Научная статья

УДК 504.064:628.4.034

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СЦЕНАРИЕВ ОБРАЩЕНИЯ С ОСТАТОЧНЫМИ ТВЁРДЫМИ КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ: ЗАХОРОНЕНИЕ, СЖИГАНИЕ, ГАЗИФИКАЦИЯ И ПИРОЛИЗ

Букин Илья Олегович, кандидат технических наук, главный научный сотрудник, Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского, Россия, Владивосток, bukin.i@rambler.ru

Аннотация. Выполнено сопоставление экологических профилей четырёх сценариев финальной стадии обращения с остаточной фракцией твёрдых коммунальных отходов, не подлежащей вторичной материальной переработке: полигонного захоронения с активной дегазацией, прямого сжигания в колосниковой топке, газификации в кипящем слое и низкотемпературного пиролиза. Функциональной единицей принято обращение с 1 тонной остаточного субстрата фиксированного морфологического состава с низшей теплотой сгорания 10,5 МДж/кг. Инвентаризационные данные получены из эксплуатационной документации действующих предприятий и верифицированных литературных источников. Расчёт потенциальных воздействий проведён по семи категориям метода ReCiPe Midpoint (H) с применением подхода системного расширения границ. Анализ чувствительности и сценарное моделирование методом Монте-Карло охватили вариабельность влажности, содержания пластиков, КПД электрогенерации и углеродоёмкости замещаемого энергетического микса. Установлено отсутствие универсального технологического решения, обладающего безусловным экологическим превосходством. Выявлены диапазоны технологических и энергетических параметров, при которых меняется сравнительная экологическая эффективность сценариев. Показано, что переход от прямого сжигания к газификации или пиролизу экологически оправдан исключительно при

стабильной теплотворной способности субстрата, наличии инфраструктуры для безопасной иммобилизации специфических шлаков и высоком углеродном следе замещаемой электроэнергии.

Ключевые слова: оценка жизненного цикла; остаточные коммунальные отходы; захоронение; мусоросжигание; газификация; пиролиз.

Original article

COMPARATIVE LIFE CYCLE ASSESSMENT OF RESIDUAL MUNICIPAL SOLID WASTE MANAGEMENT SCENARIOS: BURIAL, INCINERATION, GASIFICATION AND PYROLYSIS

Bukin Ilia Olegovich, Candidate of Technical Sciences, Chief Researcher, Maritime State University named after Admiral G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russia, bukin.i@rambler.ru

Abstract. A comparison of the environmental profiles of four final-stage management scenarios for the residual fraction of municipal solid waste not subject to secondary material recycling was performed: landfill disposal with active degassing, direct combustion in a grate furnace, fluidized bed gasification, and low-temperature pyrolysis. The functional unit was the management of 1 ton of residual substrate of a fixed morphological composition with a net heating value of 10.5 MJ/kg. Inventory data were obtained from the operating documentation of existing facilities and verified literature sources. Potential impacts were calculated across seven categories of the ReCiPe Midpoint (H) method using a systemic boundary expansion approach. Sensitivity analysis and Monte Carlo scenario modeling covered variability in moisture content, plastic content, power generation efficiency, and the carbon intensity of the energy mix being replaced. The absence of a universal technological solution with unconditional environmental superiority has been established. Ranges of technological and energy parameters have been identified where the comparative effectiveness of scenarios inverts. It has been shown that the transition from direct combustion to

gasification or pyrolysis is environmentally justified only with a stable calorific value of the substrate, the availability of infrastructure for the safe immobilization of specific slags, and a high carbon footprint of the electricity being replaced.

Keywords: life cycle assessment; residual municipal waste; landfilling; incineration; gasification; pyrolysis.

Актуальность и степень разработанности проблемы исследования. Глобальный объем образования твердых коммунальных отходов (ТКО) достиг 2,01 млрд тонн в год, и, согласно прогнозам, к 2050 году эта цифра увеличится до 3,40 млрд тонн [1]. Несмотря на то, что в ряде развитых регионов, например, на севере Италии, уровень селективного сбора и последующей переработки достигает 50–70%, в общем потоке всегда сохраняется значительная доля несортируемых остатков [2]. Эта фракция, составляющая от 55 до 90% от общей массы, характеризуется низким содержанием вторичных материальных ресурсов, но обладает высокой теплотворной способностью за счет горючих компонентов [3]. В связи с этим перед муниципалитетами и природоохранными ведомствами остро встает вопрос выбора финальной стадии обращения с такими остатками, требующий учета не только экономических затрат, но и комплексного экологического ущерба.

