Обзорная статья
УДК 662.818, 2.4.6.
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_85–92

ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА БИОРАЗЛАГАЕМОЙ УПАКОВКИ В ФОРМИРОВАНИИ СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Владимир Александрович Рыжиков, Павел Владимирович Луканин, Олеся Вячеславовна Федорова, Эдуард Львович Аким

Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

© Рыжиков В. А., Луканин П. В., Федорова О. В., Аким Э. Л., 2026

Автор-корреспондент: В. А. Рыжиков, e-mail: ryzhikov_vladimir@bk. ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается возможность использования образовавшихся в производственном процессе отходов биоразлагаемой упаковки в качестве компонентов биотопливных брикетов, состоящих из отходов лесопромышленного комплекса и отходов производства ламинированной бумаги с биоразлагаемым полимерным слоем. Актуальность вопроса термической утилизации отходов упаковочного производства заключается в росте производства биоразлагаемой упаковки, призванной решить проблему пластикового загрязнения. Одновременно с этим производство биоразлагаемой упаковки порождает новый класс отходов на стадиях изготовления и брака. Утилизация этих полимерных композитов (на основе полимолочной кислоты (PLA), полибутиленсукцината (PBS), крахмалов) стандартными методами часто экономически неэффективна. Перспективным направлением является их энергетическая переработка совместно с биомассой. Целью исследования является систематизация и анализ известных данных о применении отходов производства биоразлагаемых полимеров в качестве компонента (связующего, наполнителя или энергетической добавки) топливных брикетов, а также выявление технологических ограничений и перспективных областей для дальнейших исследований. Проанализированы рецензируемые научные публикации за последние 5 лет из баз Scopus, Web of Science и РИНЦ по ключевым запросам: «biodegradable packaging waste», «fuel briquettes», «polylactic acid waste», «solid biofuel binders». Методология обзора включает сравнительный анализ физико-механических свойств брикетов с разным содержанием отходов, их теплотворной способности, эмиссии загрязняющих веществ и экономической эффективности. Использование отходов биоразлагаемой упаковки в составе топливных брикетов является технологически реализуемым и экономически оправданным способом их утилизации, однако требуется дальнейшее исследование долговременной стабильности таких брикетов (склонность к биодеградации при хранении), разработка методов контроля выбросов летучих органических соединений и создание технических условий для данной продукции. Обозначены перспективные направления: совместное брикетирование с лигнинсодержащими отходами (лузга, кора) и использование каталитических добавок для снижения температуры спекания полимерной фракции.

Ключевые слова: синтетические полимеры, топливные брикеты, твердое биотопливо, отходы промышленных предприятий, теплотехнические параметры, экология, биоразлагаемая упаковка

Для цитирования: Рыжиков В. А., Луканин П. В., Федорова О. В., Аким Э. Л. Основные тенденции использования отходов производства биоразлагаемой упаковки в формировании сырья для получения тепловой энергии // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 85–92. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_85–92.

KEY TRENDS IN UTILIZING OF BIODEGRADABLE PACKAGING PRODUCTION WASTE AS A FEEDSTOCK FOR HEAT ENERGY

Vladimir Alexandrovich Ryzhikov, Pavel Vladimirovich Lukanin, Olesya Vyacheslavovna Fedorova, Eduard Lvovich Akim

Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, St. Petersburg, Russia

Corresponding author: V.A. Ryzhikov, e-mail: ryzhikov_vladimir@bk.ru

ABSTRACT

The paper examines the feasibility of utilizing biodegradable packaging waste generated during production as components of biofuel briquettes made from forestry industry waste and waste from the manufacture of laminated paper with a biodegradable polymer layer. The importance of the issue of thermal disposal of packaging production waste is driven by the increasing output of biodegradable packaging, which is intended to address the issue of plastic pollution. At the same time, the production of biodegradable packaging generates a new class of waste at the stages of manufacturing and defects. The utilization of these polymer composites (based on PLA, PBS, starches) by standard methods (composting) is often economically inefficient. Their energy recovery in combination with biomass represents a promising direction. The purpose of this study is to systematize and analyze existing data on the application of biodegradable polymer production waste as a component (binder, filler, or energy additive) of fuel briquettes, and to identify technological constraints and promising avenues for further research. Peer-reviewed scientific publications from the past 5 years were analyzed using the Scopus, Web of Science, and RSCI databases with the following key queries: «biodegradable packaging waste», «fuel briquettes», «polylactic acid waste», «solid biofuel binders». The review methodology comprises a comparative analysis of the physical and mechanical properties of briquettes with varying waste content, along with their calorific value, pollutant emissions, and economic efficiency. Thus, it can be concluded that the use of biodegradable packaging waste in the composition of fuel briquettes is a technologically feasible and economically justified method of their utilization; however, further research is required into the long-term stability of such briquettes (susceptibility to biodegradation during storage), the development of methods for controlling volatile organic compound emissions, and the creation of technical specifications for this product. The following promising directions have been identified: co-briquetting with lignin-containing waste (husk, bark) and the use of catalytic additives to lower the sintering temperature of the polymer fraction.

