

Научная статья

УДК 662.6; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-186-197

**АЛЬТЕРНАТИВНОЕ ТОПЛИВО: МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ
И ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

✉Травин Игорь Александрович;

Козодаев Алексей Станиславович;

Кондратьева Мария Владимировна.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

✉7greenline@mail.ru

Аннотация. Рассматривается актуальная проблема вовлечения твердых коммунальных отходов в энергетический баланс через производство альтернативного топлива (RDF – Refuse Derived Fuel). Проанализирован зарубежный опыт промышленного применения RDF, в первую очередь в цементной индустрии, как наиболее технологически подготовленной для его использования. Описаны технология производства RDF, критерии качества и классификации, а также экологические и технические требования к его сжиганию. Также приведен опыт развития производства RDF зарубежом. Показано, что для стран с низким качеством исходного сырья и высокими требованиями к стабильности производства (включая Россию) газификация RDF с подачей синтез-газа в кальцинатор является более перспективной стратегией, чем попытки адаптировать печи под прямое сжигание низкосортного топлива. Особое внимание уделено анализу факторов, влияющих на развитие отрасли RDF в России с учетом текущей структуры топливно-энергетического комплекса, состояния системы обращения с отходами и нормативно-правовой базы. На основании проведенного анализа предложены решения, необходимые для устойчивого внедрения RDF в российской экономике в соответствии с принципами наилучших доступных технологий и экологической безопасности.

Ключевые слова: RDF-топливо, твердые коммунальные отходы, энергия из отходов, замещающее топливо, цементная промышленность, совместная переработка (co-processing), обращение с отходами, экологические требования, экономика замкнутого цикла

Для цитирования: Травин И.А., Козодаев А.С., Кондратьева М.В. Альтернативное топливо: международный опыт и возможности применения в Российской Федерации // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 186–197. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-186-197

Scientific article

**ALTERNATIVE REFUSE DERIVED FUELS: INTERNATIONAL
EXPERIENCE AND APPLICATION PROSPECTS IN THE RUSSIAN
FEDERATION**

✉Travin Igor A.;

Kozodaev Aleksey S.;

Kondratyeva Maria V.

Bauman Moscow state technical university, Moscow, Russia

✉7greenline@mail.ru

Abstract. The article discusses the current problem of involving municipal solid waste in the energy balance through the production of alternative fuel (RDF – Refuse Derived Fuel). It analyzes the foreign experience of industrial application of RDF, primarily in the cement industry, as the most technologically prepared for its use. The article describes the technology of RDF production, quality and classification criteria, as well as environmental and technical requirements for its combustion. It also provides an overview of the development of RDF

production abroad. It is shown that for countries with low-quality raw materials and high requirements for production stability (including Russia), RDF gasification with the supply of synthesis gas to the calcinator is a more promising strategy than attempts to adapt furnaces for direct combustion of low-grade fuel. Special attention is paid to the analysis of factors affecting the development of the RDF industry in Russia, taking into account the current structure of the fuel and energy complex and the state of the recycling system.

Keywords: RDF-fuel, municipal solid waste, energy from waste, replacement fuel, cement industry, co-processing, waste management, environmental requirements, closed-loop economics

For citation: Travin I.A., Kozodaev A.S., Kondratyeva M.V. Alternative refuse derived fuels: international experience and application prospects in the Russian Federation // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 186–197. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-186-197

Введение

Вопросы энергообеспечения и утилизации накапливающихся отходов относятся к числу ключевых задач для устойчивого развития. Топливо-энергетический баланс Российской Федерации исторически базируется на ископаемых ресурсах, доля которых в производстве электроэнергии, по данным на текущий период, составляет порядка 66 %, в то время как на атомную и гидроэнергетику приходится оставшаяся треть [1]. Параллельно острой проблемой остается накопление твердых коммунальных отходов (ТКО), основная масса которых размещается на полигонах, что приводит к отчуждению земель и рискам для окружающей среды. Значительную часть ТКО составляют горючие фракции, что создает потенциал для их использования в энергетических целях.

Мировой практикой, направленной на сокращение захоронения отходов и диверсификацию топливной базы, является производство стандартизированного альтернативного топлива из отходов – RDF (Refuse Derived Fuel). Его применение позволяет решать две задачи одновременно: утилизировать неперерабатываемую часть ТКО и замещать традиционное ископаемое топливо в энергоемких производствах. Целью данной статьи является комплексный анализ международного опыта производства и использования RDF, оценка технологического и экономического потенциала его внедрения в России, а также формулирование условий, необходимых для его экологически безопасного применения.