Традиционное захоронение на полигонах все чаще признается наименее предпочтительным сценарием, поскольку сопряжено с образованием значительных объемов парниковых газов, в частности метана и диоксида углерода, а также рисками загрязнения почв и грунтовых вод фильтратом [4]. Альтернативой выступает термическая обработка, которая позволяет радикально уменьшить объем отходов и рекуперировать энергию. В современной инженерной практике применяются три основных направления термохимической конверсии: прямое сжигание в топках мусоросжигательных заводов, газификация и пиролиз [5]. При этом простой переход на наилучшие доступные технологии не гарантирует абсолютной экологической безопасности.

Как показывают исследования, модернизация газоочистного оборудования для снижения выбросов оксидов азота или твердых частиц зачастую требует дополнительных энергозатрат, что может косвенно увеличивать общий углеродный след системы [6], [7].

Объективное выявление наиболее экологически целесообразного сценария требует выхода за рамки оценки только локальных выбросов в атмосферу и учета полного жизненного цикла технологий [8]. Методология оценки жизненного цикла (LCA) является стандартным инструментом подобных комплексных исследований, однако ее применение в сфере обращения с отходами связано с рядом методологических сложностей [9]. Результаты расчетов оказываются крайне чувствительными к заданным системным границам и правилам распределения нагрузки. В частности, учет или игнорирование биогенного углерода, выбор функциональной единицы (будь то тонна переработанных отходов или киловатт-час полученной электроэнергии), а также способ аллокации воздействий между основными и побочными продуктами, например шлаком или летучей золой, способны кардинально изменить итоговые баллы [10]. Не менее важен учет предотвращенных воздействий, связанных с отказом от захоронения, поскольку этот фактор нередко смещает сравнительную оценку в пользу термических методов и снижает относительный вес их прямых воздействий.

В рамках исследования предпринята попытка системного сопоставления четырех сценариев утилизации остаточных ТКО: полигонного захоронения, прямого сжигания, газификации и пиролиза. Анализ основан на фактических данных эксплуатации действующих промышленных объектов, расположенных в различных странах, что позволяет снизить погрешности, характерные для теоретических моделей. Особое внимание уделено тому, как вариативность подходов к оценке жизненного цикла — от экономического распределения нагрузки до системного расширения с учетом избегаемых воздействий — влияет на итоговый экологический профиль технологий. Полученные результаты могут

быть использованы для обоснования управленческих решений в области проектирования и модернизации систем обращения с твердыми коммунальными отходами.

Развитие циркулярной экономики сместило внимание природоохранной инженерии со смешанного потока твердых коммунальных отходов (ТКО) на остаточные фракции, не подлежащие вторичной материальной переработке. Именно эта фракция, составляющая от 55 до 90 % общей массы образующихся отходов, обладает высокой теплотворной способностью, но низким ресурсным потенциалом [11-13]. Выбор финальной стадии обращения с таким субстратом требует учета комплексного экологического ущерба. Традиционное полигонное захоронение, сопровождающееся образованием метана и фильтрата, все чаще уступает место термохимической переработке [14]. Однако внедрение наилучших доступных технологий (НДТ) не гарантирует абсолютной экологической безопасности. Модернизация газоочистного оборудования для снижения локальных выбросов зачастую требует дополнительных энергозатрат, что косвенно увеличивает углеродный след системы [15].

Методология оценки жизненного цикла (LCA) является общепризнанным инструментом подобных комплексных исследований, однако ее применение в сфере утилизации отходов связано с существенными методологическими ограничениями [16]. Результаты расчетов оказываются крайне чувствительными к заданным системным границам и правилам распределения нагрузки. Исследования последних лет, в частности работы итальянских специалистов в области экологического инжиниринга, показали, что учет биогенного углерода и выбор между экономическим распределением нагрузки и системным расширением могут существенно изменить итоговые оценки и даже привести к противоположным выводам при сопоставлении сжигания и газификации [17], [18]. Отсутствие унифицированных правил категорий продукции (PCR) для технологий Waste-to-Energy (WtE) приводит к тому, что оценка экологической эффективности сценария может в значительной степени зависеть от выбранной

расчетной модели [19].

