

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ТЕХНОЛОГИЯХ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ И ПРОИЗВОДСТВА RDF-ТОПЛИВА

Гурман В.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
г. Минск, Республика Беларусь

Научный руководитель: Ильясова М.С. – магистр, ассистент кафедры ИПиЭ

Аннотация. Статья посвящена всестороннему техническому анализу применения методов искусственного интеллекта, прежде всего компьютерного зрения и нейросетевых алгоритмов, в технологиях переработки твердых коммунальных отходов и производства RDF-топлива в Республике Беларусь. Рассматриваются нормативные и стратегические предпосылки модернизации отрасли, физико-химические характеристики RDF, требования к его качеству, архитектура интеллектуальных сортировочных линий, сенсорные системы и выбор нейросетевых моделей для классификации материалов в реальном времени. Приведены сравнительные характеристики RDF и традиционных энергоносителей, проанализирована мировая практика внедрения ИИ в отрасли и дана оценка экономической и экологической эффективности подобных решений.

Ключевые слова: искусственный интеллект, RDF-топливо, компьютерное зрение, сортировка отходов, нейросети, NIR-спектрометрия, аналитика данных, экономика замкнутого цикла

Введение. В рамках Национальной стратегии развития экономики замкнутого цикла Республики Беларусь до 2035 года поставлена задача достичь 90 % повторного использования твердых коммунальных отходов, что требует модернизации сортировочных мощностей и внедрения интеллектуальных систем автоматизации [1]. Традиционные методы сортировки (механические сепараторы, магнитные установки, ручной труд) не обеспечивают требуемой точности при работе со смешанными полимерными и комбинированными материалами. При производстве RDF-топлива это критично: недостаточная точность сортировки снижает его теплотворную способность и стабильность состава, увеличивая экологические риски.

Основная часть. В Республике Беларусь отрасль обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) находится в стадии активной цифровой и технологической трансформации. Реализуется система раздельного сбора вторичных материальных ресурсов, проводится реконструкция мусоросортировочных комплексов и увеличиваются мощности переработки. В частности, модернизируются крупные объекты, такие как сортировочные линии на полигоне «Тростенецкий» в Минске, проектной мощностью до 600 тыс. тонн в год [2].

На отдельных предприятиях, включая завод вторичных ресурсов «Восточный» (Могилевская область), внедряются пилотные решения по автоматизированной сортировке полимерных отходов с использованием компьютерного зрения. Параллельно развивается направление производства RDF-топлива для цементной промышленности и энергетических установок, где оно используется как частичный заменитель угля.

Нормативные требования к RDF в Республике Беларусь ориентированы на обеспечение стабильной низшей теплоты сгорания, ограничение содержания хлора (как правило, не более 1 %), снижение зольности и минимизацию примесей тяжелых металлов [3]. Соответствие этим параметрам напрямую зависит от эффективности автоматической селекции фракций.

RDF представляет собой твердое восстановленное топливо, получаемое из высококалорийных фракций твердых коммунальных отходов путем удаления инертных и опасных компонентов, последующего измельчения, сушки и гомогенизации. Основу RDF составляют полимерные материалы, текстиль, бумага и другие горючие фракции.

Сравнительный анализ энергетических характеристик RDF и традиционных видов топлива представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительные характеристики RDF и традиционных энергоносителей

Показатель	RDF	Каменный уголь	Природный газ
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	14–25	20–30	~50
Влажность, %	≤20	–	–
Зольность, %	15–30	12–25	практически отсутствует
Содержание хлора, %	≤1	–	практически отсутствует
Содержание серы, %	≤0,5	≤2	–

Ключевой технологической задачей является исключение ПВХ и других хлорсодержащих пластиков, поскольку их сгорание приводит к образованию коррозионно-активных соединений и токсичных выбросов. Таким образом, качество RDF напрямую определяется точностью автоматизированной сортировки. Интеллектуальная линия сортировки включает сенсорный блок, вычислительный блок, систему исполнительных механизмов и программный модуль искусственного интеллекта. Сенсорный блок формируется на основе комплекса датчиков. В его состав входят RGB-камеры высокого разрешения, обеспечивающие получение базовой визуальной информации о цвете и текстуре объектов, и NIR-спектрометры диапазона 900–1700 нм.

Вычислительный блок реализуется на базе графических процессоров (GPU) или FPGA-платформ, обеспечивающих выполнение нейронных сетей в режиме реального времени с задержкой менее 100 мс. Программный модуль ИИ включает модели сегментации и классификации, определяющие тип материала, вероятность принадлежности к целевой фракции, координаты и скорость движения объекта. Система исполнительных механизмов (пневмосепараторы, механические отбойники и роботизированные манипуляторы) осуществляет физическое разделение фракций в соответствии с принятым решением.

Алгоритм функционирования системы включает последовательные этапы мультисенсорного сканирования, предобработки данных, сегментации объектов, классификации по вероятностным признакам, расчета траектории движения и определения момента срабатывания исполнительного механизма. Такая архитектура минимизирует ложные срабатывания и повышает долю целевых фракций в конечном топливе.

