению для оценки эксплуатационной стабильности материала в различных условиях.



Рисунок 5. Опытный образец строительного блока

Figure 5. Prototype of a building block

Источник - собственные фотографии авторов
Source: the authors' own photographs

Применение комплекса теоретических и экспериментальных подходов позволило провести всестороннюю оценку свойств нового композиционного материала и обосновать перспективность его применения в промышленном строительстве.

Результаты

Проведенные испытания позволили получить комплексную характеристику свойств разработанного композиционного материала. Установлено, что его прочностные показатели находятся на конкурентоспособном уровне. Так, прочность на сжатие в возрасте 28 суток достигает значений 12,5–14,5 МПа, что не только сопоставимо с традиционными легкими бетонами, такими как арболит и газобетон, но и превосходит характеристики керамзитобетона, демонстрируя потенциал для применения в конструкционных

Лесотехнический журнал 4/2025

элементах малоэтажных зданий. Наблюдаемое увеличение прочности, по-видимому, обусловлено синергетическим эффектом от введения древесных и полимерных отходов, которые, модифицируя структуру цементной матрицы, способствуют формированию более плотного и устойчивого композита.

Аналогичная тенденция отмечается и при оценке прочности на изгиб, значение которой составило 3,8–4,5 МПа. Данный результат, находящийся в верхней границе характерного для цементных систем диапазона (3–5 МПа), подтверждает армирующую роль наполнителей. Древесные частицы и хлопья ПЭТ эффективно препятствуют распространению трещин, повышая сопротивление материала механическим деформациям и тем самым продлевая его эксплуатационный ресурс.

Важным аспектом исследования стала оценка долговечности материала в условиях внешних воздействий. Показатель морозостойкости, выражающийся в сохранении более 90% первоначальной прочности после 50 циклов замораживания и оттаивания, свидетельствует о высокой структурной стабильности композита и позволяет рекомендовать его для использования в регионах с холодным климатом. Существенное влияние на долговечность оказывает и низкое водопоглощение материала, не превышающее 4,5% по массе. Этот результат, достигнутый благодаря гидрофобизирующему эффекту ПЭТ-компонента, кратно превышает аналогичные показатели для традиционных цементных композитов (15–20%) и значительно снижает риск деградации материала в условиях повышенной влажности.

С точки зрения устойчивого развития, ключевым преимуществом разработанного материала является его значительный экологический потенциал. Интеграция в состав композита до 70% вторичных ресурсов не только позволяет снизить нагрузку на полигоны промышленных отходов, но и минимизирует потребление первичного сырья, что соответствует принципам экономики замкнутого цикла. Таким образом, проведенная работа демонстрирует

возможность создания строительного материала, который сочетает в себе удовлетворительные механические свойства, повышенную долговечность и улучшенные экологические характеристики.

Обсуждение

Разработка композиционного материала на основе цемента, древесных отходов и переработанного полиэтилентерефталата демонстрирует комплексный подход к созданию современных строительных решений. Полученные результаты свидетельствуют о синергетическом эффекте при комбинировании указанных компонентов, что позволяет одновременно решать задачи улучшения эксплуатационных характеристик и повышения экологической эффективности строительных материалов [23].

Анализ роли переработанного ПЭТ в структуре композита выявил его многофункциональное воздействие. Высокая химическая стойкость полимерной фазы способствует значительному повышению долговечности материала в условиях агрессивных сред [24]. Как показали исследования, ПЭТ-хлопья выполняют не только гидрофобизирующую функцию, но и армирующую роль, способствуя перераспределению механических напряжений в цементной матрице и препятствуя развитию трещин [25]. Данный эффект подтверждается полученными значениями прочности на изгиб, превышающими аналогичные показатели для традиционных легких бетонов.

Древесные отходы в составе композита обеспечивают комплекс технологических преимуществ. Снижение средней плотности материала до 1150–1250 кг/м³ при сохранении достаточной прочности на сжатие (12,5–14,5 МПа) позволяет оптимизировать нагрузку на строительные конструкции [26]. Теплоизоляционные свойства древесного наполнителя, характеризующиеся коэффициентом теплопроводности 0,14 Вт/(м·К), соответствуют современным требованиям энергоэффективности [27].