1. Топливо-энергетический контекст и проблема отходов в России

Российская Федерация характеризуется высоким уровнем потребления как электрической, так и тепловой энергии, что обусловлено климатическими условиями, развитием промышленности и структурой ЖКХ. В промышленных секторах, требующих высоких температур (цементное производство, металлургия и др.), энергия зачастую получается путем прямого сжигания топлива [2]. Несмотря на значительные запасы ископаемых энергоресурсов, актуальными становятся вопросы ресурсоэффективности, снижения углеродного следа и поиска альтернативных источников энергии.

Одновременно с этим система обращения с ТКО в России исторически была ориентирована на полигонное захоронение. Согласно оценкам коммунальные отходы в значительной степени состоят из горючих компонентов, часть из которых может быть выделена в качестве вторичного сырья.

Объем захоронения отходов в России составляет 89 % [3]. Это порождает вопрос о необходимости переработки сырья или энергетической утилизации для сокращения объемов захоронения.

Разрешение этой дилеммы в современной практике определяется как рыночными механизмами, так и регулирующим воздействием государства. Отсутствие дефицита традиционного топлива в стране долгое время сдерживало развитие индустрии RDF, однако исчерпание возможности расширения полигонов, особенно в густонаселенных регионах, делает развитие этого направления необходимым.

2. Технология производства и характеристика RDF

RDF – это твердое топливо, производимое из горючей фракции ТКО, прошедшей специальную подготовку. Термин является аббревиатурой от английского Refuse Derived Fuel. Процесс включает следующие этапы в соответствии с рис. 1 [4].

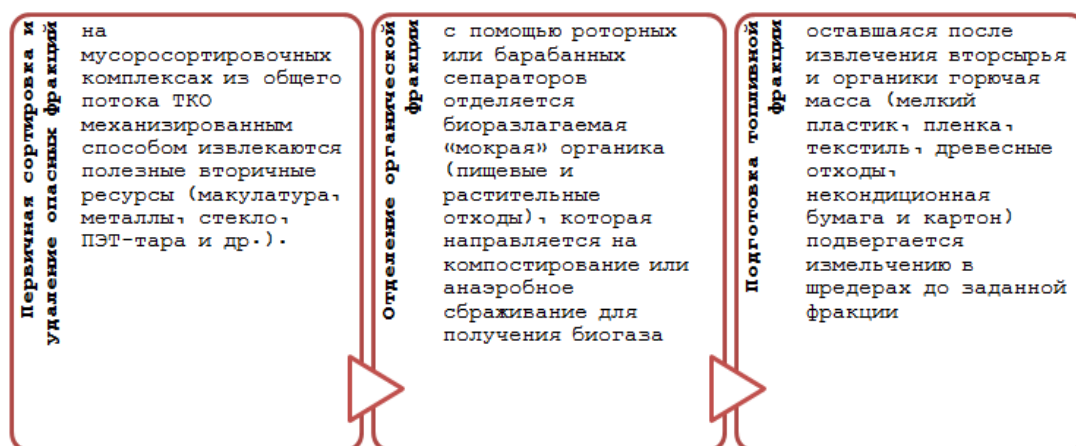


Рис. 1. Этапы производства RDF-топлива

Измельченная масса подсушивается в сушильных барабанах для снижения влажности, после чего уплотняется и гранулируется (или брикетируется) в соответствии с установленным технологическим регламентом.

Полученные гранулы (брикеты) представляют собой товарное RDF-топливо. Его ключевые потребительские свойства – теплотворная способность и зольность – напрямую зависят от компонентного состава исходной массы. Более высокое содержание углеводородных материалов (пластики, резина) и целлюлозы (бумага, древесина) повышает теплоту сгорания и снижает зольность. На основании этих параметров RDF классифицируется по категориям, что определяет возможные области его применения [5].

3. Международный опыт применения RDF: акцент на цементной промышленности

Мировой опыт свидетельствует, что наиболее технологически и экологически обоснованной сферой для использования RDF является цементная промышленность. Вращающиеся печи для обжига цементного клинкера работают при температурах от 1 450 °C до 2 000 °C, что обеспечивает полное термическое разложение (пиролиз) сложных органических соединений, включая потенциально опасные [6, 7]. Высокие температуры, длительное время пребывания материала в зоне горения и щелочная среда способствуют нейтрализации кислотных газов (например, HCl, SO₂). Кроме того, образующаяся зола инкорпорируется в матрицу клинкера, превращаясь в компонент конечного продукта, что исключает необходимость ее отдельной утилизации как отхода.

В странах Европейского союза совместная переработка отходов в цементных печах признана одной из наилучших доступных технологий [8, 9]. Например, в Германии доля альтернативных видов топлива в топливном балансе цементных заводов достигает 90 %¹. В Швейцарии, где на полигоны направляется лишь около 1 % отходов, до 50 % бытового мусора перерабатывается в RDF и сжигается с получением энергии. Швеция, имеющая

¹ Альтернативное топливо RDF в цементных печах: технология применения. URL: <https://inner.su/articles/alternativnoe-toplivo-rdf-v-tsementnykh-pechakh-tehnologiya-primeneniya/> (дата обращения: 20.01.2026)

развитую сеть мусоросжигательных заводов и заводов по производству RDF, испытывает дефицит вторичного топлива и импортирует отходы из соседних стран [10].

