

НАУКИ О ЗЕМЛЕ И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

EARTH AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

Научная статья

УДК 332.1 339.9 533.6; 522.7

DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-4-8-16

Эффективность использования отходов деревообработки в региональной системе теплоснабжения Забайкальского края

Андрей Геннадьевич Батухтин¹, Ксения Александровна Демченко²,
Максим Станиславович Басс³, Алена Эдуардовна Носкова⁴

^{1,2,3,4}Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

¹batuhina_ir@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3798-3675>

²kse_nehka@mail.ru

³bms77@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3151-6857>

⁴wang_007@mail.ru

Актуальность использования возобновляемых источников энергии определяется задачами устойчивого развития. Объект исследования – отходы деревообработки в топливном балансе региональной системы теплоснабжения Забайкальского края. Предмет исследования – процесс плазменной инициации горения композитных топливных смесей на основе отходов деревообработки и низкосортных бурых углей, а также его технико-экономическая эффективность. Цель исследования – технико-экономическое обоснование использования смеси отходов деревообработки и отходов сортировки низкосортных бурых углей Забайкальского края в региональной системе теплоснабжения. Задачи исследования: технико-экономическое обоснование использования композитных топливных смесей в региональной системе теплоснабжения, экспериментальное изучение процесса их плазменного воспламенения и горения. Технологическим ядром, обеспечивающим возможность использования данных смесей, выступают плазменно-топливные системы. Обоснование эффективности технологии определяется значительной бюджетной эффективностью использования отходов деревообработки в рамках концепции «зелёной» экономики. Для обоснования технической осуществимости плазменной инициации процесса горения смеси отходов деревообработки и низкосортных бурых углей проведены экспериментальные исследования, которые показали эффективность и техническую осуществимость данной разработки. Согласно результатам исследования, переориентация на внутренний рынок сбыта со смещением внимания на производство топлива для современных систем теплообеспечения представляет собой не просто вынужденную меру, а стратегический переход к концепции «зелёной» индустриализации лесного хозяйства. Приведённый подход объединяет несколько преимуществ, в частности интегрируется в действующую энергоинфраструктуру, формирует внутри региона полный цикл добавленной стоимости и предлагает реалистичный, масштабируемый и экологичный вектор развития на горизонте нескольких лет. Исследование доказало техническую осуществимость и эффективность использования плазменно-топливных систем для сжигания композитных смесей из отходов деревообработки и бурых углей. Перспективы дальнейших работ связаны с разработкой дорожной карты внедрения технологии и масштабированием результатов на уровне региональной энергетической системы.

Ключевые слова: плазменно-топливная система, плазма, отходы деревообработки, сжигание, плазмотрон, бурый уголь, концепции «зелёной» экономики, внутренний рынок сбыта, устойчивое развитие, теплоснабжение

Финансирование: работа выполнена и подготовлена в рамках реализации государственного задания Министерства науки и высшего образования (соглашение № 075-03-2023-028/1 от 05.10.2023 г., регистрационный номер в ЕГИСУ НИОКР 10230222000-2-2.7.3), тема № 123102000012-2 «Комплексное исследование аэродинамических характеристик плазменных систем термохимической подготовки топлива».

© Батухтин А. Г., Демченко К. А., Басс М. С., Носкова А. Э., 2025

Для цитирования

Батухтин А. Г., Демченко К. А., Басс М. С., Носкова А. Э. Эффективность использования отходов деревообработки в региональной системе теплоснабжения Забайкальского края // Вестник Забайкальского государственного университета. 2025. Т. 31, № 4. С. 8–16. DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-4-8-16

Original article**The Effectiveness of Using Wood Processing Waste
in the Regional Heating System of the Transbaikal Territory**