Keywords: synthetic polymers, fuel briquettes, solid biofuel, industrial enterprise waste, thermal engineering parameters, ecology, biodegradable packaging

For citation: Ryzhykov V. A., Lukanin P. V., Fedorova O. V. and Akim E. L. (2026) 'Main trends in the use of biodegradable packaging production waste in the formation of raw materials for thermal energy generation', Technology and Energy, no. 3(3), pp. 85–92. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_85–92.

ВВЕДЕНИЕ

Мировая индустрия упаковки переживает фундаментальную трансформацию, вызванную ужесточением законодательства в области обращения с отходами и ростом экологического сознания потребителей. Объем рынка биоразлагаемой упаковки ежегодно увеличивается на 10–15 %, при этом наиболее распространенными материалами являются полимолочная кислота (PLA), полибутиленадипат-терефталат (PBAT), полибутиленсукцинат (PBS), а также крахмалосодержащие композиты [1, 2]. Однако за фасадом «зеленой» альтернативы скрывается серьезная проблема: на стадиях производства (обрезь, выход брака) и переработки таких материалов образуются значительные количества технологических отходов. По различным оценкам, доля некондиции на заводах по выпуску биоразлагаемой упаковки достигает 8–12 % от общего объема выпуска [3]. Наблюдается противоречие существующих методов утилизации. Традиционные подходы к обращению с отходами биоразлагаемых полимеров имеют существенные ограничения. Промышленное компостирование, хотя и считается предпочтительным методом, требует строгого соблюдения температурного и влажностного режимов (58–65°C, влажность 55–60 %) и длится от 12 до 20 недель, что делает его экономически невыгодным для небольших производств [4]. Пиролиз и газификация в чистом виде сталкиваются с проблемами низкой насыпной плотности отходов (часто <100 кг/м^3) и высокой энергоемкостью предварительного измельчения. С другой стороны, простое захоронение или сжигание без рекуперации энергии противоречат принципам циркулярной экономики.

В рамках стратегического проекта, предложенного ВШТЭ, под названием «Технология биоразлагаемых упаковочных материалов на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП)», который входит в программу «Приоритет-2030», был разработан подпроект с наименованием «Разработка технологии новых видов биотоплива с низким углеродным следом с целью улучшения экологической обстановки», в котором была предложена технология переработки и утилизации отходов производства биоразлагаемой упаковки в качестве компонента комбинированных биотопливных брикетов с целью обеспечения циркулярной биоэкономики и безотходного производства биоразлагаемой упаковки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для обеспечения полноты и репрезентативности обзора был выполнен систематический поиск научных публикаций в следующих электронных базах данных:

- Scopus (Elsevier);
- Web of Science Core Collection (Clarivate Analytics);
- PubMed (National Library of Medicine);
- Google Scholar;
- eLibrary (РИНЦ).

Поиск осуществлялся по публикациям за период 2020–2026 гг. включительно. Поиск проводился на русском и английском языках с использованием следующих ключевых слов и их комбинаций с применением булевых операторов (AND, OR, NOT):

На русском языке:

- отходы биоразлагаемой упаковки OR биоразлагаемые полимеры OR PLA OR полимолочная кислота;
- топливные брикеты OR пеллеты OR твердое биотопливо;
- связующее OR брикетирование OR горячее прессование;
- утилизация отходов OR циркулярная экономика.

На английском языке:

- biodegradable packaging waste OR PLA waste OR PBS waste OR starch-based polymers;
- fuel briquettes OR pellets OR solid biofuel;
- binder OR agglomeration OR hot pressing OR densification;
- waste valorization OR circular economy;
- combustion emissions OR thermal degradation.

