

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES



УДК 621.928:728.1

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-96-103>

Устойчивое управление жизненным циклом: от лопастей ветрогенераторов до современных игровых комплексов



Н.С. Самарская  

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

 nat-samars@yandex.ru

EDN: OLPRDR

Аннотация

Введение. В современных условиях развития строительной отрасли концепция жизненного цикла строительных объектов охватывает не только этапы проектирования и эксплуатации, но и вопросы утилизации конструктивных элементов, в частности компонентов ветроэнергетических установок (далее — ВЭУ) со сроком службы 20–25 лет. Традиционные методы утилизации отработавших элементов ветрогенераторов демонстрируют низкую экологическую эффективность. В контексте циркулярной экономики возникает необходимость разработки инновационных решений для интеграции отработанных компонентов ВЭУ в строительную практику.

Целью исследования являлось научное обоснование возможности применения утилизированных лопастей ВЭУ в конструкциях детских игровых комплексов.

Материалы и методы. Исследование основано на методологии анализа жизненного цикла лопастей ветряных турбин с учетом специфики их обработки в строительной отрасли. В работе использовались следующие методы: систематический анализ характеристик лопастей ветряных турбин, статистическая оценка их жизненного цикла, сравнительный анализ технологий вторичной переработки и оценка безопасности конструкций, изготовленных из переработанных материалов.

Результаты исследования. В результате проведенного анализа и исследования разработана технология переработки лопастей в конструктивные элементы детского игрового комплекса.

Обсуждение и заключение. Полученные результаты подтверждают принципиальную возможность и практическую целесообразность использования утилизированных лопастей ВЭУ в качестве объектов строительства для создания безопасных и долговечных детских игровых комплексов. Разработанные технологические решения, учитывающие полный жизненный цикл материалов — от эксплуатации в составе ветроэнергетических установок до вторичного применения в строительных конструкциях, — позволяют трансформировать экологическую проблему утилизации в ресурс для развития городской инфраструктуры.

Ключевые слова: жизненный цикл, утилизация ветроэнергетических установок, строительство детских площадок, вторичное использование, строительный объект

Для цитирования. Самарская Н.С. Устойчивое управление жизненным циклом: от лопастей ветрогенераторов до современных игровых комплексов. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2026;5(1):96–103. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-96-103>

Original Empirical Research

Sustainable Lifecycle Management: From Wind Turbine Blades to Modern Playground Complexes

Natalya S. Samarskaya  

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 nat-samars@yandex.ru

Abstract

Introduction. In modern conditions of the construction industry development, the concept of the life cycle of construction facilities encompasses not only the design and operation stages, but also the disposal of structural elements, particularly

© Самарская Н.С., 2026

the components of wind turbines (hereinafter referred to as WT) with a service life of 20–25 years. Conventional methods of disposal of used elements of wind turbines display a low environmental efficiency. In the context of the circular economy, innovative solutions for integrating used WT components into construction practice are to be developed.

The aim of the study was to scientifically substantiate a possibility of using recycled wind turbine blades in the construction of children's playground complexes.

Materials and Methods. The study is based on a methodology for analyzing the life cycle of wind turbine blades, taking the specific features of their processing in the construction industry into consideration. The following methods were employed: a systematic analysis of the characteristics of wind turbine blades, a statistical assessment of their life cycle, a comparative analysis of recycling technologies and an assessment of the safety of structures made from recycled materials.

Research Results. As a result of the analysis and research conducted, a technology for processing blades into structural elements of a children's playground complex has been developed.

Discussion and Conclusion. The results confirm the fundamental possibility and practical expediency of employing recycled wind turbine blades as construction facilities in order to design safe and durable children's playground complexes. The developed technological solutions that take into consideration the full life cycle of materials – from operation as part of wind turbines to secondary use in building structures – enable transformation of the environmental problem of recycling into a resource for urban infrastructure development.