Методология исследования. Функциональной единицей сравнительной оценки является обращение с 1 т остаточных твёрдых коммунальных отходов после извлечения фракций, предназначенных для вторичной материальной переработки. В качестве альтернатив рассматриваются полигонное захоронение с улавливанием свалочного газа, прямое сжигание с энергетической утилизацией, газификация и пиролиз. Сопоставление выполняется при едином принятом морфологическом составе отходов и согласованных системных границах. Для каждого сценария требуется учитывать потребление электроэнергии и топлива, прямые технологические выбросы, транспортирование, образование твёрдых остатков и изменение внешних потоков энергии при замещении сетевой генерации. Для обеспечения физической сопоставимости сценариев зафиксирован единый морфологический и химический состав поступающей массы, представленный в таблице 1.

Таблица 1 - Характеристика функциональной единицы и границы оцениваемой системы

Параметр / Компонент	Значение / Описание
Морфологический состав (мас. %)	Органическая фракция – 32; Бумага/картон – 14; Пластики – 26; Текстиль – 9; Стекло – 6; Металлы – 2; Инертные материалы (зола, камни) – 11.
Физико-химические показатели	Влажность – 28 %; Низшая теплота сгорания (LHV) – 10,5 МДж/кг; Содержание биогенного углерода – 41 % от общей массы углерода.
Системные границы (включены)	Транспортирование (до 50 км); предварительная подготовка (доизмельчение); термическая переработка; система газоочистки; обращение со шлаками, золой, летучими остатками и углеродистым остатком; производство и экспорт энергии; конечное размещение неутилизированных остатков.
Правила аллокации	Для побочных продуктов (металлы, шлак, тепло) применен метод системного расширения с учетом замещения первичных материалов и энергии.
Учет углерода	Биогенный CO_2 учтен как нейтральный (фактор потенциала глобального потепления = 0); ископаемый углерод (из пластиков) учтен с фактором 1.

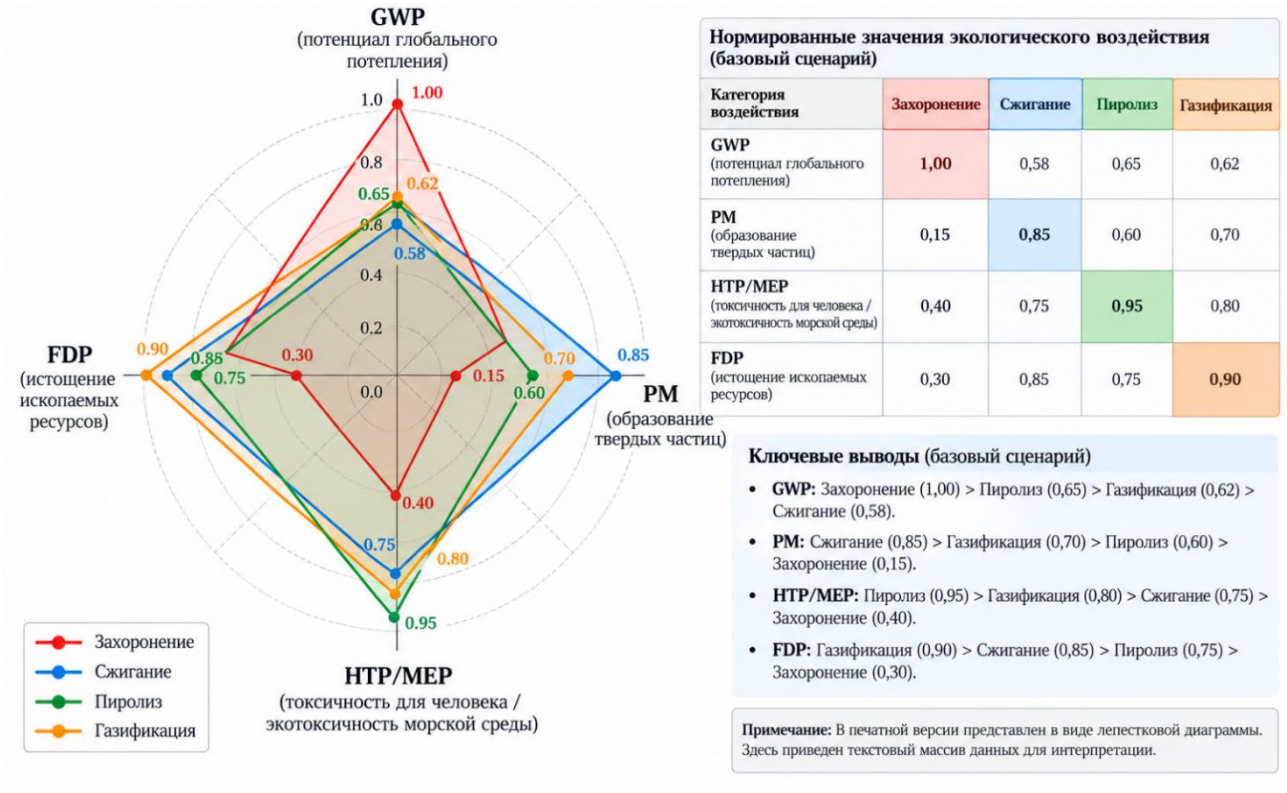
Источник: разработано автором.