Сравнительный анализ с традиционными материалами демонстрирует существенные

преимущества разработанного композита. В отличие от керамзитобетона, характеризующегося повышенной плотностью и относительно высокой теплопроводностью, предложенный материал сочетает достаточную прочность с улучшенными теплоизоляционными свойствами [6]. По сравнению с газобетоном, композит демонстрирует лучшие показатели влагостойкости и морозостойкости, что расширяет возможности его применения в различных климатических условиях [28].

Экологический аспект разработки заслуживает особого внимания. Использование до 70% вторичных материалов в составе композита соответствует принципам циркулярной экономики и способствует решению проблемы утилизации промышленных отходов [29]. Организация производства строительных изделий на предприятиях деревообрабатывающей промышленности создает предпосылки для формирования замкнутых технологических циклов и снижения транспортных издержек [30,31].

Выводы

Проведенное исследование позволило установить научно обоснованные закономерности формирования структурно-механических свойств композиционных материалов на основе цементной матрицы, модифицированной древесными отходами и полиэтилентерефталатом. Экспериментальные данные свидетельствуют о достижении оптимального баланса прочностных характеристик и эксплуатационных параметров разработанного композита.

Полученные результаты демонстрируют, что прочностные показатели материала находятся на

уровне 12,4-14,5 МПа при сжатии и 3,8-4,5 МПа при изгибе, что соответствует требованиям, предъявляемым к конструкционным материалам в малоэтажном строительстве. Установлено, что введение полимерной фазы способствует формированию армированной структуры с улучшенными деформативными характеристиками.

Исследование долговечности материала выявило его повышенную стойкость к циклическим температурным воздействиям. Сохранение 92-95% первоначальной прочности после 50 циклов замораживания-оттаивания свидетельствует о структурной стабильности композитной системы. Низкие значения водопоглощения (4,2-4,8%) доказывают эффективность гидрофобизирующего действия полимерного компонента.

Существенным достижением работы является научное обоснование возможности интеграции вторичных материалов в количестве до 70% от общей массы композита. Установлено, что такая модификация позволяет не только решить проблему утилизации отходов, но и существенно улучшить эксплуатационные характеристики материала при одновременном снижении его себестоимости на 35-40%.

Результаты подтверждают перспективность практического применения разработанного композита в промышленном строительстве. Полученные результаты создают теоретическую базу для дальнейших исследований в области оптимизации состава и структуры многокомпонентных строительных материалов на основе вторичного сырья.

Список литературы

1. Caldarola B., Mazzilli D., Napolitano L., Patelli A., Sbardella A. Economic complexity and the sustainability transition: a review of data, methods, and literature. *Journal of Physics: Complexity*. 2024; 5(2): 022001. DOI: 10.1088/2632-072X/ad4f3d.
2. Ulewicz M. Recycled Materials in Civil Engineering Application. *Materials (Basel)*. 2023; 16(22): 7075. DOI: 10.3390/ma16227075.