Andrey G. Batukhtin¹, Kseniya A. Demchenko², Maxim S. Bass³, Alyona E. Noskova⁴

^{1,2,3,4}Transbaikal State University, Chita, Russia

¹batuhtina_ir@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3798-3675>,

²kse_nehka@mail.ru

³bms77@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3151-6857>

⁴wang_007@mail.ru

The relevance of using renewable energy sources is determined by the objectives of sustainable development. The object of research is woodworking waste in the fuel balance of the regional heat supply system of the Transbaikal Territory. The subject of the study is the process of plasma initiation of composite fuel mixtures combustion based on woodworking waste and low-grade brown coals, as well as its technical and economic efficiency. The purpose of the presented study is a feasibility study on the use of a woodworking waste mixture and waste from sorting low-grade brown coals of the Transbaikal Territory in the regional heat supply system. The tasks of the study include conducting a feasibility study on the use of composite fuel mixtures in a regional heat supply system, and an experimental study of their plasma ignition and burning. The technological core that provides the possibility of using these mixtures is plasma fuel systems. The rationale for the technology effectiveness is determined by the significant budgetary efficiency of woodworking waste use within the framework of the «green» economy concept. Experimental studies have been conducted to substantiate the technical feasibility of plasma initiation of the combustion process of woodworking waste mixture and low-grade brown coals. The conducted research has shown the effectiveness and technical feasibility of this development. According to the results of the study, it is shown that the reorientation to the domestic sales market with a shift in attention to fuel production for modern heat supply systems is not just a necessary measure, but a strategic transition to the concept of «green» industrialization of forestry. This approach combines several advantages: it integrates into the existing energy infrastructure, forms a complete value-added cycle within the region and offers a realistic, scalable and environmentally friendly development vector over the horizon of several years. Conclusions and prospects are as follows: the conducted research has proved the technical feasibility and effectiveness of plasma fuel systems use for burning composite mixtures from woodworking waste and brown coal. The prospects for further work are related to the development of a roadmap for technology implementation and scaling the results at the regional energy system level.

Keywords: plasma fuel system, plasma, woodworking waste, incineration, plasma torch, brown coal, concepts of “green” economy, domestic market, sustainable development, heat supply

Funding: the work was carried out and prepared as part of the implementation of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education (agreement No. 075-03-2023-028/1 dated 05.10.2023, registration number in the EGISU NIOKTR 10230222000-2-2.7.3), topic No. 123102000012-2 “Comprehensive Study of the Aerodynamic Characteristics of Plasma Systems for Thermochemical Fuel Preparation”.

For citation

Batukhtin A. G., Demchenko K. A., Bass M. S., Noskova A. E. The effectiveness of using wood processing waste in the regional heating system of the Transbaikal Territory // Transbaikal State University Journal. 2025. Vol. 31, no. 4. P. 8–16. DOI: 10.21209/2227-9245-2025-31-4-8-16

Введение. Санкционные ограничения, введённые в 2022 г., стали структурным шагом для целого ряда отраслей российской экономики, включая лесной сектор. Наиболее серьёзные последствия проявились в регионах с высокой степенью интеграции в международные товарные цепочки, поскольку их предприятия оказались крайне уязвимыми к резкому разрыву внешнеэкономических связей. География сбыта до 2022 г. носила

устойчивый регионально-дифференцированный характер: Республика Коми преимущественно ориентировалась на южные рынки Европы, тогда как Архангельская область и Республика Карелия – на североевропейские направления, а регионы Сибири и Дальнего Востока – на Китай, Японию и Южную Корею. В результате ограничения доступа к западным рынкам и ухода крупных европейских собственников лесоперерабатывающих

предприятий в регионе произошёл системный сбой каналов реализации и управленческой инфраструктуры.

Актуальность исследования. Согласно официальной статистике по Северо-Западному федеральному округу, в 2023 г. выпуск в лесозаготовке и деревообработке снизился на 25–30 % относительно 2022 г., что указывает на масштабный сдвиг равновесия отрасли в сторону недоиспользования мощностей¹. Лесная отрасль Дальнего Востока пострадала меньше, поскольку на протяжении многих лет она оставалась ориентированной на рынки сбыта Азиатско-Тихоокеанского региона. Тем не менее предприятия лесной промышленности в Дальневосточном федеральном округе сталкиваются с необходимостью сокращения экспорта в ряде традиционных направлений, таких как Япония и Южная Корея. Значительные препятствия для развития лесопромышленного комплекса Забайкальского края составляют логистические и инфраструктурные ограничения, нехватка крупных перерабатывающих предприятий. Решением проблем в сложившейся ситуации может стать переориентация на внутренние рынки сбыта.

Объект исследования – отходы деревообработки в топливном балансе региональной системы теплоснабжения Забайкальского края.

Предмет исследования – процесс плазменной инициации горения композитных топливных смесей на основе отходов деревообработки и низкосортных бурых углей, а также его технико-экономическая эффективность.

Цель исследования – технико-экономическое обоснование использования смеси отходов деревообработки и отходов сортировки низкосортных бурых углей Забайкальского края в региональной системе теплоснабжения с применением системы плазменно-топливного сжижания.

Задачи исследования: проведение технико-экономического обоснования использования композитных топливных смесей в региональной системе теплоснабжения, экспериментальное изучение процесса их плазменного воспламенения и горения.

Системные исследования [1] предлагают модель развития лесопромышленного комплекса Забайкальского края, основанную на принципах ресурсной эффективности и «зелёного» роста. Стратегия предполагает пе-

реход от экспорта сырья к созданию внутреннего рынка продуктов глубокой переработки, ключевым сегментом которого станет современное биотопливо для современных систем теплообеспечения. В центре подхода – вовлечение лесных отходов и местных бурых углей в технологические цепочки и опора на плазменно-топливные решения термохимической подготовки топлива. Соответственно, достигается тройной положительный эффект: экологический (сокращение углеродного следа и объёмов захоронения отходов), экономический (рост добавленной стоимости и налогов), социальный (обеспечение энергостойчивости региона и создание высокотехнологичных рабочих мест).