Критическим условием безопасного применения RDF является строгий входной контроль сырья и мониторинг технологического процесса. Особое внимание уделяется снижению содержания хлора (не более 0,1 %). Это связано с тем, что его повышенные концентрации могут приводить к образованию диоксинов [4]. Поэтому в производстве RDF недопустимо использование неподготовленных ТКО или опасных фракций.

Значительная часть исследований посвящена не только технологическим, но и экономическим, а также историческим аспектам интеграции RDF в цементную индустрию в контексте построения экономики замкнутого цикла. Как отмечается в исследовании [11], развитие циклических процессов и, как следствие, интереса к вторичным ресурсам связан с мировым нефтяным кризисом 1970-х гг. В этот период в Германии и Швейцарии начинается промышленное использование отходов в цементной промышленности. Таким образом, к 2018 г. альтернативное топливо покрывало уже более двух третей спроса в Германии [11].

Анализ современных тенденций, проведенный в исследовании [12] на базе отраслевых изданий (CemNet.com, Global CemFuels), позволяет выделить несколько ключевых векторов развития рынка RDF за рубежом (рис. 2), которые могут служить ориентиром для России.



Рис. 2. Ключевые векторы развития рынка RDF за рубежом

Существенный вклад в понимание не только технологических преимуществ, но и системных барьеров на пути внедрения RDF вносит исследование [13], посвященное анализу перспектив совместной переработки RDF в цементных печах Индии. Авторы исходят из предпосылки, что цементная промышленность, являясь энергоинтенсивным сектором, где стоимость топлива составляет до 30–35 % себестоимости продукции, остро нуждается в альтернативных источниках энергии на фоне дефицита и волатильности цен на традиционный уголь и ПЭТ-кокс. Одновременно с этим быстрая урбанизация создает критическую нагрузку на систему обращения с отходами, что делает утилизацию неперерабатываемой фракции ТКО в виде RDF экономически и экологически оправданной.

Опираясь на данные Центрального совета по контролю загрязнения (CPCB) и Цементной ассоциации Индии (CMA), исследователи [13] проводят количественную оценку потенциала замещения. Они отмечают, что правительством Индии введены правила, обязывающие промышленные предприятия в радиусе 100 км от заводов по производству RDF замещать не менее 5 % своего топлива RDF. Однако, согласно их расчетам, использование только отходов, генерируемых в этом радиусе, позволило бы достичь уровня замещения тепловой энергии (Thermal Substitution Rate, TSR) лишь на уровне 0,48 %. Это демонстрирует, что для масштабного внедрения RDF необходима не только развитая сеть его производства, но и эффективная логистика, выходящая далеко за пределы ближайших территорий.

Результат исследования [13] систематизирует факторы, препятствующие широкому распространению совместной переработки. Авторы выделяют три основные группы проблем в соответствии с рис. 3.

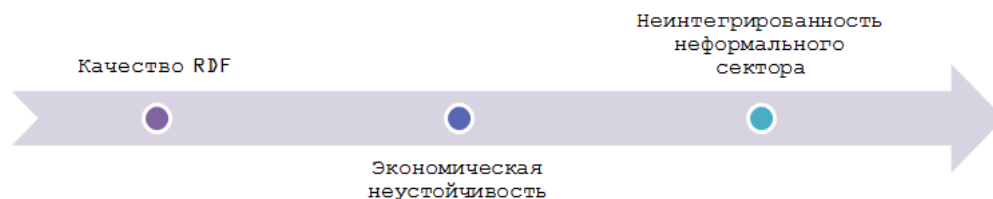


Рис. 3. Группы проблем, препятствующие широкому распространению совместной переработки

Основным препятствием является несоответствие производимого топлива жестким технологическим требованиям цементных печей. Авторы приводят целевые параметры качества для RDF, пригодного к совместной переработке: размер частиц менее 35 мм, низшая теплота сгорания 2 500–3 500 ккал/кг, влажность менее 25 %, зольность менее 20 % и, что наиболее критично, содержание хлора менее 1 % [13–19]. Кроме того, производители RDF не имеют гарантий сбыта своей продукции, а цементные заводы, в свою очередь, не готовы инвестировать в модернизацию (например, установку байпасных систем) без уверенности в долгосрочных и качественных поставках. В Индии значительная часть сбора и сортировки отходов осуществляется неформальными сборщиками, которые не встроены в официальную систему. Это приводит к тому, что качество исходного сырья для RDF остается низким, а наиболее загрязненные фракции, пригодные для энергетической утилизации, теряются [18–25].