Влияние энергетической утилизации отходов на итоговые показатели жизненного цикла зависит от состава электроэнергии, производство которой

рассматривается как замещённое. В настоящей работе энергетический микс используется в качестве сценарного параметра. При отсутствии указания региона, года и удельного коэффициента выбросов нельзя считать подтверждённым, что использована конкретная средневзвешенная структура энергоснабжения. Для сравнительной интерпретации необходимо рассматривать не менее двух контрастных условий: замещение относительно углеродоёмкой генерации и замещение генерации с более низкими удельными выбросами. Результаты в категориях климатического воздействия следует характеризовать применительно к принятому набору параметров, не распространяя их автоматически на другие энергетические системы.

Результаты исследования. Базовое сопоставление четырех сценариев (полигон с активной дегазацией, прямое сжигание в колосниковой топке, газификация в кипящем слое и низкотемпературный пиролиз) выявило существенные различия в профилях воздействия. Сценарий полигонного захоронения демонстрирует наихудшие показатели в категории GWP (до 1,1 т CO_2-экв. на 1 т отходов) за счет диффузных выбросов метана, даже с учетом эффективности сбора биогаза на уровне 55 %. При этом прямые выбросы твердых частиц и оксидов азота здесь минимальны.

Термические сценарии демонстрируют обратную картину. Прямое сжигание обеспечивает наиболее стабильные показатели в категориях AP, EP и PM, что обусловлено зрелостью технологий газоочистки (многоступенчатые скрубберы, тканевые фильтры, селективное каталитическое восстановление). Газификация и пиролиз, напротив, приводят к образованию специфических твердых остатков — углеродистого и плавленого шлака, требующих отдельного анализа на токсичность.



Нормированные значения экологического воздействия (базовый сценарий)

Категория воздействия	Захоронение	Сжигание	Пиролиз	Газификация
GWP (потенциал глобального потепления)	**1,00**	0,58	0,65	0,62
PM (образование твердых частиц)	0,15	**0,85**	0,60	0,70
HTP/MEP (токсичность для человека / экотоксичность морской среды)	0,40	0,75	**0,95**	0,80
FDP (истощение ископаемых ресурсов)	0,30	0,85	0,75	**0,90**

Ключевые выводы (базовый сценарий)

- **GWP:** Захоронение (1,00) > Пиролиз (0,65) > Газификация (0,62) > Сжигание (0,58).
- **PM:** Сжигание (0,85) > Газификация (0,70) > Пиролиз (0,60) > Захоронение (0,15).
- **HTP/MEP:** Пиролиз (0,95) > Газификация (0,80) > Сжигание (0,75) > Захоронение (0,40).
- **FDP:** Газификация (0,90) > Сжигание (0,85) > Пиролиз (0,75) > Захоронение (0,30).

Примечание: В печатной версии представлен в виде лепестковой диаграммы. Здесь приведен текстовый массив данных для интерпретации.

Рисунок 1 - Матрица нормированных значений экологического воздействия (базовый сценарий) (источник: разработано автором)

Интерпретация матрицы показывает, что газификация и пиролиз не обладают безусловным экологическим преимуществом. Для этих технологий характерны более высокие показатели токсичности и потребления ресурсов, что связано с необходимостью использования вспомогательных материалов при запуске и поддержании процесса, а также с образованием концентрированных токсичных остатков, требующих захоронения на специализированных полигонах.