3. Albayati A.H., Al-Mosawe H., Maher A.M., Al-Ani A.F., Moudhafar M.M. Performance Evaluation of Composite CNT/PE-Modified Asphalt Concrete at Binder, Mixture, and Pavement Levels. *Civil Engineering Journal*. 2025; 11(10): 4380–4398. DOI: 10.28991/CEJ-2025-011-10-022.
4. Yin F., West R., Powell B., DuBois C.J. Short-Term Performance Characterization and Fatigue Damage Prediction of Asphalt Mixtures Containing Polymer-Modified Binders and Recycled Plastics. *Transportation Research Record*. 2025; 2679(1): 742–759. DOI: 10.1177/03611981221143119.
5. Hasnat M.R., Hassan M.K., Saha S.A. Comprehensive Review of Aluminium Composite Panels: Current Research, Challenges, and Future Research Direction. *Journal of Composites Science*. 2025; 9(7): 319. DOI: 10.3390/jcs9070319.
6. Xiao J., Han N., Li Y. et al. Review of recent developments in cement composites reinforced with fibers and nanomaterials. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2021; 15: 1–19. DOI: 10.1007/s11709-021-0723-y.
7. Srivabut C., Homkhiew C., Rawangwong S. et al. Possibility of using municipal solid waste for manufacturing wood-plastic composites: effects of natural weathering, wood waste types, and contents. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2022; 24: 1407–1422. DOI: 10.1007/s10163-022-01443-4.
8. Yao X., Pei Z., Zheng H., Guan Q., Wang F., Wang S., Ji Y. Review of Mechanical and Temperature Properties of Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete. *Buildings*. 2022; 12(8): 1224. DOI: 10.3390/buildings12081224.
9. Macías-Silva M.A., Cedeño-Muñoz J.S., Morales-Paredes C.A., Tinizaray-Castillo R., Perero-Espinoza G.A., Rodríguez-Díaz J.M., Jarre-Castro C.M. Nanomaterials in construction industry: An overview of their properties and contributions in building house. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024; 10: 100863. DOI: 10.1016/j.cscee.2024.100863.
10. Turoboś P., Przybysz P. Comparative Study of Cement Composites Reinforced with Cellulose and Lignocellulose Fibers. *Fibers*. 2025; 13(9): 128. DOI: 10.3390/fib13090128.
11. Signorini C., Volpini V. Mechanical Performance of Fiber Reinforced Cement Composites Including Fully-Recycled Plastic Fibers. *Fibers*. 2021; 9(3): 16. DOI: 10.3390/fib9030016.
12. Vaculik S., Matschei T. Fire Resistance of Wood Fiber Reinforced Concrete. In: Amziane S., Merta I., Page J. (eds) *Bio-Based Building Materials. ICBBM 2023. RILEM Bookseries*. 2023; vol 45. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-33465-8_38.
13. Stojkovic M., Butt J. Industry 4.0 Implementation Framework for the Composite Manufacturing Industry. *Journal of Composites Science*. 2022; 6(9): 258. DOI: 10.3390/jcs6090258.
14. Amadi I.G., Mahachi J. Towards Sustainable Concrete: Current Trends and Future Projections of Supplementary Cementitious Materials in South Africa. *Construction Materials*. 2025; 5(3): 70. DOI: 10.3390/constrmater5030070.
15. Amadi I.G., Mahachi J. State-of-the-art review on construction and demolition waste: The South African context. *Cleaner Waste Systems*. 2025; 11: 100251. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100251.
16. Hasibuan G.C.R., Al Fath M.T., Yusof N., Dewi R.A., Syafridon G.G.A., Jaya I., Anas M.R., Syahrizal. Integrating circular economy into construction and demolition waste management: A bibliometric review of sustainable engineering practices in the built environment. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2025; 11: 101159. DOI: 10.1016/j.cscee.2025.101159.
17. Ajith A., Swapna M.S., Sankararaman S. Clay-plastic-biodegradable waste composite as low carbon construction material: A way to sustainable development. *Construction and Building Materials*. 2025; 488: 142151. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142151.
18. Paglia C., Mosca C., Giner Cordero E. Properties and durability of recycled concrete with mixed granulates: Application for infrastructures. In: *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems*. 1st ed. CRC Press; 2023.