На основе проведенного анализа [13] предлагаются три бизнес-модели для обеспечения устойчивости проектов совместной переработки (рис. 4).



Рис. 4. Бизнес-модели для обеспечения устойчивости проектов совместной переработки

Существует направление исследований, в которых для оценки экологической эффективности использования RDF применяется методология анализа жизненного цикла. Например, в работе [14] количественно сопоставлены три сценария обращения с ТКО в условиях реально действующего промышленного кластера (рис. 5).



Рис. 5. Сценарии обращения с ТКО в Юго-Восточной Азии

Объектом исследования стал опыт взаимодействия цементной компании (PT Indocement) с деревенским предприятием (BUMDES), которое с 2008 г. перерабатывает отходы окрестных деревень в RDF. Авторы подчеркивают, что цементная промышленность рассматривается правительством Индонезии как один из приоритетных секторов для реализации программ по снижению выбросов парниковых газов, поскольку до 86 % выбросов CO_2 в этой отрасли связаны со сжиганием ископаемого топлива [15]. Производство RDF, таким образом, решает две задачи: сокращение объемов захоронения отходов и замещение угля в энергоемком производстве.

Авторы исследования [14] рассчитали материальные потоки для установки мощностью переработки около 2,26 т отходов в сутки, из которых производится 966 кг RDF со средним размером частиц 5–10 мм и теплотворной способностью, достигающей 67 % от теплотворной способности угля.

Результаты демонстрируют экологические преимущества использования RDF по всем ключевым показателям воздействия в соответствии с табл.

Таблица

Оценка воздействия на жизненный цикл

	Потенциал глобального потепления	Токсичность для человека	Потенциал эвтрофикации
RDF	0,84 кг CO_2 – экв.	0,22 кг 1,4-дихлорбензол – экв.	0,000736 кг PO_4 – экв.
Открытый полигон	8,36 кг CO_2 – экв.	0,23 кг 1,4-дихлорбензол – экв.	0,000718 кг PO_4 – экв.

Авторы исследования [14] объясняют данные табл. 1 тем, что производство RDF, в отличие от открытого полигона, предотвращает образование метана при разложении органики, а в отличие от сжигания – исключает эмиссию тяжелых металлов и диоксинов из-за отсутствия на этапе подготовки RDF сепарации опасных фракций. Производство RDF дополнительно снижает нагрузку на полигоны вследствие получения компоста и биомассы.

В то время как большая часть исследований фокусируется на прямом сжигании RDF в цементных печах и кальцинаторах, в работе [16] осуществляется анализ альтернативного подхода – интеграции процесса газификации RDF в технологическую линию цементного завода. Авторы отмечают, что, несмотря на высокие показатели термического замещения (TSR), достигаемые в Европе (до 80–100 % в кальцинаторе), прямое сжигание RDF сопряжено с рядом нерешенных операционных проблем. К ним относятся: неполное сгорание крупных частиц, колебания температуры факела, повышенный удельный расход тепла и, что наиболее критично, образование кольцевых настывлей в печи из-за высокого содержания хлора и щелочей в золе RDF [18–23].

Подчеркивается, что для Индии, где уровень TSR составляет лишь около 5 % при целевом показателе 25 % к 2025 г., эти проблемы стоят особенно остро. Низкое качество RDF (теплота сгорания до 1 800 ккал/кг, высокая влажность и засоренность) делает его прямое сжигание в существующих печах без дорогостоящей модернизации (например, установки байпасных систем) экономически и технологически проблематичным [16].

В качестве решения предлагается рассматривать не прямое сжигание, а предварительную газификацию RDF с последующим использованием полученного синтез-газа (syngas) в цементной печи и/или кальцинаторе. На рис. 6 представлены преимущества использования газификации RDF-топлива.