Обсуждение результатов исследования. Абсолютное ранжирование технологий оказывается некорректным без учета вариабельности исходных параметров. Чувствительность сравнительных результатов оценки жизненного цикла к изменению исходных условий рассматривается по нескольким ключевым параметрам: низшей теплоте сгорания отходов, содержанию влаги, эффективности энергетической утилизации, коэффициенту улавливания свалочного газа и характеристикам замещаемой электроэнергии. Изменение указанных параметров способно влиять на относительное положение четырёх

технологических сценариев. Вместе с тем применение метода Монте-Карло предполагает определение вероятностных распределений входных переменных, числа реализаций и статистических характеристик выходных результатов. Рассмотренные зависимости характеризуются как качественный сценарный анализ чувствительности.

Критическим фактором, определяющим баланс в категории GWP, выступает углеродоемкость замещаемой сетевой энергии. При переходе от угольного энергомикса к газопоршневой генерации с когенерацией, экологические кредиты за выработанную электроэнергию снижаются на 35–40 %, что сближает показатели сжигания и газификации и делает полигонное захоронение с усовершенствованной дегазацией относительно более предпочтительным по экологическим показателям в краткосрочной перспективе (до 15 лет).

Влажность и теплота сгорания остаточной фракции оказывают нелинейное влияние на эффективность пиролиза. Низшая теплота сгорания и влажность остаточных отходов существенно влияют на энергетический баланс термических процессов. При уменьшении теплотворной способности может возрастать потребность во внешнем подводе энергии, однако конкретное пороговое значение зависит от типа установки, тепловых потерь, режима эксплуатации и характеристик предварительной подготовки материала.

Оценка потенциального вторичного загрязнения при термической обработке отходов должна учитывать состав и количество золы, шлаков, остатков газоочистки и иных побочных материалов. При использовании данных, опубликованных в других исследованиях, соответствующие результаты необходимо отделять от собственных расчётов и сопровождать точными ссылками. Категории человеческой токсичности и экотоксичности в LCA выражают потенциал воздействия в принятых системных границах и не тождественны индивидуальному санитарному риску.

Таким образом, корректная интерпретация инвентаризационных данных

требует отказа от поиска единственно верного технологического решения. Экологическая эффективность сценариев обращения с остаточными ТКО зависит от внешних инфраструктурных условий.

По результатам комплексного моделирования жизненного цикла установлено, что не существует универсального сценария, обладающего безусловным экологическим превосходством по всем категориям воздействия одновременно. Установлены диапазоны технологических и энергетических параметров, при которых меняется сравнительная экологическая эффективность различных сценариев обращения с остаточными ТКО. В частности, переход от прямого сжигания к газификации или пиролизу экологически целесообразен исключительно при условии стабильной теплоты сгорания субстрата не ниже 10,5 МДж/кг, наличии региональных мощностей для безопасной утилизации специфических шлаков и высоком углеродном следе замещаемой электроэнергии. При иных исходных данных зрелые технологии прямого сжигания с многоступенчатой газоочисткой обеспечивают минимальный совокупный экологический ущерб для атмосферного бассейна и здоровья населения.

Выводы. Результаты моделирования жизненного цикла показывают, что определение однозначно предпочтительной технологии термической обработки остаточных фракций твердых коммунальных отходов некорректно без предварительного задания единых методологических правил оценки. Проведенный анализ не позволяет выделить единственную универсальную технологию, обладающую безусловным превосходством по всем категориям воздействия одновременно. Ключевым фактором, определяющим итоговый природоохранный профиль, выступает выбранный подход к учету побочных продуктов и замещаемых потоков. Переход от экономического распределения нагрузки к методу системного расширения, а также учет предотвращенных воздействий, связанных с отказом от полигонного размещения, могут существенно изменить сравнительные оценки. В частности, при учете

избегаемых воздействий показатели потенциала глобального потепления для мусоросжигания и газификации снижаются настолько, что эти сценарии начинают рассматриваться как обеспечивающие итоговый экологический выигрыш, тогда как изолированная оценка прямых выбросов без учета замещения сетевой энергии выводит на первые позиции традиционное прямое сжигание.