Keywords: life cycle, utilization of wind power plants, construction of playgrounds, secondary use, construction site

For citation. Samarskaya NS Sustainable Lifecycle Management: from Wind Turbine Blades to Modern Playground Complexes. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(1):96–103. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-96-103>

Введение. В современных условиях развития строительной отрасли наблюдается тенденция к комплексной реализации концепции жизненного цикла строительных объектов, включающей не только этапы проектирования и эксплуатации, но и вопросы утилизации конструктивных элементов. Особую актуальность приобретает проблема управления жизненным циклом компонентов возобновляемых источников энергии, в частности ветроэнергетических установок (далее — ВЭУ), физический срок службы которых достигает 20–25 лет [1].

Традиционные подходы к утилизации отработавших свой срок элементов ветрогенераторов, такие как захоронение на полигонах или термическая обработка, демонстрируют низкую экологическую эффективность и противоречат принципам устойчивого развития строительной отрасли. В контексте циркулярной экономики возникает необходимость разработки инновационных решений, позволяющих интегрировать отработанные компоненты ВЭУ в строительную практику.

Концепция жизненного цикла проекта (ЖЦП) выступает методологической основой для формирования эффективных стратегий управления строительными отходами. Особое внимание уделяется поиску оптимальных путей вторичного использования композитных материалов лопастей ветрогенераторов, обладающих высокими прочностными характеристиками и устойчивостью к внешним воздействиям.

Целью настоящего исследования является комплексное научное обоснование возможности применения утилизированных элементов ВЭУ, в частности лопастей, в качестве конструкционных элементов детских игровых комплексов. Данное направление исследований соответствует современным тенденциям развития строительной отрасли и способствует реализации принципов циклической экономики в градостроительной деятельности. Основой для развития научной идеи послужил архитектурный проект детской площадки в Роттердаме (рис. 1).

В отличие от единичных архитектурных проектов (рис. 1) представленная работа интегрирует комплексную систему управления всем жизненным циклом — от проекта и строительства ветрогенератора до критериев отбора лопастей на этапе демонтажа ВЭУ и оценки экономической целесообразности проекта вторичного использования конструктивных элементов ВЭУ.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач: анализ физико-механических характеристик материалов лопастей ВЭУ, исследование существующих методов их утилизации, разработку технологических решений по переработке и модификации композитных материалов, а также обоснование возможности их применения в конструкциях детских площадок с учетом требований безопасности и долговечности.



Рис. 1. Архитектурные решения детской площадки в Роттердаме, созданные с использованием лопастей ветрогенераторов

Материалы и методы. В основу исследования положен комплексный подход к анализу жизненного цикла лопастей ветроэнергетических установок. Методологической базой исследования выступает концепция управления жизненным циклом объектов строительства, адаптированная к специфике переработки компонентов ветрогенераторов. Для достижения поставленных целей были применены следующие методы исследования:

- системный анализ конструктивных особенностей и физико-механических характеристик лопастей ВЭУ;
- статистический анализ данных о сроках службы и объемах утилизации лопастей ветрогенераторов;
- сравнительный анализ существующих технологий переработки композитных материалов;
- экспертные оценки безопасности и долговечности конструкций из переработанных материалов.

Результаты исследования. Анализ данных многочисленных исследований композитных материалов, используемых в производстве лопастей ВЭУ (стекловолокно марки E-glass и эпоксидные смолы типа EPIKOTETM), позволяет сделать вывод об их выдающихся эксплуатационных характеристиках [1, 2]. Согласно исследованиям, проведенным коллективом авторов [3], предел прочности при изгибе данных материалов составляет 350–500 МПа, что действительно сопоставимо с характеристиками отдельных марок конструкционной стали.

Особый интерес представляют данные об устойчивости материалов к атмосферным воздействиям. Как показали климатические испытания, описанные в работе Ермакова Б.С. и др. [4], после 1000 циклов ускоренных испытаний снижение прочностных характеристик не превышало 5–7 %. Эти результаты подтверждаются и более поздними исследованиями [5].

Важное значение имеют выводы, сделанные группой исследователей [6] о сохранении лопастями до 80 % первоначальных механических свойств после 25 лет эксплуатации. Это создает научную основу для их вторичного использования в качестве несущих конструкций.