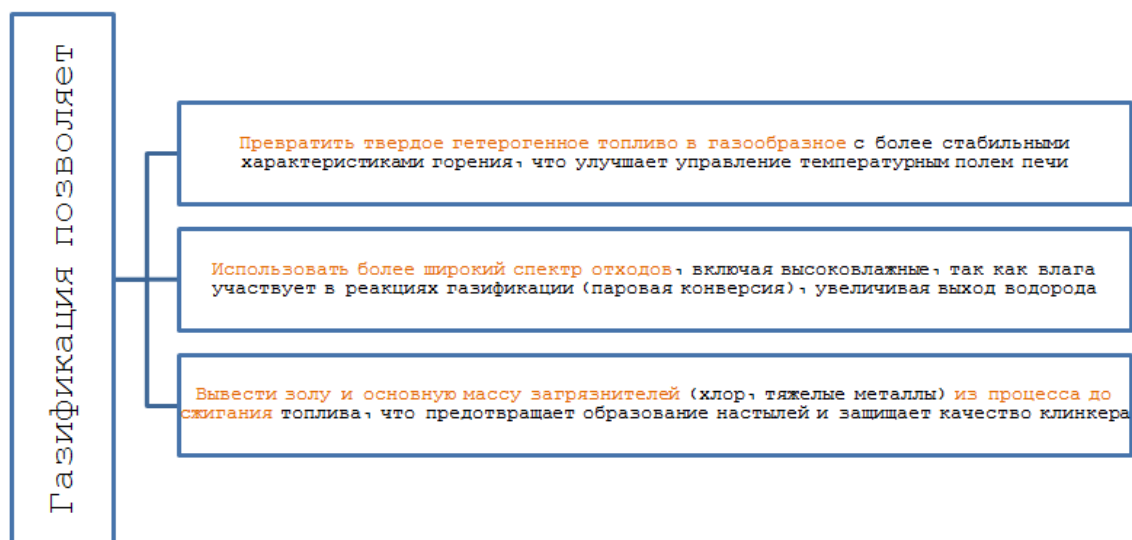


Рис. 6. Преимущества использования газификации RDF-топлива

Таким образом, для стран с низким качеством исходного сырья и высокими требованиями к стабильности производства (включая Россию) газификация RDF с подачей синтез-газа в кальцинатор является более перспективной стратегией, чем попытки адаптировать печи под прямое сжигание низкосортного топлива.

4. Потенциал и барьеры внедрения RDF в России

По расчетам, проведенным международными экспертами по заказу Всемирного банка, в 2016 г. в городах мира было произведено 2,01 млрд т ТКО, что в среднем составляет 0,74 кг на человека в день [26].

Российская Федерация обладает значительным ресурсным потенциалом для развития индустрии RDF, учитывая объемы образующихся ТКО и наличие энергоемких производств. Потенциальными потребителями могут выступать цементные заводы, крупные котельные, некоторые металлургические производства, а также специализированные мусоросжигательные заводы, вырабатывающие электрическую и тепловую энергию.

В 2023 г. в России был принят ГОСТ Р 70719–2023 «Обращение с отходами. Методические рекомендации по подготовке альтернативного топлива из твердых коммунальных отходов. Основные требования», что создало нормативную основу для производства стандартизированного RDF. Отечественные компании разрабатывают и предлагают технологические линии для его производства, а также системы автоматической подачи в печи.

Однако существуют значительные барьеры для широкого внедрения:

- инфраструктурные: недостаточный уровень развития системы селективного сбора отходов по всей стране, дефицит современных мусоросортировочных комплексов;

- технологические: необходимость модернизации многих промышленных предприятий (в первую очередь цементных заводов) для организации приема, хранения и сжигания RDF с соблюдением всех экологических норм;

- экономические: требуются значительные капитальные вложения как в создание производств RDF, так и в модернизацию потребителей. Конкуренция с относительно дешевым природным газом создает необходимость в специальных экономических стимулах;

- социально-экологические: отсутствие общественного доверия к технологиям сжигания отходов, связанное с опасениями по поводу выбросов токсичных веществ.

Ориентировочная потребность лишь одного среднестатистического цементного завода (например, мощностью около 1 млн т клинкера в год) может составлять до 25–30 тыс. т RDF в год, что эквивалентно такому же объему перерабатываемых отходов, отвлеченных от захоронения.

5. Комплекс мер для устойчивого развития индустрии RDF в Российской Федерации

Для успешной интеграции RDF в экономику и энергетику России необходим системный подход, включающий следующие ключевые направления:

1. Детализация требований к качеству RDF, условиям его производства, транспортировки и использования в рамках существующих законов («Об отходах производства и потребления», «Об охране окружающей среды») и в соответствии с принципами НДТ.

2. Введение механизмов, делающих использование RDF экономически привлекательным для промышленности. Это может включать меры налогового регулирования, целевое субсидирование проектов модернизации, учет «зеленых» технологий в системе государственных закупок.

3. Ускоренное внедрение повсеместного селективного сбора ТКО с обязательным отделением опасных фракций (батареи, ртутные лампы, электроника). Стимулирование инвестиций в строительство современных сортировочных и перерабатывающих комплексов, способных производить качественное RDF.

4. Обязательное оснащение всех объектов, использующих RDF, системами непрерывного автоматического мониторинга выбросов (CAM) с передачей данных в надзорные органы. Отнесение таких объектов к I категории негативного воздействия на окружающую среду.

5. Развитие направлений по применению золы при ее образовании на специализированных заводах в строительной индустрии (дорожное строительство, производство строительных материалов), что соответствует принципам экономики замкнутого цикла.

6. Поддержка исследований в области технологий производства и сжигания RDF, разработки отечественного оборудования. Включение соответствующих дисциплин в образовательные программы технических вузов.

7. Формирование общественного мнения через просветительские кампании, обеспечение доступа к данным мониторинга выбросов, диалог с местными сообществами.