Базовая мотивация переориентации вытекает из ограничений экспортно-сырьевой модели восточных приграничных регионов. Сырьевая модель экспортного, основанная на вывозе древесины первичной обработки, приводит к системным проблемам, в частности такая продукция обладает низкой добавленной стоимостью в регионе, что способствует возврату налога на добавленную стоимость (далее – НДС) и создаёт риски вследствие зависимости от конъюнктуры внешних рынков. В результате, несмотря на высокие объёмы лесозаготовки и экспорта, бюджетная эффективность каждого кубометра вырубленного леса оказывается крайне низкой, а зачастую и отрицательной. Следовательно, модель «лес – экспорт полуфабрикатов» исчерпала себя, а единственный путь – переход к глубокой переработке для внутреннего рынка, что позволит перенаправить финансовые потоки в пользу регионального бюджета и населения.

Ориентация на внутренний рынок сбыта позволит выстроить более длинную и устойчивую цепочку создания стоимости. В отличие от экспорта сырья, в этом случае налоги и заработка платят распределяются по всей производственной цепочке – от заготовки топлива до эксплуатации котельных. При этом такие сегменты, как сбор биотоплива, его логистика и сервисное обслуживание, становятся естественной сферой для малого и среднего бизнеса, особенно в лесных регионах.

Ключевым преимуществом является и инфраструктурная совместимость: существующая в регионе система теплоснабжения, основанная на угольных котельных, может быть модернизирована без радикальной перестройки. Технологии термохимической, в том числе плазменной, подготовки топлива позволяют перейти на использование местных трудноутилизируемых ресурсов – отхо-

¹ Деревообрабатывающие предприятия Северо-Запада сократили производство на 25–30 %. – Текст: электронный // Газета «Ведомости Северо-Запад». – URL: <https://clck.ru/3Qwsoa> (дата обращения: 15.10.2025).

дов деревообработки и низкосортных бурых углей. В связи с этим разработка и обоснованию методов сжигания композитных топлив на основе отходов древесины и угля уделяется пристальное внимание в контексте устойчивого развития [2]. Данное направление не только решает экономические задачи, но и вносит вклад в снижение экологической нагрузки, обеспечивая замкнутый цикл использования ресурсов.

Технологическим ядром трансформации могли бы выступить плазменно-топливные системы, задача которых – интенсифицировать воспламенение и ранние стадии горения низкосортных углей и биомассы, повысить реакционную способность и полноту догорания, снизить выбросы монооксида углерода и недожога, стабилизировать пылеугольное горение, что на практике реализуется через плазменный розжиг и стабилизацию факела в существующих котлах, плазменно-вспомогательную сушку и деструкцию биомассы перед помолом, плазменную газификацию мелкодисперсных смесей для низкоэмиссионного горения. Такой подход нивелирует пониженную теплоту сгорания и высокую влажность местных углей и лесных отходов, даёт гибкость состава топлива и облегчает соблюдение экологических нормативов. Данная технология имеет высокую степень проработки как в России [3–7], так и в ближнем [8–10], дальнем зарубежье [11; 12]. Использование плазменных технологий розжига на теплоэлектроцентралях перспективно для повышения эффективности их работы, экологической безопасности, обусловленной

уменьшением вредных выбросов и более полным сгоранием угля, в том числе высокозольного, а также для снижения затрат на топливо в энергетических системах.

Обзор литературы. Согласно одному из исследований [13], в Байкальском регионе, который включает Иркутскую область, Республику Бурятия и Забайкальский край, суммарно в год создаётся 19 млн м³ древесных отходов, что в пересчёте на условное топливо составляет 5,6 млн т. Приведённые цифры говорят о перспективности направления переработки древесных отходов в биотопливо, т. к. исходный материал уже имеется в достаточном количестве. Отходы деревообработки не только могут, но и должны быть утилизированы, чтобы избежать экологических и экономических последствий, таких как лесные пожары, загрязнение поверхностных и подземных вод, захламление территорий, штрафы за мусор и плата за выбросы. Важно понимать, что утилизация данного вида отходов положительно скажется на экономике региона за счёт открытия предприятий, занимающихся переработкой древесных отходов в биотопливо [Там же].

Методология и методы исследования. Для обоснования технической осуществимости плазменной инициации процесса горения смеси отходов деревообработки и низкосортных бурых углей проведены экспериментальные исследования (рис. 1). Дозирование смеси топлив и оценка производительности тягодутьевых устройств осуществлялись с учётом поддержания концентрации топливной смеси 0,6 кг/кг и скорости потока 7 м/с.