Физико-химические характеристики поступающего субстрата накладывают не менее строгие ограничения на природоохранную эффективность процессов. Установлено, что снижение низшей теплоты сгорания ниже пороговых значений требует ввода внешних энергоносителей для поддержания эндотермических реакций в реакторах газификации и пиролиза. Это обстоятельство резко увеличивает потребление ископаемых ресурсов и нивелирует преимущества альтернативных методов термохимической конверсии. Одновременно с этим, зрелость систем газоочистки на предприятиях прямого сжигания обеспечивает стабильно низкие удельные выбросы оксидов азота и твердых частиц в пересчете на тонну переработанной массы, что делает прямое сжигание наиболее предсказуемым решением с точки зрения воздействия на качество атмосферного воздуха. При этом газификация и пиролиз генерируют специфические твердые остатки, требующие отдельного анализа на токсичность, поскольку нарушение технологического режима в реакторах приводит к экспоненциальному росту коэффициента выщелачивания тяжелых металлов из углеродистого шлака.

Сравнение термических методов с полигонным размещением выявило четкую зависимость от эффективности сбора биогаза. При коэффициентах улавливания свалочного газа, не превышающих 55 %, углеродный след полигонного сценария многократно превышает показатели любого варианта термической утилизации, даже с учетом образования ископаемого диоксида углерода при окислении пластиковой фракции. Следовательно, экологическая предпочтительность технологий Waste-to-Energy зависит от внешних

инфраструктурных условий. Термическая конверсия становится безальтернативным сценарием при наличии в регионе инфраструктуры для безопасной иммобилизации токсичных шлаков, стабильной поставке высококалорийного остаточного топлива и высоком углеродном следе замещаемого энергетического микса. В иных условиях, особенно при высокой доле биогенного углерода в отходах и низкой эффективности действующих систем дегазации полигонов, совокупный ущерб от прямого сжигания с многоступенчатой очисткой дымовых газов оказывается сопоставимым или даже более приемлемым, чем риски, связанные с образованием и последующим захоронением специфических остатков пиролиза и газификации.

Список литературы

1. Park M.-J., Yun S., Jeong D.-W., Won W. Upcycling Municipal Solid Waste: Scenario-Based Techno-Economic Evaluation and Life Cycle Assessment // Energy. 2025. Vol. 329. Art. 136786. DOI: 10.1016/j.energy.2025.136786.
2. Колибаба О. Б., Козлова М. В., Гаряев А. Б. Современные тенденции в сфере обращения с твердыми коммунальными отходами: проблемы и перспективы. Обзор // Вестник МЭИ. 2024. № 4. С. 90–107. DOI: 10.24160/1993-6982-2024-4-90-107.
3. Ouedraogo A. S., Kumar A., Frazier R., Sallam K. A. Comparative Life Cycle Assessment of Landfilling with Sustainable Waste Management Methods for Municipal Solid Wastes // Environments. 2024. Vol. 11. No. 11. Art. 248. DOI: 10.3390/environments11110248.
4. Khoshgoftar Manesh M. H., Davadgaran S., Mousavi Rabeti S. A. Gasification Potential of Municipal Solid Waste in Iran: Application of Life Cycle Assessment, Risk Analysis, and Machine Learning // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 434. Art. 140177. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140177.
5. Массеров Д. А., Кирюшин А. В., Вавилин Д. А., Храмова А. А., Кирюхин В. О., Шиляев И. И. Оценка состояния системы обращения с твердыми коммунальными отходами в России // Международный научно-

исследовательский журнал. 2024. № 5 (143). DOI: 10.60797/IRJ.2024.143.27.

6. Kovács V. B. et al. Life Cycle Assessment of a Micro-Region Hungarian Municipal Solid Waste: Evaluation of Six Waste-to-Energy Scenarios // Energy Conversion and Management. 2023. Vol. 294. Art. 117568. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117568.

7. Sun H., Li W., Wang J., Qin X. et al. Integrated Assessment of Environmental and Economic Impact of Municipal Solid Waste Incineration for Power Generation: A Case Study in China // Heliyon. 2024. Vol. 10. No. 13. Art. e33700. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e33700.

8. Безуглов Р. В., Ильин В. Б., Папин В. В., Яковенко Р. Е. Численное моделирование газификации твердых отходов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». 2025. Т. 25. № 1. С. 77–87. DOI: 10.14529/power250108.

9. Chicaiza-Ortiz C., Peñafiel-Arcos P., Herrera-Feijoo R. J., Ma W., Logroño W., Tian H., Yuan W. Waste-to-Energy Technologies for Municipal Solid Waste Management: Bibliometric Review, Life Cycle Assessment, and Energy Potential Case Study // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 480. Art. 143993. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143993.