Относительно параметров обработки материалов оптимальный температурный режим резки, предотвращающий расслоение композитной структуры, составил 60–80 °С, что было установлено в ходе экспериментов, описанных в [7]. Требования к шлифовке краев (радиус скругления ≥ 3 мм), обеспечивающие безопасность для детей, обоснованы в работе коллектива авторов [8] на основе серии механических испытаний.

Полученные данные о физико-механических характеристиках композитных материалов лопастей ВЭУ имеют принципиальное значение для выбора оптимальных методов их утилизации. Как показывают исследования [3, 5], сохранение 80 % первоначальных свойств после 25 лет эксплуатации существенно расширяет возможности вторичного использования конструкционных элементов. Однако эффективность различных методов переработки существенно варьируется в зависимости от сохранности материала и требуемого качества конечного продукта.

На основании систематизации современных исследований [6, 7, 9] разработана классификация методов переработки лопастей ВЭУ, включающая три основных технологических направления (рис. 2).

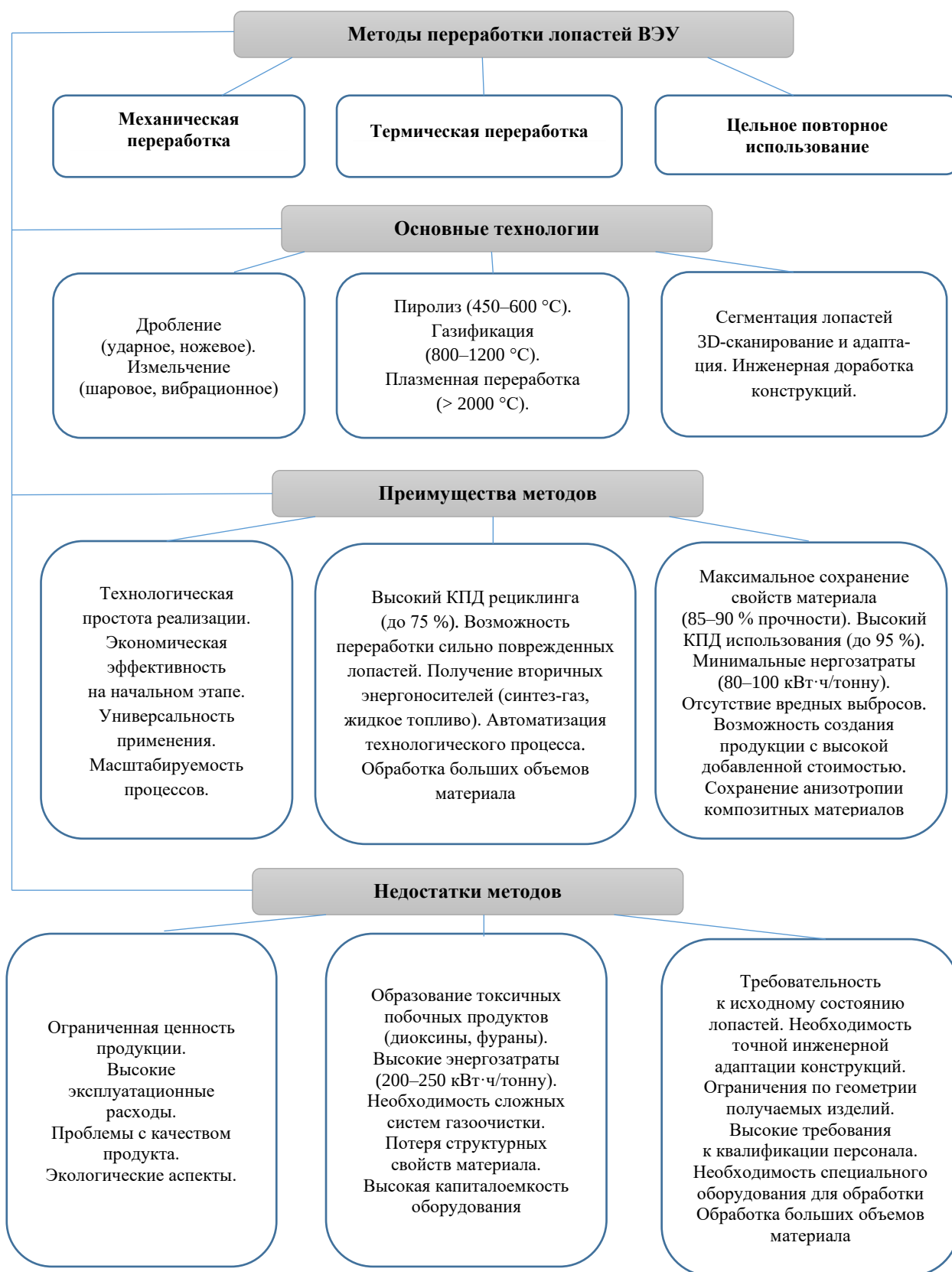


Рис. 2. Классификация методов переработки лопастей ВЭУ

Выполненный экономико-экологический анализ (таблица 1) выявил значительные преимущества цельной переработки.

Таблица 1

Сравнительные показатели методов утилизации

Критерий	Механическое дробление	Пиролиз	Цельная переработка
Удельные затраты, руб./т	9600–12000	16000–20000	6400–8000
Углеродный след, кг CO ₂ -экв./т	180–220	350–400	70–90
Срок окупаемости, лет	5–7	8–10	3–4
Уровень токсичности	Низкий	Высокий	Отсутствует

Как показывают расчеты, цельная переработка обеспечивает:

- снижение углеродного следа на 60 % по сравнению с пиролизом;
- уменьшение энергопотребления на 35–40 % относительно механического дробления;
- возможность получения продукции с добавленной стоимостью.

Ключевые технологические преимущества цельного повторного использования подтверждены исследованиями [10, 11]:

- сохранение анизотропных свойств материала;
- минимальные технологические отходы (< 5 %);
- возможность создания замкнутого цикла использования композитов.