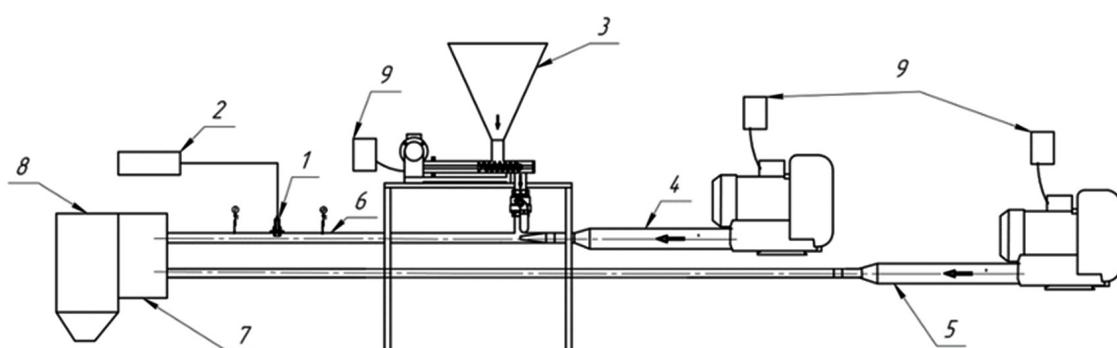


Рис. 1. Лабораторная установка: 1 – плазмотрон; 2 – система электропитания плазмотрона; 3 – бункер угля с системой дозирования подачи пылевидного топлива; 4 – система подачи первичного воздуха; 5 – система подачи вторичного воздуха; 6 – контрольно-измерительные системы; 7 – камера термической химической переработки твёрдых топлив; 8 – циклонная камера; 9 – частотные приводы / **Fig. 1.** Laboratory installation: 1 – plasma torch; 2 – plasma torch power supply system; 3 – oal bunker with a pulverized fuel metering system; 4 – primary air supply system; 5 – secondary air supply system; 6 – control and measuring systems; 7 – chamber of thermal chemical processing of solid fuels; 8 – cyclone chamber; 9 – frequency drives

В рамках теоретического исследования процесса воспламенения и термохимической подготовки смесей топлив в муфеле применялась программная система «Плазма – уголь» [14–16], модернизированная на основе оригинальной методики учёта смешения потоков [17; 18]. Указанная программа реализует полуэмпирическую математическую модель, описывающую термохимическую подготовку, воспламенение и горение твёрдого топлива. Её использование на предэкспериментальной стадии (априорно) позволяет посредством численного моделирования определить:

- пространственные распределения скоростей и температур;
- концентрационные поля продуктов реакций;
- удельные энергозатраты;
- требуемую мощность и состав комплекса плазмотронов;
- протяжённость реакционной зоны;
- оптимальное время нахождения угольных частиц в муфеле, а также иные значимые параметры процессов.

Программный комплекс допускает расчёты для разнообразных видов твёрдого топлива и обеспечивает получение исходных данных для проектирования:

- угольно-плазменных горелок, используемых при растопке котлов;
- устройств подсветки пылеугольного факела без применения мазута;
- плазменных газификаторов;
- прочих установок для термообработки топлив.

Результаты исследования. Теоретическое исследование показало устойчивый процесс воспламенения в широком диапазоне смесей топлив.

Экспериментальные исследования, проводимые на стенде, представленном на рис. 1, доказали возможность плазменной инициации процесса горения смеси отходов деревообработки и низкосортных бурых углей. Фотография процесса воспламенения, выполненная высокоскоростной камерой EVERCAM с экспозицией 1/32000 с, представлена на рис. 2.

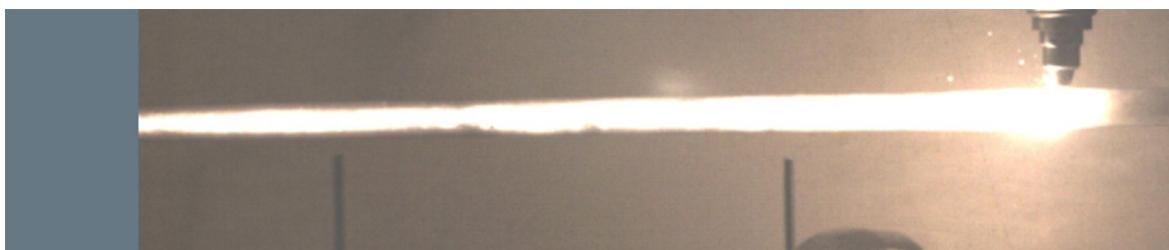


Рис. 2. Фотография процесса воспламенения / Fig. 2. Photo of the ignition process