Заключение

Производство и использование топлива из отходов представляет перспективное технологическое направление, позволяющее решать комплекс задач, среди них, возможность сокращения полигонного захоронения ТКО, замещение ископаемого топлива, снижение углеродного следа энергоемких производств. Международный опыт, в частности, в странах Европы и Азии, доказывает возможность перехода на циклический процесс переработки отходов при условии выполнения требований производства.

На сегодняшний день в России существуют ограничения перехода к экономике замкнутого цикла – инфраструктурных, экономических и социальных. Реализация такой модели возможна только при комплексном совершенствовании законодательства, создании экономических стимулов, масштабных инвестиций в инфраструктуру, внедрения передовых технологий контроля качества и последовательную работу по экологическому просвещению.

Список источников

1. Development of experience in the application of technologies in the field of alternative energy: World experience, Russian practice / I.A. Kapitonov [et al.] // Renewable Energy. 2021. T. 165. С. 773–782.
2. Валинеева А.А., Степанова Т.А. RDF как альтернативный источник энергии // ИВД. 2020. № 3 (63). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rdf-kak-alternativnyy-istochnik-energii> (дата обращения: 20.01.2026).
3. Осипов В.И. Что лучше – сжигать или разлагать твёрдые коммунальные отходы? Вестник Российской академии наук, 2021. Т. 91. № 8. С. 769–778.
4. CSI (Cement Sustainability Initiative). 2005. Guidelines for the Selection and Use of Fuels and Raw Materials in the Cement Manufacturing Process: Fuels and Raw Materials. World Business Council for Sustainable Development, Geneva, Switzerland.
5. De Bas P. The Economics of Measurement of Emissions into the Air. 2002.
6. Cembureau. 2004. Guidelines on Co-Processing of Waste Materials in Cement Production. Cembureau, Brussels, Belgium.
7. Михайлова Н.В., Феоктистов А.Ю., Бернштейн Л.Г. Перспективы использования дополнительного топлива из твердых бытовых отходов при производстве цемента // Строительные материалы. 2013. № 1. С. 10–11.
8. Сухоруков А.И., Захарова Е.А. Актуальные подходы к развитию экономики замкнутого цикла в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами // Вестник Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова. 2021. № (5). С. 33–44.
9. Ламзина И.В., Желтобрюхов В.Ф., Шайхиев И.Г. Зарубежная практика использования альтернативного топлива из отходов для цементной промышленности // Вестник Казанского технологического университета. 2015. № 17.
10. Федотов А.В. Зарубежный опыт организации и стимулирования раздельного сбора и утилизации твердых бытовых отходов на региональном уровне // Вопросы региональной экономики. 2019. Т. 4. № 41. С. 54–62.
11. Пинкальский М.А., Федотова Г.В. Использование зарубежного опыта применения альтернативного топлива в цементной промышленности при построении экономики замкнутого цикла // Вестник Дагестанского государственного университета. Сер. 3: Общественные науки. 2024. Т. 39. № 4. С. 29–38.