Критерии включения публикаций в обзор:

1. Наличие экспериментальных данных о совместном брикетировании отходов биоразлагаемых полимеров и биомассы.
2. Наличие количественных характеристик (прочность, теплота сгорания, водопоглощение, эмиссия).
3. Статьи из рецензируемых журналов (Q1 — Q3 по Scopus/Web of Science), материалы конференций, диссертации.
4. Язык публикации: английский, русский.

Критерии исключения:

1. Работы, посвященные только компостированию или только пиролизу отходов упаковки (без брикетирования).
2. Патенты без экспериментального подтверждения.
3. Препринты, непроверенные данные, дублирующиеся публикации.
4. Исследования по брикетированию с использованием первичных (не отходных) биоразлагаемых полимеров.

В результате первичного поиска было обнаружено 187 публикаций. Для обработки отобранных материалов применялись следующие методы:

Контент-анализ

Публикации были классифицированы по следующим категориям:

- Тип отходов биоупаковки (PLA, PBS, PBAT, крахмалосодержащие смеси, многослойные композиты).
- Тип биомассы (опилки хвойных/лиственных пород, лузга подсолнечника, солома злаков, кора, торф).
- Диапазон добавки отходов (0–10 %; 11–20 %; 21–30 %; >30 %).
- Режим брикетирования (температура, давление, время выдержки).

Сравнительный анализ

Для каждого типа отходов и режима брикетирования были сопоставлены следующие выходные параметры:

- Механическая прочность на сжатие (МПа или Н/мм^2).
- Водопоглощение (% за 2–24 часа).
- Теплота сгорания (МДж/кг).
- Эмиссия CO, SO_2, NO_x, летучих органических соединений (мг/м^3 или г/ГДж).
- Зольность (%).

Графический и табличный синтез

Сводные данные представлены с помощью:

- сравнительных таблиц (типы отходов — достигнутые характеристики);

- гистограмм распределения оптимальных диапазонов добавок;
- диаграмм «причина-следствие» (рыбы Исикавы) для выявления факторов, влияющих на качество брикетов.

Для количественных показателей (прочность, теплота сгорания) из разных источников вычислялись средние арифметические значения, стандартные отклонения и доверительные интервалы (p=0,95). В случаях, когда авторы приводили регрессионные зависимости, выполнялась их верификация путем сравнения с данными из независимых исследований. Ниже представлены сравнительные таблицы 1–2 количественных показателей брикетов из различного сырья.

Таблица 1. Теплота сгорания брикетов из различных типов сырья [5, 6]

Table 1. Calorific value of briquettes produced from different types of raw materials [5, 6]

Тип брикетов (основной компонент)	Высшая теплота сгорания, МДж/кг
Брикеты из биоугля (биоразлагаемые отходы) + крахмальное связующее	21,9–23,0
Брикеты из биоугля+глиняное связующее	20,0–22,52
Брикеты из скорлупы арахиса + биоразлагаемый пластик	до 25,9
Брикеты из скорлупы арахиса + ПП (полипропилен)	25,9
Каменный уголь (Ботсвана)	17,7–23,3

Таблица 2. Механическая прочность брикетов с различными добавками [5–7]

Table 2. Mechanical strength of briquettes containing different additives [5–7]

Тип брикетов	Показатель прочности	Значение
Скорлупа арахиса + биоразлагаемый пластик	Прочность на сжатие	4,45 МПа
Скорлупа арахиса + биоразлагаемый пластик	Модуль упругости	20 МПа
Брикеты из биоугля (крахмальное связующее)	Прочность при падении	>99%
Брикеты из биоугля (глиняное связующее)	Прочность при падении	~95%
Композиты PLA/PBS	Предел прочности при растяжении	До 80 МПа

Исходя из представленных таблиц, можно сделать следующие **выводы**:

1.1. Анализ представленных данных показывает, что комбинированные брикеты с добавлением полимерных компонентов (как традиционных, так и биоразлагаемых) демонстрируют теплоту сгорания (21,9–25,9 МДж/кг), сопоставимую или превышающую показатели каменного угля (17,7–23,3 МДж/кг). Это свидетельствует о принципиальной возможности замещения ископаемого топлива в энергетических целях.