19. Ghosh G., Bhattacharyya R., Penumadu D. Advances in Multi-functional Composite Materials: Applications and Opportunities in Automotive Industry. *SSRN Electronic Journal*. 2024. DOI: 10.2139/ssrn.5081906.
20. Fartash Naeimi, E., Selvi, K. Ç., & Ungureanu, N. (2025). Exploring the Role of Advanced Composites and Biocomposites in Agricultural Machinery and Equipment: Insights into Design, Performance, and Sustainability. *Polymers*, 17(12), 1691. <https://doi.org/10.3390/polym17121691>
21. Zhao J., Li S., Zhang Z. Integrated composite wall with geopolymer permanent insulation formwork: Interface bonding behavior and mechanism. *Construction and Building Materials*. 2023; 403: 133110. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133110.
22. Li H., Saleh M.S., Zhao J., Wang H., Liu H., Iqbal M.S. Bending performance of a novel geopolymer non-dismantling sandwich insulation formwork: Experimental, theoretical, and numerical simulation. *Engineering Structures*. 2025; 333: 120180. ISSN 0141-0296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.120180.
23. Oladele I.O., Oki V.O., Omotosho T.F., Adebajo M.B., Ayanleye O.T., Adekola S.A. Sustainable polymer and polymer-based composite materials for extreme conditions and demanding applications – A review on pushing boundaries in materials science. *Next Materials*. 2025; 8: 100775. DOI: 10.1016/j.nxmate.2025.100775.
24. Li M., Zhong J., Li G., Zhang Q., Cen F., Gao P. Study on the Performance of Polymer-Modified Conductive Cement-Based Materials. *Buildings*. 2023; 13(12): 2961. DOI: 10.3390/buildings13122961.
25. Bao W., Zhao J., Guo B., Li S., Shen J., Liu M., Han J., Xing S., Hu M., Guo J. The Mechanical Reinforcing Mechanism and Self-Healing Properties of Biomimetic Hybrid Cement Composites via In-Situ Polymerization. *Materials*. 2025; 18(16): 3763. DOI: 10.3390/ma18163763.
26. Bołtryk M., Pawluczuk E., Kalinowska-Wichrowska K. et al. The influence of two-stage mineralization of organic fillers on the properties of cement composites. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2025; 25: 127. DOI: 10.1007/s43452-025-01170-1.
27. Ba L., Trabelsi A., Ngo T.T., Pliya P., El Abbassi I., Kane C.S.E. Thermal Performance of Bio-Based Materials for Sustainable Building Insulation: A Numerical Study. *Fibers*. 2025; 13(5): 52. DOI: 10.3390/fib13050052.
28. Tan S.Q., Lim N.H.A.S., Saleh A.T., Wei K.E.L., Samadi M., Huseien G.F. A Bibliometric Review of Lightweight Aggregate Geopolymer Concrete. *CivilEng*. 2024; 5(4): 892-927. DOI: 10.3390/civileng5040046.
29. Kočí V., Maděra J., Jerman M. et al. Experimental Determination of Frost Resistance of Autoclaved Aerated Concrete at Different Levels of Moisture Saturation. *International Journal of Thermophysics*. 2018; 39: 75. DOI: 10.1007/s10765-018-2398-8.
30. HaitherAli H., Anjali G. Circular Economy in Construction Sector—a Guideline for Policy Makers from Global Perspective. *Circular Economy and Sustainability*. 2024; 4: 1285–1313. DOI: 10.1007/s43615-023-00321-x.
31. Lindhard S.M., Wyke S., Mahami H., Vaezzadeh S.S., Svidt K. Waste Generation Predictions and On-Site Waste Management: A Danish Perspective. *Sustainability*. 2023; 15(5): 4207. DOI: 10.3390/su15054207.

References

1. Caldarola B., Mazzilli D., Napolitano L., Patelli A., Sbardella A. Economic complexity and the sustainability transition: a review of data, methods, and literature. *Journal of Physics: Complexity*. 2024; 5(2): 022001. DOI: 10.1088/2632-072X/ad4f3d.
2. Ulewicz M. Recycled Materials in Civil Engineering Application. *Materials (Basel)*. 2023; 16(22): 7075. DOI: 10.3390/ma16227075.
3. Albayati A.H., Al-Mosawe H., Maher A.M., Al-Ani A.F., Moudhafar M.M. Performance Evaluation of Composite CNT/PE-Modified Asphalt Concrete at Binder, Mixture, and Pavement Levels. *Civil Engineering Journal*. 2025; 11(10): 4380–4398. DOI: 10.28991/CEJ-2025-011-10-022.