12. Prospects for using the liquid fraction of biogas digestate as a substrate additive for growing mushrooms / S. Kataki [et al.] // *Advances in Waste Management: Selected Papers from the Recycle 2016 Conference*. Singapore: Springer Singapore, 2018. P. 445–465.
13. Application of nutrients increased the growth and nitrate concentration in lettuce grown hydroponically using biogas slurry / V.K. Liu [et al.] // *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B: Soil Science and Plant Production*. 2011. Vol. 61. № 5. P. 391–394.
14. Chandrasekhar K., Pandey S. Joint Processing of RDF in Cement Plants // *Energy Recovery Processes from Waste*. Singapore: Springer Singapore, 2019. P. 225–236; *Assessment of the Life Cycle of Waste-Derived Fuel (RDF) for the Recycling of Municipal Solid Waste (MSW): An Example of the Cement Industry in Cirebon, Indonesia* / T.T. Anastasiya [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020. Vol. 778. № 1. P. 012146; *Trends in Global CO₂ and Greenhouse Gas Emissions* / J. G. J. Olivier [et al.] // *Netherlands Environmental Assessment Agency*. 2017. Vol. 5. № 1.
15. Sharma P., Sheth P.N., Mohapatra B.N. Recent progress in the joint processing of fuel production waste (RDF) in cement production: direct firing in a kiln/calciner against the integration of RDF gasification processes // *Waste and Biomass Valorization*. 2022. Vol. 13. № 11. P. 4347–4374.
16. Decarbonising of the Indian Cement Industry Through Alternative Fuels—Challenge of Transfer Chute Jamming / K. Kukreja [et al.] // *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*. 2023. T. 20. № 5. C. 71–77.
17. Refuse derived fuel (RDF) Co-processing in kiln main burner in a cement plant: a case study / P. Sharma [et al.] // *International Conference on Advances in Energy Research*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. C. 331–339.
18. Qazi U.Yu. Future of hydrogen as an alternative fuel for next-generation industrial applications; challenges and expected opportunities // *Energies*. 2022. T. 15. № 13. C. 4741.
19. The future prospects of alternative fuels / E. Uludamar [et al.] // *Frontiers in Energy Research*. 2024. T. 12. C. 1482062.
20. Viczek S.A. Origins, Distribution, and Fate of Contaminants and Ash Constituents in Waste for SRF Production and Co-Processing. 2021.
21. Güereca L.P., Torres N., Juárez-López C.R. The co-processing of municipal waste in a cement kiln in Mexico. A life-cycle assessment approach // *Journal of Cleaner Production*. 2015. T. 107. C. 741–748.
22. Integrating Municipal Solid Wastes as Refuse-Derived Fuels in Cement Co-processing: A Circular Economy Approach for Sustainable Resource Management / H.S. Patra [et al.] // *Sustainable Municipal Waste Management with a Zero Waste Approach*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2026. C. 323–343.
23. Overview of municipal solid wastes-derived refuse-derived fuels for cement co-processing / G.L. Tihin [et al.] // *Alexandria Engineering Journal*. 2023. T. 84. C. 153–174.
24. Numerical investigation of co-firing of RDF and pulverized coal in precalciners: Impacts on combustion characteristics and pollutant emissions / Z. Zhang [et al.] // *Fuel*. 2026. T. 417. C. 138647.
25. Saha P.K., Karstensen K.H. Co-processing of Alternative Fuels // *Waste Valorisation and Recycling: 7th IconSWM—ISWMAW*. 2017. Vol. 2. 2019. T. 2. C. 19.
26. Шилкина С.В. Управление пластиковыми отходами: российский и зарубежный опыт // *Отходы и ресурсы*. 2022. Т. 9. № 1.

References

1. Development of experience in the application of technologies in the field of alternative energy: World experience, Russian practice / I.A. Kapitonov [et al.] // *Renewable Energy*. 2021. T. 165. S. 773–782.

2. Valineeva A.A., Stepanova T.A. RDF kak al'ternativnyj istochnik energii // IVD. 2020. № 3 (63). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rdf-kak-alternativnyy-istochnik-energii> (data obrashcheniya: 20.01.2026).
3. Osipov V.I. Chto luchshe – szhigat' ili razlagat' tvorydye kommunal'nye othody? Vestnik Rossijskoj akademii nauk, 2021. T. 91. № 8. S. 769–778.
4. CSI (Cement Sustainability Initiative). 2005. Guidelines for the Selection and Use of Fuels and Raw Materials in the Cement Manufacturing Process: Fuels and Raw Materials. World Business Council for Sustainable Development, Geneva, Switzerland.
5. De Bas P. The Economics of Measurement of Emissions into the Air. 2002.
6. Cembureau. 2004. Guidelines on Co-Processing of Waste Materials in Cement Production. Cembureau, Brussels, Belgium.
8. Mihajlova N.V., Feoktistov A.Yu., Bernshtejn L.G. Perspektivy ispol'zovaniya dopolnitel'nogo topliva iz tverdyh bytovyh othodov pri proizvodstve cementa // Stroitel'nye materialy. 2013. № 1. S. 10–11.
9. Suhorukov A.I., Zaharova E.A. Aktual'nye podhody k razvitiyu ekonomiki zamknutogo cikla v sfere obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi othodami // Vestnik Rossijskogo ekonomicheskogo universiteta imeni G.V. Plekhanova. 2021. № (5). S. 33–44.
10. Lamzina I.V., Zheltobryuhov V.F., Shajhiev I.G. Zarubezhnaya praktika ispol'zovaniya al'ternativnogo topliva iz othodov dlya cementnoj promyshlennosti // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2015. № 17.
11. Fedotov A.V. Zarubezhnyj opyt organizacii i stimulirovaniya razdel'nogo sbora i utilizacii tverdyh bytovyh othodov na regional'nom urovne // Voprosy regional'noj ekonomiki. 2019. T. 4. № 41. S. 54–62.
12. Pinkal'skij M.A., Fedotova G.V. Ispol'zovanie zarubezhnogo opyta primeneniya al'ternativnogo topliva v cementnoj promyshlennosti pri postroenii ekonomiki zamknutogo cikla // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 3: Obshchestvennye nauki. 2024. T. 39. № 4. S. 29–38.
13. Prospects for using the liquid fraction of biogas digestate as a substrate additive for growing mushrooms / S. Kataki [et al.] // Advances in Waste Management: Selected Papers from the Recycle 2016 Conference. Singapore: Springer Singapore, 2018. P. 445–465.
14. Application of nutrients increased the growth and nitrate concentration in lettuce grown hydroponically using biogas slurry / V.K. Liu [et al.] // Acta Agriculturae Scandinavica, Section B: Soil Science and Plant Production. 2011. Vol. 61. № 5. P. 391–394.
15. Chandrasekhar K., Pandey S. Joint Processing of RDF in Cement Plants // Energy Recovery Processes from Waste. Singapore: Springer Singapore, 2019. P. 225–236; Assessment of the Life Cycle of Waste-Derived Fuel (RDF) for the Recycling of Municipal Solid Waste (MSW): An Example of the Cement Industry in Cirebon, Indonesia / T.T. Anastasiya [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020. Vol. 778. № 1. P. 012146; Trends in Global CO₂ and Greenhouse Gas Emissions / J. G. J. Olivier [et al.] // Netherlands Environmental Assessment Agency. 2017. Vol. 5. № 1.
16. Sharma P., Sheth P.N., Mohapatra B.N. Recent progress in the joint processing of fuel production waste (RDF) in cement production: direct firing in a kiln/calciner against the integration of RDF gasification processes // Waste and Biomass Valorization. 2022. Vol. 13. № 11. P. 4347–4374.
17. Decarbonising of the Indian Cement Industry Through Alternative Fuels—Challenge of Transfer Chute Jamming / K. Kukreja [et al.] // Asian Journal of Water, Environment and Pollution. 2023. T. 20. № 5. S. 71–77.
18. Refuse derived fuel (RDF) Co-processing in kiln main burner in a cement plant: a case study / P. Sharma [et al.] // International Conference on Advances in Energy Research. Singapore: Springer Nature Singapore, 2022. S. 331–339.
19. Qazi U.Yu. Future of hydrogen as an alternative fuel for next-generation industrial applications; challenges and expected opportunities // Energies. 2022. T. 15. № 13. S. 4741.