Обсуждение. Сыревая база позволяет вовлекать как производственные, так и лесосечные остатки (кору, опилки, щепу, тонкомер, порубочные остатки), а бурые угли выполняют роль основы, повышая теплотворность и воспроизводимость свойств смесей, оптимизируя зольность и температуру размягчения золы под конкретные топки. Линейка продуктов охватывает гранулы и брикеты (включая агломераты), подготовленные пылевидные смеси «бурый уголь + биомасса» для камерных и факельных горелок с повышенной реакционной способностью после плазменной активации, а также синтез-газ и углеродсодержащие восстановители/сорбенты как побочную продукцию плазмохимии. Вовлечение трудных фракций, повышение полноты дегорения, снижение монооксида углерода/оксидов азота/твёрдых частиц и высокая топливная гибкость плазменных горелок особенно важны для удалённых котельных региона.

Ожидаемые результаты выражаются в измеримых показателях, таких как рост налоговых поступлений и увеличение фонда оплаты труда на единицу сырья, снижение выбросов твёрдых частиц, монооксида углерода/оксидов азота, увеличение доли биогенного углерода в топливном балансе котельных, сдвиг структуры выручки лесопромышленного комплекса в сторону внутренних продаж и топливных продуктов, повышение отказоустойчивости теплоснабжения в зимние пикги, формирование компетенций в области плазмохимии топлива и автоматизированного горения.

Политико-институциональная реализация включает: перенастройку мер поддержки на проекты, создающие внутренние топливные цепочки «отходы → топливо → тепло» с ключевым показателем эффективности (Key Performance Indicator, далее – KPI) по налоговой отдаче и экологическим эффектам,

стимулирование спроса со стороны жилищно-коммунального хозяйства и социальных объектов, компенсацию части капитальных затрат на плазменно-топливные модули, тарифную модель с включением платы за утилизацию древесных отходов при достижении экологических КПИ, использование механизмов государственно-частного партнёрства и концессий для интеграции подготовки топлива и модернизации горелок, формирование стандартов качества смесей, методик расчёта выбросов и коэффициента полезного действия.

Практическая дорожная карта предполагает аудит сырьевой базы и пилотные проекты на нескольких котельных с различными типами топок, индустриализацию через модульные линии подготовки топлива у лесо-переработчиков и модернизацию котельных, в частности плазменных воспламенителей и активаторов, автоматизацию дозирования, контроль выбросов, масштабирование за счёт кластеров подготовки топлива и локализации сервисной базы. Такая конфигурация, дополняемая долгосрочными контрактами и стандартизацией качества, снижает сбытовые и технологические риски.

Экономический аспект. Переориентация лесопромышленного комплекса Забайкальского края с экспорта сырой древесины на внутреннее производство композитного топлива на основе отходов деревообработки и местных бурых углей представляет собой экономически обоснованную модель, способную существенно повысить бюджетную эффективность региона и устойчивость его энергетики.

Ключевым драйвером экономической целесообразности является замена дорогостоящего импортозависимого мазута, используемого для растопки и стабилизации горения на угольных котельных и теплоэлектростанциях. Как показано в технико-экономическом обосновании для Харанорской ГРЭС, внедрение безмазутных технологий, в частности плазменного розжига, обеспечивает прямую экономию. Для одного котла ТПЕ-216 чистая годовая экономия от отказа от мазута оценивается в 15,7 млн р. при сроке окупаемости капитальных вложений около 1,2 года. Данный эффект достигается за счет замещения мазута (39,8 тыс. р./т в 2025 г.) местным углем (1,8 тыс. р./т) и дополнительными затратами на электроэнергию для работы плазмотронов.

В масштабах региональной системы теплоснабжения, включающей множество ко-

тельных, экономический эффект многократно возрастает. Предлагаемая модель создаёт новую протяжённую цепочку создания стоимости внутри региона.

1. Сбор и переработка отходов: формирование рынка для древесных отходов (коры, опилок, щепы), которые ранее являлись убыточным балластом.

2. Производство топлива: создание производств по изготовлению гранул, брикетов или подготовке пылевидных смесей «уголь + биомасса». Данный сегмент имеет высокую добавленную стоимость и создаёт новые рабочие места.

3. Логистика и сервис: развитие услуг по транспортировке, хранению и обслуживанию топливных систем, что является естественной нишей для малого и среднего бизнеса.

4. Генерация тепла и энергии: снижение операционных расходов котельных за счёт использования дешёвого местного топлива и повышение их надёжности.