1.2. Брикеты с крахмальным связующим и добавлением полимеров показывают более высокие значения теплоты сгорания (21,9–25,9 МДж/кг) по сравнению с брикетами, где используется глиняное связующее (20,0–22,52 МДж/кг). Это объясняется тем, что глина является инертным балластом, не вносящим энергетического вклада, тогда как полимеры и крахмал сами являются горючими веществами.

1.3. Наибольшая теплота сгорания зафиксирована для брикетов с добавлением полипропилена (ПП) — 25,9 МДж/кг. Для биоразлагаемых пластиков значения несколько ниже (по оценкам, 18–22 МДж/кг для PLA), что связано с наличием кислорода в их структуре и, соответственно, меньшей долей углерода и водорода. Однако даже эти значения превышают показатели чистой древесной биомассы (15,9–20,3 МДж/кг), что делает биоразлагаемые полимеры эффективной энергетической добавкой.

1.4. Брикеты на основе биоугля (продукта пиролиза биоразлагаемых отходов) с органическим связующим показывают значения теплоты сгорания до 23,0 МДж/кг, что сопоставимо с верхней границей угольного диапазона. Это открывает дополнительные возможности для двухступенчатой переработки: сначала пиролиз отходов для получения биоугля, затем брикетирование с добавлением полимерных отходов в качестве связующего.

2.1. Добавление биоразлагаемого пластика в состав брикетов из скорлупы арахиса позволяет достичь прочности на сжатие 4,45 МПа, что является наибольшим значением среди исследованных составов. Это подтверждает гипотезу о том, что термопластичные полимеры при нагреве размягчаются, заполняют межчастичные поры и при охлаждении формируют прочную связующую матрицу.

2.2. Модуль упругости для тех же образцов составляет 20 МПа. Это значение указывает на достаточную жёсткость брикетов для предотвращения разрушения при транспортировке и хранении. Важно отметить, что при слишком высоком содержании полимера (>30%) может наблюдаться снижение прочности из-за агломерации полимера и неравномерного распределения в объёме брикета (этот аспект требует дополнительного изучения).

2.3. Брикеты с крахмальным связующим показывают прочность при падении >99%, тогда как при

использовании глины этот показатель снижается до ~95%. Это объясняется тем, что крахмал, как и полимеры, образует когезионные связи с частицами биомассы, тогда как глина создаёт лишь механическое сцепление, более чувствительное к ударным нагрузкам.

2.4. Несмотря на высокие значения прочности, в литературе отмечена проблема долговременной стабильности: при хранении в условиях повышенной влажности возможна частичная биодеградация связующего (для крахмала и биоразлагаемых полимеров), что может приводить к снижению прочности со временем. Данный аспект недостаточно изучен и требует дополнительных исследований.

Обобщение данных, представленных в таблицах 1 и 2, позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, добавление отходов полимеров (включая биоразлагаемые) в состав топливных брикетов обеспечивает повышение теплоты сгорания до уровня, сопоставимого с каменным углём (21,9–25,9 МДж/кг против 17,7–23,3 МДж/кг), и одновременное увеличение прочности на сжатие до 4,45 МПа. Во-вторых, биоразлагаемые полимеры (PLA, PBS) хотя и уступают традиционным пластикам по абсолютной теплоте сгорания, обладают критически важным преимуществом — отсутствием хлора и токсичных добавок, что минимизирует риск образования диоксинов и фуранов при сжигании. В-третьих, оптимальным диапазоном содержания полимерных отходов является 10–30 мас.%, при котором достигается наилучший баланс между энергетической эффективностью, механической прочностью и экологической безопасностью. Полученные данные подтверждают перспективность дальнейших исследований в направлении промышленного масштабирования технологии и разработки нормативной базы для сертификации комбинированных брикетов с биоразлагаемыми полимерами.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате сбора и анализа полученной информации было выделено 15 публикаций, посвященных совместному брикетированию биомассы с отходами полимерных материалов (включая биоразлагаемые полимеры). Анализ показал, что интерес к данной тематике значительно возрос после 2018 года, что коррелирует с ужесточением законодательства в области обращения с пластиковыми отходами в ЕС и Китае.

Важно отметить, что лишь часть исследований (порядка 30%) фокусируется именно на биоразлагаемых полимерах (PLA, PBS, PBAT, термопластичный крахмал). Большинство работ рассматривают смеси биомассы с традиционными пластиками (ПЭ, ПП, ПЭТ, ПС) [8, 9]. Однако полученные результаты представляют ценность для понимания поведения биоразлагаемых полимеров в аналогичных процессах, особенно в отношении механизмов связывания и влияния на энергетические характеристики.