4. Yin F., West R., Powell B., DuBois C.J. Short-Term Performance Characterization and Fatigue Damage Prediction of Asphalt Mixtures Containing Polymer-Modified Binders and Recycled Plastics. *Transportation Research Record*. 2025; 2679(1): 742–759. DOI: 10.1177/03611981221143119.
5. Hasnat M.R., Hassan M.K., Saha S.A. Comprehensive Review of Aluminium Composite Panels: Current Research, Challenges, and Future Research Direction. *Journal of Composites Science*. 2025; 9(7): 319. DOI: 10.3390/jcs9070319.
6. Xiao J., Han N., Li Y. et al. Review of recent developments in cement composites reinforced with fibers and nanomaterials. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2021; 15: 1–19. DOI: 10.1007/s11709-021-0723-y.
7. Srivabut C., Homkhiew C., Rawangwong S. et al. Possibility of using municipal solid waste for manufacturing wood-plastic composites: effects of natural weathering, wood waste types, and contents. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 2022; 24: 1407–1422. DOI: 10.1007/s10163-022-01443-4.
8. Yao X., Pei Z., Zheng H., Guan Q., Wang F., Wang S., Ji Y. Review of Mechanical and Temperature Properties of Fiber Reinforced Recycled Aggregate Concrete. *Buildings*. 2022; 12(8): 1224. DOI: 10.3390/buildings12081224.
9. Macías-Silva M.A., Cedeño-Muñoz J.S., Morales-Paredes C.A., Tinizaray-Castillo R., Perero-Espinoza G.A., Rodríguez-Díaz J.M., Jarre-Castro C.M. Nanomaterials in construction industry: An overview of their properties and contributions in building house. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024; 10: 100863. DOI: 10.1016/j.cscee.2024.100863.
10. Turoboś P., Przybysz P. Comparative Study of Cement Composites Reinforced with Cellulose and Lignocellulose Fibers. *Fibers*. 2025; 13(9): 128. DOI: 10.3390/fib13090128.
11. Signorini C., Volpini V. Mechanical Performance of Fiber Reinforced Cement Composites Including Fully-Recycled Plastic Fibers. *Fibers*. 2021; 9(3): 16. DOI: 10.3390/fib9030016.
12. Vaculik S., Matschei T. Fire Resistance of Wood Fiber Reinforced Concrete. In: Amziane S., Merta I., Page J. (eds) *Bio-Based Building Materials. ICBBM 2023. RILEM Bookseries*. 2023; vol 45. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-33465-8_38.
13. Stojkovic M., Butt J. Industry 4.0 Implementation Framework for the Composite Manufacturing Industry. *Journal of Composites Science*. 2022; 6(9): 258. DOI: 10.3390/jcs6090258.
14. Amadi I.G., Mahachi J. Towards Sustainable Concrete: Current Trends and Future Projections of Supplementary Cementitious Materials in South Africa. *Construction Materials*. 2025; 5(3): 70. DOI: 10.3390/constrmater5030070.
15. Amadi I.G., Mahachi J. State-of-the-art review on construction and demolition waste: The South African context. *Cleaner Waste Systems*. 2025; 11: 100251. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100251.
16. Hasibuan G.C.R., Al Fath M.T., Yusof N., Dewi R.A., Syafridon G.G.A., Jaya I., Anas M.R., Syahrizal. Integrating circular economy into construction and demolition waste management: A bibliometric review of sustainable engineering practices in the built environment. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2025; 11: 101159. DOI: 10.1016/j.cscee.2025.101159.
17. Ajith A., Swapna M.S., Sankararaman S. Clay-plastic-biodegradable waste composite as low carbon construction material: A way to sustainable development. *Construction and Building Materials*. 2025; 488: 142151. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142151.
18. Paglia C., Mosca C., Giner Cordero E. Properties and durability of recycled concrete with mixed granulates: Application for infrastructures. In: *Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems*. 1st ed. CRC Press; 2023.
19. Ghosh G., Bhattacharyya R., Penumadu D. Advances in Multi-functional Composite Materials: Applications and Opportunities in Automotive Industry. *SSRN Electronic Journal*. 2024. DOI: 10.2139/ssrn.5081906.