Бюджетная эффективность модели подтверждается расчётом. Существующая экспортно-сырьевая модель обеспечивает поступления в региональный бюджет, которые в среднем составляют лишь 16,95 р./м³ заготовленной древесины. Внедрение внутреннего топливного цикла позволит дополнительно аккумулировать налоговые поступления (НДС, налог на прибыль, налог на имущество) на каждом этапе новой цепочки, а также сократить расходы на утилизацию отходов, что приведёт к значительному росту сводных показателей, характеризующих общие поступления в региональный бюджет с учётом переработки отходов.

Экономика проекта усиливается за счёт синергии с модернизацией энергооборудования. Использование плазменно-топливных систем, обеспечивающих эффективное сжигание низкосортных смесей, не требует радикальной перестройки действующих котельных, минимизируя капитальные затраты и простой. Модульность и поэтапность внедрения снижают инвестиционные риски.

Таким образом, экономика предложений базируется на трёх столпах:

1) прямая экономия от замещения импортного мазута;

2) создание новой добавленной стоимости внутри региона через глубокую переработку местных ресурсов;

3) рост бюджетных поступлений за счёт расширения налоговой базы и перераспределения финансовых потоков с внешних на внутренние.

Реализация приведённой модели не только обеспечит энергетическую устойчивость Забайкальского края, но и станет драйвером его экономического развития в рамках стратегии «зелёной» индустриализации.

Выводы. Переориентация на внутренний рынок сбыта со смещением внимания на производство топлива для современных систем теплообеспечения представляет собой не просто вынужденную меру, а стратегический переход к концепции «зелёной» инду-

стриализации лесного хозяйства. Ключом к этому служат технологии термохимической и плазменной переработки, позволяющие создавать топливо из отходов лесозаготовки и местных бурых углей. Приведённый подход обладает следующими преимуществами: интегрируется в действующую энергоинфраструктуру, формирует внутри региона полный цикл добавленной стоимости, предлагает реалистичный, масштабируемый и экологичный вектор развития на горизонте нескольких лет.

Список литературы

1. Яковлева К. А. Социально-экономическая эффективность лесопользования в приграничных регионах России // Вестник Забайкальского государственного университета. 2016. Т. 22, № 11. С. 151–160. DOI: 10.21209/2227-9245-2016-22-11-151-160. EDN: XTBQLJ
2. Кузнецов А. В., Ломовский И. О., Бутаков Е. Б. Композитное порошковое топливо из углей различной степени метаморфизма и отходов деревообрабатывающих производств // Наука и технологии Сибири. 2024. № 4. С. 88–91. EDN: JGOISD
3. Butakov E. B., Burdukov A. P., Alekseenko S. V., Yaganov E. N. Plasma ignition system to start up pulverized coal boilers: experimental simulation and full-scale test // Journal of Engineering Thermophysics. 2022. Vol. 31. P. 375–383. DOI: 10.1134/S1810232822030018. EDN: FTVXHK
4. Sosin D. V., Shtegman A. V., Ryzhiy I., Fomenko E. A., Bor S. D., Tsyrenov C. O., Yakovenko A. V. Increasing the Efficiency and Increasing the Resource of the Plasma-Ignition System by Its Modernization at Gusinoozerskaya TPP // Thermal Engineering. 2021. Vol. 68, no. 4. P. 302–309. DOI: 10.1134/S0040601521040078. EDN: YKCSTH
5. Лаврищев О. А., Устименко А. Б. Плазменно-топливные системы и принципы их функционирования // Горение и плазмохимия. 2022. Т. 20, № 1. С. 51–62. DOI: 10.18321/cpc481. EDN: OMXMAO
6. Batukhtin A. G., Makhov E. A., Bass M. S., Batukhtin S. G. Enhancing aerodynamic efficiency in solid fuel plasma preparation for power plants // International Journal on “Technical and Physical Problems of Engineering” (IJTPE). 2023. Vol. 15, no. 4. P. 351–361.
7. Zhukov M. F., Peregudov V. S. Plasma technology for pulverized-coal boiler firing // Thermal Engineering. 1996. Vol. 43, no. 12. P. 1025–1028. EDN: MRMAWV
8. Messerle V. E., Orynbasar M. N., Ustimenko A. B. Simulation and experiment of plasma ignition of low-grade coal // Горение и плазмохимия. 2024. Vol. 22. P. 27–36. DOI: 10.18321/cpc22(1)27-36
9. Bolegenova S., Askarova A., Georgiev A., Nugymanova A., Maximov, V., Bolegenova S., Adil'bayev N. Staged supply of fuel and air to the combustion chamber to reduce emissions of harmful substances // Energy. 2024. Vol. 293. P. 130622. DOI: 10.1016/j.energy.2024.130622
10. Askarova A. S., Bolegenova S. A., Georgiev A. The use of a new “clean” technology for burning low-grade coal in on boilers of Kazakhstan TPPs // Bulgarian Chemical Communications. 2018. Vol. 50, spec. iss. G. P. 53–60. EDN: RLVIPY
11. Pawlak-Kruczek H., Mularski J., Ostrycharczyk M., Czerep M., Baranowski M., Maćzka T., Sadowski K., Hulisz P. Application of plasma burners for char combustion in a pulverized coal-fired (PC) boiler – Experimental and numerical analysis // Energy. 2023. Vol. 279. P. 128115. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128115
12. Youssefi R., Maier J., Scheffknecht G. Pilot-scale experiences on a plasma ignition system for pulverized fuels // Energies. 2021. Vol. 14. P. 4726. DOI: 10.3390/en14164726
13. Марченко О. В., Соломин С. В. О целесообразности экологически чистого использования древесных отходов в Байкальском регионе // XXI век. Техносферная безопасность. 2019. Т. 4, № 1. С. 20–29. DOI: 10.21285/2500-1582-2019-1-20-29
14. Messerle V., Ustimenko A., Lavrichshev O. Plasma-fuel systems for clean coal technologies // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy. 2021. Vol. 174, iss. 2. P. 79–83. DOI: 10.1680/jener.19.00053
15. Карпенко Е. И., Мессерле В. Е., Устименко А. Б. Математическая модель процессов воспламенения, горения и газификации пылеугольного топлива в устройствах с электрической дугой // Теплофизика и аэромеханика. 1995. Т. 2, № 2. С. 173–187.
16. Мессерле А. В. Математическое моделирование процессов термохимической подготовки пылеугольного топлива с использованием электродуговых плазмотронов: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14. М., 2006. 119 с.
17. Batukhtin A., Batukhtina I., Baranovskaya M., Bass M., Ivanov S., Batukhtin S., Kobylkin M. Obtaining a solution of a differential equations system for determining the heat networks retention // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9, no. 7. P. 1300–1320. EDN: YBKSPZ