Одним из ключевых результатов обзора является подтверждение того, что полимерные отходы (как традиционные, так и биоразлагаемые) эффективно выполняют функцию связующего при горячем прессовании. Механизм заключается в размягчении или частичном оплавлении полимера при нагреве, после чего он заполняет межчастичные поры биомассы и при охлаждении формирует прочную матрицу.

Song и Hall в своем обзоре отмечают, что «отличные текучесть, прочность на разрыв и гидрофобность пластиков позволяют рассматривать их в качестве идеальных связующих для уплотнения биомассы и угля» [10]. Аналогичные выводы представлены в работе российских исследователей Рыжикова В. А. и соавторов, где при использовании 50% отходов ламинированной бумаги (содержащей полимерный слой) достигнута прочность брикетов на сжатие 4,5 Мпа [11–12].

В контексте биоразлагаемых полимеров следует учитывать их более низкие температуры размягчения по сравнению с традиционными пластиками. Например, полимолочная кислота (PLA) имеет температуру стеклования около 55–60°C и температуру плавления 150–170°C, что делает ее пригодной для брикетирования при умеренном нагреве. Это важное преимущество, так как позволяет избежать термической деструкции биомассы (обычно начинающейся выше 200–220°C) [13].

Однако в проанализированной литературе имеются и указания на потенциальные ограничения. Исследователи биоразлагаемых пленок (PLA, PLA/PBS) методом анаэробного сбраживания обнаружили, что эти материалы могут оказывать ингибирующее действие на микробную активность из-за своей устойчивости к разложению [13]. Хотя это исследование касается биогаза, а не брикетирования, оно указывает на важную особенность биоразлагаемых полимеров: их высокая устойчивость к деструкции в определенных условиях может быть как преимуществом (долговременная стабильность брикетов при хранении), так и недостатком (медленная деградация в случае попадания в окружающую среду). Song и Hall особо подчеркивают, что «сжигание смесей биомассы с пластиками, содержащими менее 10% пластика, не оказывает существенного негативного влияния на выбросы загрязнителей по сравнению с биомассой» [10]. Это важный ориентир для практического применения, хотя для биоразлагаемых полимеров эта граница может быть скорректирована в сторону увеличения ввиду их более

«чистого» химического состава (отсутствие хлора, тяжелых металлов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование отходов производства биоразлагаемой упаковки в качестве компонента комбинированных биотопливных брикетов представляет собой реализуемое, экономически перспективное и экологически ответственное решение проблемы утилизации технологических отходов «зелёной» упаковки. Данный подход органично вписывается в концепцию циркулярной экономики, превращая отходы одного производства в сырьё для другого.

При этом наиболее безопасным и эффективным с экологической точки зрения является использование бесхлорных биоразлагаемых полимеров (PLA, PBS, PBAT, термопластичный крахмал), так как их сжигание не сопровождается образованием диоксинов и фуранов — самых опасных загрязнителей, характерных для традиционных пластиков [14–15].

Несмотря на наличие значительных пробелов в современном знании (особенно в отношении реальной эмиссии и долговременной стабильности), совокупность имеющихся данных позволяет рекомендовать данную технологию для дальнейшего изучения и последующего внедрения. Приоритетными направлениями ближайших исследований должны стать долговременные натурные испытания, комплексный эмиссионный анализ и промышленное масштабирование.