10. Кулумбегов Р. В., Делицын Л. М., Попель О. С., Карпов А. И., Свечникова Н. Ю., Рябов Ю. В. Переработка твердых продуктов пиролиза коммунальных отходов с получением энергетического топлива // Теплоэнергетика. 2024. № 11. С. 80–92. DOI: 10.56304/S0040363624700383.

11. Castagnoli A., Salem A. M., Desideri U., Pecorini I. Environmental Assessment of Gasification and Green Hydrogen Potential Role in Waste Management Decarbonization // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 482. Art. 144174. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.144174.

12. Хасиятуллов М. Р., Кудрин А. В., Павлов Г. И., Горбунова О. А. Утилизация ТКО методом непрерывного низкотемпературного пиролиза // Твердые бытовые отходы. 2023. № 10 (208). С. 57–61.

13. Nurcahyati M., Rachmawati S., Abdul Matin H. H., Suryadi I., Purwono P. Life

Cycle Assessment Gasification Process of Municipal Solid Waste into Electrical Energy at Putri Cempo Landfill Indonesia // International Journal of Environmental Impacts. 2025. P. 299–309. DOI: 10.18280/ijei.080210.

14. Ceraso A., Cesaro A. Life Cycle Sustainability Assessment of Municipal Solid Waste Management Systems: A Review // Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 368. Art. 122143. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122143.

15. Raj R. S., Jain S., Sharma A. K. et al. Life Cycle Assessment of MSW-to-Biofuel Conversion Pathways: A Comparative Analysis // Scientific Reports. 2026. Vol. 16. Art. 8932.

16. González-Mallén V., Salhofer S. P. Including Advanced Thermochemical Technologies in Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Municipal Organic Waste Management Systems: A Systematic Review // Waste Management. 2026. Vol. 219. Art. 115537. DOI: 10.1016/j.wasman.2026.115537.

17. Habib K., Chehab L. E. L., Damgaard A. Life Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Management in the Region of Waterloo, Canada // Waste Management. 2026. Vol. 222. Art. 115627. DOI: 10.1016/j.wasman.2026.115627.

18. Costa E., Oshita K., Takaoka M. Global Warming Potential Assessment of Municipal Solid Waste Management in Greater Lisbon // Waste Management. 2026. Vol. 220. Art. 115609. DOI: 10.1016/j.wasman.2026.115609.

19. Maçin K. E. Life Cycle Assessment of Recovery Scenarios for Municipal Solid Waste Management: A Case Study of Amasya // Environmental Research and Technology. 2026. Vol. 9. Special Issue. P. 62–70. DOI: 10.35208/ert.1801433.

References

1. Park M.-J., Yun S., Jeong D.-W., Won W. Upcycling Municipal Solid Waste: Scenario-Based Techno-Economic Evaluation and Life Cycle Assessment // Energy. 2025. Vol. 329. Art. 136786. DOI: 10.1016/j.energy.2025.136786.

2. Kolibaba O. B., Kozlova M. V., Garyaev A. B. Sovremenny`e tendencii v sfere obrashheniya s tverdy`mi kommunal`ny`mi otxodami: problemy` i perspektivy`. Obzor // Vestnik ME`I. 2024. № 4. S. 90–107. DOI: 10.24160/1993-6982-2024-4-90-107.

3. Ouedraogo A. S., Kumar A., Frazier R., Sallam K. A. Comparative Life Cycle Assessment of Landfilling with Sustainable Waste Management Methods for Municipal Solid Wastes // Environments. 2024. Vol. 11. No. 11. Art. 248. DOI: 10.3390/environments11110248.

4. Khoshgoftar Manesh M. H., Davadgaran S., Mousavi Rabeti S. A. Gasification Potential of Municipal Solid Waste in Iran: Application of Life Cycle Assessment, Risk Analysis, and Machine Learning // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 434. Art. 140177. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.140177.

5. Masserov D. A., Kiryushin A. V., Vavilin D. A., Xramova A. A., Kiryuxin V. O., Shilyaev I. I. Ocenka sostoyaniya sistemy` obrashheniya s tverdy`mi kommunal`ny`mi otxodami v Rossii // Mezhdunarodny`j nauchno-issledovatel`skij zhurnal. 2024. № 5 (143). DOI: 10.60797/IRJ.2024.143.27.