20. The future prospects of alternative fuels / E. Uludamar [et al.] // *Frontiers in Energy Research*. 2024. T. 12. S. 1482062.
21. Viczek S.A. Origins, Distribution, and Fate of Contaminants and Ash Constituents in Waste for SRF Production and Co-Processing. 2021.
22. Güereca L.P., Torres N., Juárez-López C.R. The co-processing of municipal waste in a cement kiln in Mexico. A life-cycle assessment approach // *Journal of Cleaner Production*. 2015. T. 107. S. 741–748.
23. Integrating Municipal Solid Wastes as Refuse-Derived Fuels in Cement Co-processing: A Circular Economy Approach for Sustainable Resource Management / H.S. Patra [et al.] // *Sustainable Municipal Waste Management with a Zero Waste Approach*. Cham: Springer Nature Switzerland, 2026. S. 323–343.
24. Overview of municipal solid wastes-derived refuse-derived fuels for cement co-processing / G.L. Tihin [et al.] // *Alexandria Engineering Journal*. 2023. T. 84. S. 153–174.
25. Numerical investigation of co-firing of RDF and pulverized coal in precalciners: Impacts on combustion characteristics and pollutant emissions / Z. Zhang [et al.] // *Fuel*. 2026. T. 417. S. 138647.
26. Saha P.K., Karstensen K.H. Co-processing of Alternative Fuels // *Waste Valorisation and Recycling: 7th IconSWM—ISWMAW*. 2017. Vol. 2. 2019. T. 2. S. 19.
27. Shilkina S.V. Upravlenie plastikovymi othodami: rossijskij i zarubezhnyj opyt // *Othody i resursy*. 2022. T. 9. № 1.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 18.03.2026; одобрена после рецензирования: 23.04.2026; принята к публикации: 05.05.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 18.03.2026; approved after review: 23.04.2026; accepted for publication: 05.05.2026

Информация об авторах:

Травин Игорь Александрович, инженер кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5), e-mail: 7greenline@mail.ru

Козодаев Алексей Станиславович, профессор кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5), доктор технических наук, профессор, e-mail: kozodaev@bmstu.ru, SPIN-код: 7802-8001

Кондратьева Мария Владимировна, ассистент кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5), e-mail: tmv@bmstu.ru, SPIN-код: 6392-9471

Information about the authors:

Travin Igor A., engineer of the department of ecology and industrial of safety Bauman Moscow state technical university (105005, Moscow, 2nd Baumanskaya Str., 5), e-mail: 7greenline@mail.ru

Kozodaev Alexey S., professor of the department of ecology and industrial safety of Bauman Moscow state technical university (105005, Moscow, 2nd Baumanskaya Str., 5), doctor of technical sciences, professor, e-mail: kozodaev@bmstu.ru, SPIN: 7802-8001

Kondratyeva Maria V., assistant at the department of ecology and industrial safety of Bauman Moscow state technical university (105005, Moscow, 2nd Baumanskaya Str., 5), e-mail: tmv@bmstu.ru, SPIN: 6392-9471