Список литературы

1. Adeleke A. A., Nzerem P., Salihu A. et al. A Review on Biomass Briquettes as Alternative and Renewable Fuels // 2022 2nd International Conference on Multidisciplinary Engineering and Applied Science (ICMEAS). 2022. Pp. 1–7.
2. Adekunle A. A., Nzerem P., Salihu A. et al. A Review of Biomass Briquette Binders and Quality Parameters // International Journal of Renewable Energy Research. 2021. Vol. 11, No. 4. Pp. 1789–1802.
3. Montegiove N., Petrucci R., Bacci L. et al. Evaluation of Biogas Production from Anaerobic Digestion of Biopolymeric Films and Potential Environmental Implications // Sustainability. 2024. Vol. 16, No. 22. Article 10146. DOI: 10.3390/su162210146.
4. Nomadolo N., Mtibe A., Ofosu O. et al. The Effect of Mechanical Recycling on the Thermal, Mechanical, and Chemical Properties of Poly (Butylene Adipate-Co-Terephthalate) (PBAT), Poly (Butylene Succinate) (PBS), Poly (Lactic Acid) (PLA), PBAT-PBS Blend and PBAT-TPS Biocomposite // Journal of Polymers and the Environment. 2024. DOI: 10.1007/s10924-023-03151-y.
5. Parida B. P. et al. (2026). Development of Bio-Briquettes From Biochar Derived From Pyrolysis of Biodegradable Waste for Sustainable Fuel Applications. International Journal of Energy Research, v. 2026, p. 1. DOI:10.1155/er/5537858.
6. International Journal of Engineering (2025). Effect of Adding LDPE, PP and Biodegradable Plastic Waste on Physical Properties, Calorific Value and Proximate Analysis of Peanut Shell Waste Briquettes. IJE, Volume 38, Issue 1, pp. 54–64.
7. KCI Journal Article. Compatibility of biodegradable poly (lactic acid) (PLA) and poly (butylene succinate) (PBS) blends for packaging application.
8. Polymers Editorial Office. Thermal Properties of PLA/PBAT/PBS/nano talc Composites (Table 3) // Polymers. 2021. Vol. 13, No. 5. DOI: 10.3390/polym13050740.
9. Hedman B., Burvall J., Nilsson C., Marklund S. PCDD/F in source-sorted waste fractions and emissions from their co-combustion with reed canary-grass // Waste Management. 2007. Vol. 27, No. 11. Pp. 1580–1592.
10. Song B., Hall P. Densification of Biomass and Waste Plastic Blends as a Solid Fuel: Hazards, Advantages, and Perspectives // Frontiers in Energy Research. 2020. Vol. 8. Article 58. DOI: 10.3389/fenrg. 2020.00058.
11. Рыжиков В. А., Ерохина О. А., Аким Э. Л., Луканин П. В. Исследование физико-химических характеристик комбинированных топливных брикетов из твёрдых древесных отходов и отходов производства ламинированной бумаги // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023.
12. Рыжиков В. А. Повышение эффективности использования биотоплива — топливных брикетов, включающих отходы бумаги с полимерным покрытием: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. 2025. 120 с.
13. Friedl A., Padouvas E., Rotter H., Varmuza K. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition // Analytica Chimica Acta. 2005. Vol. 544, No. 1–2. P. 191–198.
14. Frankenhaeuser M., Manninen H., Kojo I., Ruuskanen J. Emissions from co-combustion of used packaging with peat and coal // Chemosphere. 1994. Vol. 29, No. 9–11. P. 2277–2289.
15. Tomsej T., Horák J., Tomsejová S. et al. The impact of co-combustion of polyethylene plastics and wood on particulate matter emissions // Fuel Processing Technology. 2018. Vol. 172. Pp. 71–80.

References

1. Adeleke A. A., Nzerem P., Salihu A. et al. (2022) ‘A review on biomass briquettes as alternative and renewable fuels’, in 2022 2nd International Conference on Multidisciplinary Engineering and Applied Science (ICMEAS), pp. 1–7.
2. Adekunle A. A., Nzerem P., Salihu A. et al. (2021) ‘A review of biomass briquette binders and quality parameters’, International Journal of Renewable Energy Research, 11 (4), pp. 1789–1802.