Для реализации автоматической сортировки применяются современные модели глубокого обучения. Алгоритмы семейства YOLO (версии v5–v8) обеспечивают детекцию объектов в реальном времени и подходят для обработки конвейерного потока со скоростью реакции порядка 50–100 мс. Mask R-CNN используется для точной сегментации перекрывающихся объектов. Сверточные нейронные сети типа ResNet и EfficientNet применяются для высокоточной классификации на основе RGB- и NIR-данных.

Международный опыт демонстрирует значительный эффект от внедрения интеллектуальных систем. Норвежская компания TOMRA сообщает о достижении точности разделения пластиков до 95 % при использовании нейросетевых алгоритмов в оптических сепараторах [4]. Финская компания ZenRobotics внедрила роботизированные манипуляторы с ИИ-классификацией, обеспечивающие до 3000 операций сортировки в час с точностью позиционирования ±5 мм [5]. Американская компания AMP Robotics демонстрирует повышение качества сортировки пластиковых фракций на 20–30 % при сокращении ручного труда до 70–80 % [6]. В цементной промышленности Японии использование компьютерного зрения позволило снизить содержание ПВХ в RDF на 30–40 % по сравнению с традиционными линиями [7]. Применение глубоких нейросетей увеличивает точность классификации отходов в среднем на 12–18 % по сравнению с оптическими методами без интеллектуальной обработки данных [8].

Применение искусственного интеллекта в автоматизации сортировки позволяет увеличить долю качественного RDF на 15–25 %, снизить затраты на ручной труд на 60–80%, сократить операционный цикл сортировки на 30–40 % [9].

Закключение. Анализ технических требований, состояния отрасли в Республике Беларусь и мировой практики показывает, что искусственный интеллект является ключевым технологическим драйвером модернизации системы переработки отходов и производства RDF-топлива. Интеграция мультисенсорных систем (RGB + NIR + 3D), высокопроизводительных нейросетевых архитектур и аналитики данных позволяет существенно повысить точность сортировки, увеличить долю качественного RDF,

минимизировать влияние человеческого фактора и обеспечить экономическую и экологическую устойчивость отрасли. Это формирует основу для перехода к полностью цифровым и адаптивным производственным системам переработки отходов.

Перспективы развития связаны с внедрением edge-AI, расширением использования IoT-датчиков, обучением моделей на локальных белорусских данных и стандартизацией национальных требований к контролю качества RDF. Комплексное и технически обоснованное внедрение ИИ-технологий позволит Республике Беларусь достичь стратегических целей в области экономики замкнутого цикла и устойчивого промышленного развития.

Список литературы

1. Национальная стратегия развития экономики замкнутого цикла до 2035 года. – Утв. постановлением Совета Министров Респ. Беларусь, 20.12.2023, № 521. – Минск, 2023.
2. Официальный сайт ГУ «Оператор вторичных материальных ресурсов» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vtooperator.by>. – Дата доступа: 04.03.2026.
3. ТКП 17.11-08-2020 (02120) Охрана окружающей среды и природопользование. Отходы. Топливо из отходов (RDF). Технические условия. – Минск: Госстандарт, 2020.
4. TOMRA Sorting Solutions. Case Study: Increased Plastic Purity with AI [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.tomra.com>. – Date of access: 04.03.2026.
5. ZenRobotics. ZenRobotics 4.0: Technical Specifications [Electronic resource]. – Mode of access: <https://zenrobotics.com>. – Date of access: 04.03.2026.
6. AMP Robotics. 2024 Impact Report [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.amprobotics.com>. – Date of access: 04.03.2026.
7. Suzuki, T. Application of AI Vision Systems in Japanese Cement Industry for RDF Quality Improvement / T. Suzuki, K. Tanaka // *Journal of Material Cycles and Waste Management*. – 2023. – Vol. 45, № 3. – P. 215–223.
8. Wang, L. Deep Learning for Waste Classification: A Comprehensive Review / L. Wang, Y. Zhang // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – 2024. – Vol. 20, № 2. – P. 1542–1557.
9. Wilts, H. Artificial Intelligence in the Sorting of Municipal Waste as an Enabler of the Circular Economy / H. Wilts, B. R. García, R. G. Gómez // *Resources*. – 2021. – Vol. 10, № 4. – Article 28.

UDC 004.932:628.472.3

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN WASTE RECYCLING TECHNOLOGIES AND RDF FUEL PRODUCTION

Gurman V.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Ilyasova M.S. – Master of Sci., assistant of the Department of EPE

Annotation. The article provides a comprehensive technical analysis of artificial intelligence (AI) applications, primarily computer vision and neural network algorithms, in municipal solid waste (MSW) recycling technologies and refuse-derived fuel (RDF) production in the Republic of Belarus. The study examines the regulatory and strategic prerequisites for industry modernization, the physicochemical characteristics of RDF, and its quality requirements. Furthermore, it details the architecture of intelligent sorting lines, sensor systems, and the selection of neural network models for real-time material classification. The paper presents a comparative analysis of RDF versus traditional energy sources, reviews global practices of AI implementation in the industry, and evaluates the economic and environmental efficiency of such solutions.

Keywords: artificial intelligence, RDF fuel, computer vision, waste sorting, neural networks, NIR spectrometry, data analytics, circular economy.