18. Batukhtin A., Batukhtina I., Bass M. Development and experimental verification of the mathematical model of thermal inertia for a branched heat supply system // *Journal of Applied Engineering Science*. 2019. Vol. 17, no. 3. P. 413–424. DOI: 10.5937/jaes17-22408. EDN: NZKINQ

References

1. Yakovleva K. Socio-economic efficiency of forest management in the border regions of Russia. *Transbaikal State University Journal*. 2026;22(11):151-160. DOI: 10.21209/2227-9245-2016-22-11-151-160. EDN: XTBQLJ. (In Russian)
2. Kuznetsov AV, Lomovsky IO, Butakov EB. Composite powder fuel from coal of various degrees of metamorphism and waste from woodworking industries. *Science and Technology of Siberia*. 2024;(4):88-91. EDN: JGOISD. (In Russian)
3. Butakov EB, Burdakov AP, Alekseenko SV, Yaganov EN. Plasma ignition system to start up pulverized coal boilers: experimental simulation and full-scale test. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2022;31:375-383. DOI: 10.1134/S1810232822030018. EDN: FTVXHK
4. Sosin DV, Shtegman AV, Ryzhiy I, Fomenko EA, Bor SD, Tsyrenov CO (et al). Increasing the Efficiency and Increasing the Resource of the Plasma-Ignition System by Its Modernization at Gusinoozerskaya TPP. *Thermal Engineering*. 2021;68(4):302-309. DOI: 10.1134/S0040601521040078. EDN: YKCSTH
5. Lavrichshev OA, Ustimenko AB. Plasma-fuel systems and principles of their functioning. *Combustion and Plasma Chemistry*. 2022;20(1):51-62. DOI: 10.18321/cpc481. EDN: OMXMAO. (In Russian)
6. Batukhtin AG, Makhov EA, Bass MS, Batukhtin SG. Enhancing aerodynamic efficiency in solid fuel plasma preparation for power plants. *International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering" (IUTPE)*. 2023;15(4):351-361.
7. Zhukov MF, Peregudov VS. Plasma technology for pulverized-coal boiler firing. *Thermal Engineering*. 1996;43(12):1025-1028. EDN: MRMAWV
8. Messerle VE, Orynbasar MN, Ustimenko AB. Simulation and experiment of plasma ignition of low-grade coal. *Combustion and Plasma Chemistry*. 2024;22:27-36. DOI: 10.18321/cpc22(1)27-36
9. Bolegenova S, Askarova A, Georgiev A, Nugymanova A, Maximov V, Bolegenova S (et al). Staged supply of fuel and air to the combustion chamber to reduce emissions of harmful substances. *Energy*. 2024;293:130622. DOI: 10.1016/j.energy.2024.130622. EDN: CLLIFU
10. Askarova AS, Bolegenova SA, Georgiev A. The use of a new “clean” technology for burning low-grade coal in on boilers of Kazakhstan TPPs. *Bulgarian Chemical Communications*. 2018;50:53-60. EDN: RLVIPY
11. Pawlak-Kruczek H, Mularski J, Ostrycharczyk M, Czerep M, Baranowski M, Mączka T. (et al.) Application of plasma burners for char combustion in a pulverized coal-fired (PC) boiler – Experimental and numerical analysis. *Energy*. 2023;279:128115. DOI: 10.1016/j.energy.2023.128115
12. Youssefi R, Maier J, Scheffknecht G. Pilot-scale experiences on a plasma ignition system for pulverized fuels. *Energies*. 2021;14:4726. DOI: 10.3390/en14164726
13. Marchenko OV, Solomin SV. On the expediency of environmentally-friendly use of wood waste in the Baikal region. *XXI Century. Technosphere Safety*. 2019;4(1):20-29. DOI: 10.21285/2500-1582-2019-1-20-29. (In Russian)
14. Messerle V, Ustimenko A, Lavrichshev O. Plasma-fuel systems for clean coal technologies. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy*. 2021;174(2):79-83. DOI: 10.1680/jener.19.00053
15. Karpenko EI, Messerle VE, Ustimenko AB. A mathematical model of the processes of ignition, combustion and gasification of pulverized coal fuels in devices with an electric arc. *Thermophysics and Aeromechanics*. 1995;2(2):173-187. (In Russian)
16. Messerle AV. Mathematical modeling of processes of thermochemical preparation of pulverized coal fuel using electric arc plasma torches: cand. techn. sci. diss. Moscow; 2006. 119 p. (In Russian)
17. Batukhtin A., Batukhtina I., Baranovskaya M., Bass M., Ivanov S., Batukhtin S., Kobylkin M. Obtaining a solution of a differential equations system for determining the heat networks retention. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018;9(7):1300-1320. EDN: YBKSPZ
18. Batukhtin A, Batukhtina I, Bass M. Development and experimental verification of the mathematical model of thermal inertia for a branched heat supply system. *Journal of Applied Engineering Science*. 2019;17(3):413-424. DOI: 10.5937/jaes17-22408. EDN: NZKINQ