Перспективность данного направления особенно очевидна при анализе жизненного цикла продуктов переработки, где цельные конструкции демонстрируют в 2,5–3 раза лучшие экологические показатели по сравнению с альтернативными методами утилизации [12].

На основании комплексного анализа существующих методов утилизации разработана инновационная трех-этапная технологическая цепочка подготовки лопастей для повторного использования в детских игровых комплексах, включающая 4 основных этапа: демонтаж, подготовка, обработка и контроль качества.

Специализированная технология демонтажа лопастей ВЭУ предполагает следующие процессы:

- лазерное сканирование конструкции для определения оптимальных точек реза;
- применение алмазно-канатных пил с водяным охлаждением;
- использование вакуумных подъемников грузоподъемностью до 20 т;
- транспортировку в амортизирующих контейнерах с системой климат-контроля, датчиками вибрации, GPS-мониторингом.

При этом важным является обеспечение минимизации механических повреждений демонтированных конструкций и соблюдение норм безопасности при работе с крупногабаритными объектами.

Для оценки возможности повторного применения лопастей ветрогенераторов в строительстве детских площадок и других объектов предложена система из 12 ключевых критериев, объединенных в 4 категории (таблица 2).

Следующий этап подготовки представляет собой многоступенчатую систему технологических процессов и включает:

- механическую очистку: абразивоструйная обработка (давление 2–3 атм);
- химическую обработку: биоразлагаемые моющие составы (pH 7,5–8,5), нейтральные растворители;
- антисептическую обработку.
- Контроль качества очистки можно проводить методами электронной микроскопии, инфракрасной спектроскопии, контактной углометрии.

Этап механической подготовки элементов демонтированных лопастей является важным этапом предлагаемой технологии для дальнейшего использования в строительстве детского игрового комплекса. Адаптация геометрии под новые задачи выполняется посредством прецизионной резки, которой удаляют поврежденные участки, оптимизируют размеры под целевые конструкции, создают монтажные стыковочные узлы.