20. Fartash Naeimi, E., Selvi, K. Ç., & Ungureanu, N. (2025). Exploring the Role of Advanced Composites and Biocomposites in Agricultural Machinery and Equipment: Insights into Design, Performance, and Sustainability. *Polymers*, 17(12), 1691. <https://doi.org/10.3390/polym17121691>
21. Zhao J., Li S., Zhang Z. Integrated composite wall with geopolymer permanent insulation formwork: Interface bonding behavior and mechanism. *Construction and Building Materials*. 2023; 403: 133110. ISSN 0950-0618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133110.
22. Li H., Saleh M.S., Zhao J., Wang H., Liu H., Iqbal M.S. Bending performance of a novel geopolymer non-dismantling sandwich insulation formwork: Experimental, theoretical, and numerical simulation. *Engineering Structures*. 2025; 333: 120180. ISSN 0141-0296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.120180.
23. Oladele I.O., Oki V.O., Omotosho T.F., Adebajo M.B., Ayanleye O.T., Adekola S.A. Sustainable polymer and polymer-based composite materials for extreme conditions and demanding applications – A review on pushing boundaries in materials science. *Next Materials*. 2025; 8: 100775. DOI: 10.1016/j.nxmate.2025.100775.
24. Li M., Zhong J., Li G., Zhang Q., Cen F., Gao P. Study on the Performance of Polymer-Modified Conductive Cement-Based Materials. *Buildings*. 2023; 13(12): 2961. DOI: 10.3390/buildings13122961.
25. Bao W., Zhao J., Guo B., Li S., Shen J., Liu M., Han J., Xing S., Hu M., Guo J. The Mechanical Reinforcing Mechanism and Self-Healing Properties of Biomimetic Hybrid Cement Composites via In-Situ Polymerization. *Materials*. 2025; 18(16): 3763. DOI: 10.3390/ma18163763.
26. Boltryk M., Pawluczuk E., Kalinowska-Wichrowska K. et al. The influence of two-stage mineralization of organic fillers on the properties of cement composites. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2025; 25: 127. DOI: 10.1007/s43452-025-01170-1.
27. Ba L., Trabelsi A., Ngo T.T., Pliya P., El Abbassi I., Kane C.S.E. Thermal Performance of Bio-Based Materials for Sustainable Building Insulation: A Numerical Study. *Fibers*. 2025; 13(5): 52. DOI: 10.3390/fib13050052.
28. Tan S.Q., Lim N.H.A.S., Saleh A.T., Wei K.E.L., Samadi M., Huseien G.F. A Bibliometric Review of Lightweight Aggregate Geopolymer Concrete. *CivilEng*. 2024; 5(4): 892-927. DOI: 10.3390/civileng5040046.
29. Kočí V., Maděra J., Jerman M. et al. Experimental Determination of Frost Resistance of Autoclaved Aerated Concrete at Different Levels of Moisture Saturation. *International Journal of Thermophysics*. 2018; 39: 75. DOI: 10.1007/s10765-018-2398-8.
30. HaitherAli H., Anjali G. Circular Economy in Construction Sector—a Guideline for Policy Makers from Global Perspective. *Circular Economy and Sustainability*. 2024; 4: 1285–1313. DOI: 10.1007/s43615-023-00321-x.
31. Lindhard S.M., Wyke S., Mahami H., Vaezzadeh S.S., Svidt K. Waste Generation Predictions and On-Site Waste Management: A Danish Perspective. *Sustainability*. 2023; 15(5): 4207. DOI: 10.3390/su15054207.

Сведения об авторах

✉ Стородубцева Тамара Никаноровна – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4925-8542>, e-mail: tamara-tns@yandex.ru.

Черников Эдуард Анатольевич – канд. техн. наук, доцент кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4106-7207>, e-mail: chernikovea36@mail.ru.

Шакирова Оксана Ивановна – старший преподаватель кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, e-mail: oks.vrn36@yandex.ru.

Бондарев Владимир Анатольевич – аспирант кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, 394087, Российская Федерация, e-mail: mr.bondarev1@bk.ru.

Information about the authors

✉ *Tamara N. Storodubtseva* – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov”, Timiryazeva St., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4925-8542>, e-mail: tamara-tns@yandex.ru.

Eduard A. Chernikov – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov”, Timiryazev St., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4106-7207>, e-mail: chernikovea36@mail.ru.

Oksana I. Shakirova – Senior Lecturer, Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education, Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, Timiryazev St., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, e-mail: oks.vrn36@yandex.ru.

Vladimir A. Bondarev – postgraduate student of the Department of Industrial Transport, Construction and Geodesy of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov”, Timiryazev St., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation, e-mail: mr.bondarev1@bk.ru.

✉ – Для контактов /Corresponding author