Информация об авторах

Батухтин Андрей Геннадьевич, д-р техн. наук, доцент кафедры энергетики, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; batukhtina_ir@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3798-3675>. Область научных интересов: совершенствование технологий тепловой и нетрадиционной энергетики для повышения эффективности систем централизованного теплоснабжения, плазменно-энергетические технологии.

Демченко Ксения Александровна, старший преподаватель кафедры прикладной информатики и математики, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; kse_nehka@mail.ru. Область научных интересов: региональная экономика, лесопромышленный комплекс.

Басс Максим Станиславович, канд. техн. наук, доцент кафедры энергетики, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; batihtin1@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3151-6857>. Область научных интересов: разработка методов оптимизации режимов на теплоэлектроцентралях, плазменно-энергетические технологии.

Носкова Алена Эдуардовна, аспирант кафедры энергетики, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; wang_007@mail.ru. Область научных интересов: плазменно-энергетические технологии.

Information about the authors

Batukhtin Andrey G., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Energy department, Transbaikal State University, Chita, Russia; batuhtina_ir@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3798-3675>. Research interests: improvement of thermal and non-traditional energy technologies to increase the efficiency of district heating systems, plasma energy technologies.

Demchenko Kseniya A., senior lecturer, Applied Informatics and Mathematics department, Transbaikal State University, Chita, Russia; kse_nehka@mail.ru. Research interests: regional economics, timber industry.

Bass Maxim S., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Energy department, Transbaikal State University, Chita, Russia; batihtin1@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3151-6857>. Research interests: development of methods for optimizing modes at thermal power plants, plasma energy technologies.

Noskova Alyona E. Postgraduate Student, Energy department, Transbaikal State University, Chita, Russia; wang_007@mail.ru. Research interests: plasma energy technologies.

Вклад авторов в статью

Батухтин А. Г. – разработка методологии исследования, плана статьи, численные и натурные эксперименты.

Демченко К. А. – анализ литературы, подбор библиографии, редактирование текста.

Басс М. С. – численные исследования, анализ результатов.

Носкова А. Э. – сбор материалов, численные и натурные эксперименты, написание текста статьи.

The authors' contribution to the article

Batukhtin A. G. – development of research methodology, article outline, numerical and field experiments.

Demchenko K. A. – literature analysis, bibliography selection, text editing.

Bass M. S. – numerical research, analysis of results.

Noskova A. E. – collection of materials, numerical and field experiments, writing the text of the article.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 01.11.2025; одобрена после рецензирования 22.11.2025; принята к публикации 29.11.2025.

**Received 2025, November 01; approved after review 2025, November 22;
accepted for publication 2025, November 29.**