Также этап механической обработки позволяет обеспечить безопасность будущей конструкции. Как правило, это предполагает обработку кромок (скругление, полировку, нанесение защитных фасок) и создание технологи-

ческих отверстий для крепежных систем. Например, для детской горки из лопасти требуется вырезка центрального сегмента (длина 6 м), формирование бортовых упор высотой до 30 см, создание контролируемо скользящей поверхности для безопасного спуска шероховатостью 3,2–6,3 мкм, обработка зон крепления к фундаменту.

Таблица 2

Критерии пригодности лопастей ВЭУ для вторичного использования

Категория	Параметр	Требования	Метод оценки
1. Структурно-механические характеристики	Остаточная прочность на изгиб	≥ 60 % от исходной (~ 300 МПа)	Испытания на трехточечный изгиб по ASTM D790
	Отсутствие критических повреждений	Трещины > 5 мм, расслоения > 10 % площади	Ультразвуковая дефектоскопия
	Состояние композитной матрицы	Влажность < 1 %, отсутствие деградации смолы	Термогравиметрический анализ (TGA)
2. Геометрические и эксплуатационные параметры	Сохранявшаяся длина сегментов	≥ 3 м для несущих элементов	Визуальный осмотр
	Радиус кривизны	1–5 м для арочных конструкций	Геометрические измерения
	Толщина стенки	Однородность ± 15 % от номинала	Измерительные приборы
3. Экологическая и химическая безопасность	Отсутствие токсичных выделений	Летучие органические соединения < 0,1 мг/м ³	Газовая хроматография
	Устойчивость к УФ-излучению	Потеря прочности < 5 % после 1000 ч теста	УФ-тестирование
	Коррозионная стойкость металлических включений	Присутствие коррозии не допускается	Визуальный осмотр, коррозионные тесты
4. Экономико-технологические критерии	Энергозатраты на обработку	< 100 кВт·ч/тонну	Энергетический анализ
	Совместимость с методами соединения	Клеевые / механические крепления	Технологическая оценка
	Локализация повреждений	≤ 30 % площади требует ремонта	Визуальный осмотр, измерения

Таким образом, разработанная технологическая цепочка позволяет:

- обеспечить полный цикл переработки лопастей ВЭУ;
- сохранить до 95 % исходных свойств материала;
- создавать безопасные и долговечные игровые комплексы;
- сократить затраты на утилизацию на 40–45 %.

Обсуждение и заключение. Проведенные исследования подтверждают, что утилизированные лопасти ветроэнергетических установок могут успешно применяться в строительстве детских игровых комплексов, обеспечивая необходимый уровень безопасности и долговечности. Разработанные технологические решения учитывают полный жизненный цикл материалов: от их эксплуатации в составе ВЭУ до вторичного использования в

строительных конструкциях. Такой подход позволяет не только решить экологическую проблему утилизации композитных отходов, но и создать дополнительный ресурс для развития городской инфраструктуры.

Ключевым аспектом является анализ жизненного цикла подобных конструкций, который демонстрирует их экономическую и экологическую эффективность на всех этапах: от проектирования и монтажа до эксплуатации и возможной повторной переработки. Внедрение данной технологии в практику строительства детских площадок способствует формированию устойчивой городской среды, отвечающей принципам циркулярной экономики.

Для дальнейшего совершенствования метода вторичного использования лопастей ВЭУ можно предложить исследовать следующие направления:

- автоматизация процессов демонтажа — внедрение современных технологий разборки и сортировки лопастей для снижения трудозатрат и повышения эффективности;
- роботизированные комплексы обработки — применение автоматизированных систем для резки, шлифовки и подготовки композитных сегментов, что повысит точность и безопасность работ;
- разработка «умных» покрытий — создание многофункциональных материалов с возможностью самодиагностики повреждений, что увеличит срок службы конструкций и снизит затраты на обслуживание.

Реализация этих мер позволит не только расширить сферу применения переработанных лопастей ВЭУ, но и повысить экономическую привлекательность технологии, способствуя ее массовому внедрению в строительную отрасль.