6. Kovács V. B. et al. Life Cycle Assessment of a Micro-Region Hungarian Municipal Solid Waste: Evaluation of Six Waste-to-Energy Scenarios // Energy Conversion and Management. 2023. Vol. 294. Art. 117568. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117568.

7. Sun H., Li W., Wang J., Qin X. et al. Integrated Assessment of Environmental and Economic Impact of Municipal Solid Waste Incineration for Power Generation: A Case Study in China // Heliyon. 2024. Vol. 10. No. 13. Art. e33700. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e33700.

8. Bezuglov R. V., Il`in V. B., Papin V. V., Yakovenko R. E. Chislennoe modelirovanie gazifikacii tverdy`x otxodov // Vestnik Yuzhno-Ural`skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «E`nergetika». 2025. T. 25. № 1. S. 77–87. DOI: 10.14529/power250108.

9. Chicaiza-Ortiz C., Peñafiel-Arcos P., Herrera-Feijoo R. J., Ma W., Logroño W., Tian H., Yuan W. Waste-to-Energy Technologies for Municipal Solid Waste Management: Bibliometric Review, Life Cycle Assessment, and Energy Potential Case Study // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 480. Art. 143993. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143993.

10. Kulumbegov R. V., Delicyn L. M., Popel` O. S., Karpov A. I., Svechnikova N. Yu.,

Ryabov Yu. V. Pererabotka tverdy`x produktov piroliza kommunal`ny`x otxodov s polucheniem e`nergeticheskogo topliva // Teploe`nergetika. 2024. № 11. S. 80–92. DOI: 10.56304/S0040363624700383.

11. Castagnoli A., Salem A. M., Desideri U., Pecorini I. Environmental Assessment of Gasification and Green Hydrogen Potential Role in Waste Management Decarbonization // Journal of Cleaner Production. 2024. Vol. 482. Art. 144174. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.144174.

12. Xasiyatullov M. R., Kudrin A. V., Pavlov G. I., Gorbunova O. A. Utilizaciya TKO metodom neprery`vnogo nizkotemperaturnogo piroliza // Tverdy`e by`tovy`e otxody`. 2023. № 10 (208). S. 57–61.

13. Nurcahyati M., Rachmawati S., Abdul Matin H. H., Suryadi I., Purwono P. Life Cycle Assessment Gasification Process of Municipal Solid Waste into Electrical Energy at Putri Cempo Landfill Indonesia // International Journal of Environmental Impacts. 2025. P. 299–309. DOI: 10.18280/ijei.080210.

14. Ceraso A., Cesaro A. Life Cycle Sustainability Assessment of Municipal Solid Waste Management Systems: A Review // Journal of Environmental Management. 2024. Vol. 368. Art. 122143. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.122143.

15. Raj R. S., Jain S., Sharma A. K. et al. Life Cycle Assessment of MSW-to-Biofuel Conversion Pathways: A Comparative Analysis // Scientific Reports. 2026. Vol. 16. Art. 8932.

16. González-Mallén V., Salhofer S. P. Including Advanced Thermochemical Technologies in Comparative Life Cycle Assessment (LCA) of Municipal Organic Waste Management Systems: A Systematic Review // Waste Management. 2026. Vol. 219. Art. 115537. DOI: 10.1016/j.wasman.2026.115537.

17. Habib K., Chehab L. E. L., Damgaard A. Life Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Management in the Region of Waterloo, Canada // Waste Management. 2026. Vol. 222. Art. 115627. DOI: 10.1016/j.wasman.2026.115627.

18. Costa E., Oshita K., Takaoka M. Global Warming Potential Assessment of Municipal Solid Waste Management in Greater Lisbon // Waste Management. 2026.

Vol. 220. Art. 115609. DOI: 10.1016/j.wasman.2026.115609.

19. Maçin K. E. Life Cycle Assessment of Recovery Scenarios for Municipal Solid Waste Management: A Case Study of Amasya // Environmental Research and Technology. 2026. Vol. 9. Special Issue. P. 62–70. DOI: 10.35208/ert.1801433.

Статья поступила в редакцию 05.02.2026; одобрена после рецензирования 19.03.2026; принята к публикации 01.09.2026.

The article was submitted 05.02.2026; approved after peer review 19.03.2026; accepted for publication 01.09.2026.