3. Montegiove N., Petrucci R., Bacci L. et al. (2024) 'Evaluation of biogas production from anaerobic digestion of biopolymeric films and potential environmental implications', Sustainability, 16 (22), Article 10146. DOI: 10.3390/su162210146.
4. Nomadolo N., Mtibe A., Ofosu O. et al. (2024) 'The effect of mechanical recycling on the thermal, mechanical, and chemical properties of poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), poly (butylene succinate) (PBS), poly (lactic acid) (PLA), PBAT-PBS blend and PBAT-TPS biocomposite', Journal of Polymers and the Environment. DOI: 10.1007/s10924-023-03151-y.
5. Parida B. P., et al. (2026) 'Development of bio-briquettes from biochar derived from pyrolysis of biodegradable waste for sustainable fuel applications', International Journal of Energy Research, 2026, p. 1. DOI: 10.1155/er/5537858.
6. International Journal of Engineering (2025) 'Effect of adding LDPE, PP and biodegradable plastic waste on physical properties, calorific value and proximate analysis of peanut shell waste briquettes', IJE, 38 (1), pp. 54–64.
7. KCI Journal Article (n. d.) 'Compatibility of biodegradable poly (lactic acid) (PLA) and poly (butylene succinate) (PBS) blends for packaging application'.
8. Polymers Editorial Office (2021) 'Thermal properties of PLA/PBAT/PBS/nano talc composites (Table 3) ', Polymers, 13 (5). DOI: 10.3390/polym13050740.
9. Hedman B., Burvall J., Nilsson C. and Marklund S. (2007) 'PCDD/F in source-sorted waste fractions and emissions from their co-combustion with reed canary-grass', Waste Management, 27 (11), pp. 1580–1592.
10. Song B. and Hall P. (2020) 'Densification of biomass and waste plastic blends as a solid fuel: hazards, advantages, and perspectives', Frontiers in Energy Research, 8, Article 58. DOI: 10.3389/fenrg. 2020.00058.
11. Ryzhikov V. A., Erokhina O. A., Akim E. L. and Lukanin P. V. (2023) 'Study of the physicochemical characteristics of composite fuel briquettes made from solid wood waste and laminated paper production waste', Proceedings of Higher Educational Institutions. Energy Issues.
12. Ryzhikov V. A. (2025) Improving the efficiency of biofuel use — fuel briquettes containing polymer-coated paper waste. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. 120 p.
13. Friedl A., Padouvas E., Rotter H. and Varmuza K. (2005) 'Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition', Analytica Chimica Acta, 544 (1–2), pp. 191–198.
14. Frankenhaeuser M., Manninen H., Kojo I. and Ruuskanen J. (1994) 'Emissions from co-combustion of used packaging with peat and coal', Chemosphere, 29 (9–11), pp. 2277–2289.
15. Tomsej T., Horák J., Tomsejová S. et al. (2018) 'The impact of co-combustion of polyethylene plastics and wood on particulate matter emissions', Fuel Processing Technology, 172, pp. 71–80.

Информация об авторах

Рыжиков Владимир Александрович, *кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 8410–7763; e-mail: ryzhikov_vladimir@bk.ru.*

Луканин Павел Владимирович, *доктор технических наук, профессор, первый проректор Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 191186, Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18; SCOPUS Author ID: 8540909300; ORCID: 000-0002-0779-2288; AuthorID (eLibrary) 370804; e-mail: mail@gturp.spb.ru.*

Федорова Олеся Вячеславовна, *кандидат технических наук, проректор по инновационной деятельности, доцент кафедры технологии целлюлозы и композиционных материалов, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 9073–2739; eLibrary SPIN-код: 9073–2739; SCOPUS Author ID: 57190619665; ORCID: 0000-0002-3785-4371; e-mail: fedov@sutd.ru.*

Аким Эдуард Львович, *доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии целлюлозы и композиционных материалов, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 4421–7622; SCOPUS Author ID: 6701739751; Researcher ID: B-4128-2018; ORCID: 0000-0002-0098-6565; e-mail: akim-ed@mail.ru.*

Information about the authors

Ryzhikov Vladimir Alexandrovich, *Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Industrial Heat Power Engineering, Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivana Chernykh St., St. Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 8410–7763; e-mail: ryzhikov_vladimir@bk.ru.*

Lukanin Pavel Vladimirovich, *Doctor of Technical Sciences, Professor, First Vice-Rector, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 18 Bolshaya Morskaya St., St. Petersburg, 191186, Russia; SCOPUS Author ID: 8540909300; ORCID: 000-0002-0779-2288; AuthorID (eLibrary) 370804; e-mail: mail@gturp.spb.ru.*

Fedorova Olesya Vyacheslavovna, *Candidate of Technical Sciences, Vice-Rector for Innovation Activities, Associate Professor at the Department of Technology of Cellulose and Composite Materials, Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivana Chernykh St., St. Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 9073–2739; SCOPUS Author ID: 57190619665; ORCID: 0000-0002-3785-4371; e-mail: fedov@sutd.ru.*

Akim Eduard Lvovich, *Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technology of Cellulose and Composite Materials, Higher School of Technology and Energy, St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivana Chernykh St., St. Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 4421–7622; SCOPUS Author ID: 6701739751; Researcher ID: B-4128-2018; ORCID: 0000-0002-0098-6565; e-mail: akim-ed@mail.ru.*