Список литературы

1. Animasaun AB, Adeniran AO, Udorah FN, & Oluyemi IA. Optimization of wind turbine performance through advanced materials and design. *Optimality*. 2025;2(1):1–15. <https://doi.org/10.22105/opt.v2i1.69>
2. Lagos F, et al. Recent Advances in the Analysis of Functional and Structural Polymer Composites for Wind Turbines. *Polymers* 17.17. 2025;2339. <https://doi.org/10.3390/polym17172339>
3. Шатчиленбе В.Л., Фролов В.Я., Иванов Д.В., Ланцев Д.Ю., Таджикибаев А.И., Погорелов А.В. Имитационное моделирование параллельной работы ветрогенерирующих установок. *Вестник Ивановского государственного энергетического университета* 2025;4:66–75 <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2025.4.066-075>
- Satchilembe VL, et al. Simulation Modeling of Parallel Operation of Wind Power Plants. *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*. 2025;4:66–75 (In Russ.) <https://doi.org/10.17588/2072-2672.2025.4.066-075>
4. Ермаков Б.С. и др. Влияние водоотталкивающего покрытия на работоспособность конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях экстремально низких температур. *Горная промышленность*. 2024;S5:198–203. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-198-203>
- Ermakov BS, et al. The Influence of Water-Repellent Coating on the Performance of Structures Made of Polymer Composite Materials in Conditions of Extremely Low Temperatures. *Russian Mining Industry*. 2024;5S:198–203. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-5S-198-203>
5. Cherkashina NI, Pavlenko ZV, Domarev SN, Ruchiy AY, Solgalov VV Creation of a Composite Material Based on Plant-Based Components. *Nanotechnologies in Construction*. 2024;16(1):67–76. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2024-16-1-67-76>
6. Li L, et al. Collaborative Disposal of Exhaust Gas and Waste Wind Turbine Blades: Mechanical Properties of Recycled Glass Fibres and Economic Analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2024;471:143351. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143351>
7. Chen Jie, et al. Transition of material removal mechanism in cutting of unidirectional SiCf/SiC composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2024;133:391–408. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-13761-y>
8. Zhang Y, et al. Environmental and Economic Assessment of Mechanical Recycling of End-of-Life Wind Turbine Blades into Rebars and Comparison with Conventional Disposal Routes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2025;190:108711. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.108711>
9. Самарская Н.С., Парамонова О.Н., Лысова Е.П., Чистякова В.Д. Разработка модели жизненного цикла для ветроэнергетической установки. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2022;4:25–31. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-25-31>
- Samarskaya NS, Paramonova ON, Lysova EP, Chistyakova VD Development of a Life Cycle Model for a Wind Turbine. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2022;4:25–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-25-31>
10. Oh Eunyoung, et al. Sustainable green composite materials in the next-generation mobility industry: review and prospective. *Advanced Composite Materials* 2024;33:1368–1419. <https://doi.org/10.1080/09243046.2024.2348237>
11. Türker, Yasemin Sümeyye, Fahrettin Öztürk, and Yahya Öz. Review of recycling methods of thermoplastic composite materials. *Polymer-Plastics Technology and Materials* 2024;63.12:1693–1713. <https://doi.org/10.1080/25740881.2024.2352148>

12. Riuttala Mari, et al. How building component reuse creates economic value—Identifying value capture determinants from a case study. Journal of Cleaner Production 2024;443:141112. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141112>

Об авторе:

Самарская Наталья Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения, климатической и альтернативных энергоустановок Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [ScopusID](#), [ORCID](#), nat-samars@yandex.ru

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the Author:

Natalya S. Samarskaya, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Climate Engineering and Alternative Power Plants of the Don State Technical University (Don State Technical University, 1 Gagarin Square, Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [ScopusID](#), [ORCID](#), nat-samars@yandex.ru

Conflict of interest statement: the author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 10.11.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 19.01.2025

Принята к публикации / Accepted 03.02.2026