

УДК 628.4.047:662.6

Серая Н.М., Серый С.В., Жегулина М.А.

магистрант 2 года обучения по направлению 20.04.01

Техносферная безопасность

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный

исследовательский университет»

Россия, г. Белгород

**КОМПЛЕКСНАЯ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И
ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОСФЕРНОЙ
БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА RDF-ТОПЛИВА ИЗ ТВЕРДЫХ
КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ (НА ПРИМЕРЕ КПО «ВОСТОК»)**

Аннотация. В статье представлены результаты комплексного исследования технологических, экологических и экономических аспектов производства RDF-топлива (Refuse Derived Fuel) на комплексе по переработке отходов КПО «Восток» (Московская область). Экспериментально обоснованы оптимизированные режимы биологической сушки и оптической сепарации ПВХ-содержащих фракций, обеспечивающие снижение содержания хлора в готовом продукте с 0,98 % до 0,55 %. Разработана регрессионная модель прогнозирования теплоты сгорания RDF ($R^2 = 0,92$). Проведена эколого-экономическая оценка, подтверждающая сокращение выбросов парниковых газов на 235,5 тыс. т CO₂-экв./год и рентабельность производства на уровне 26 %.

Ключевые слова: RDF-топливо, техносферная безопасность, твердые коммунальные отходы, биологическая сушка, оптическая сепарация, хлор, парниковые газы, цементная промышленность.

Seraya N.M., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor

Seriy S.V., Master's student

Belgorod State National Research University

Russia, Belgorod

**COMPREHENSIVE ECOLOGICAL AND ECONOMIC
ASSESSMENT AND OPTIMIZATION OF TECHNOGENIC SAFETY
PARAMETERS IN RDF FUEL PRODUCTION FROM MUNICIPAL
SOLID WASTE (CASE STUDY OF WASTE TREATMENT COMPLEX
"VOSTOK")**

Abstract. The article presents the results of a comprehensive study of technological, environmental, and economic aspects of RDF (Refuse Derived Fuel) production at the "Vostok" waste treatment complex (Moscow region). Optimized modes of biodrying and optical separation of PVC-containing fractions have been experimentally substantiated, ensuring a reduction in chlorine content in the final product from 0.98 % to 0.55 %. A regression model for predicting the calorific value of RDF ($R^2 = 0.92$) has been developed. An environmental and economic assessment has been carried out, confirming a reduction in greenhouse gas emissions by 235.5 thousand tons of CO₂-eq./year and a production profitability of 26 %.

Keywords: RDF fuel, technogenic safety, municipal solid waste, biodrying, optical separation, chlorine, greenhouse gases, cement industry.

Введение. Проблема обращения с твердыми коммунальными отходами (ТКО) в Российской Федерации сохраняет высокую остроту ввиду значительных объемов их образования и недостаточной глубины переработки. Ежегодно в стране образуется более 60 млн тонн ТКО, при этом основная масса по-прежнему размещается на полигонах, что приводит к деградации земель, загрязнению водных объектов и эмиссии парниковых газов. В этих условиях приоритетное значение приобретает

внедрение технологий, позволяющих извлекать энергетический потенциал из неперерабатываемой части отходов [1].

Одним из перспективных направлений является производство RDF-топлива (Refuse Derived Fuel) из предварительно сортированных и подготовленных отходов. Данная технология, получившая широкое распространение в странах Европейского союза, позволяет эффективно замещать ископаемое топливо в цементной промышленности и теплоэнергетике [2]. В России это направление находится на начальном этапе развития, однако уже функционируют отдельные промышленные объекты, среди которых ключевое место занимает КПО «Восток» — крупнейший в Восточной Европе комплекс по переработке отходов [3].

Техносферная безопасность производства RDF-топлива определяется комплексом факторов, включающих технологические риски (пожаровзрывоопасность, эмиссия загрязняющих веществ), экологические последствия (выбросы парниковых газов, образование токсичных соединений) и экономическую эффективность мероприятий по снижению негативного воздействия. Критическим параметром, влияющим на экологическую безопасность сжигания RDF, является содержание хлора, поскольку именно хлор является прекурсором образования диоксинов и фуранов, а также обуславливает высокотемпературную коррозию оборудования [4].

Цель настоящей работы заключается в комплексной оценке параметров техносферной безопасности производства RDF-топлива на КПО «Восток» и оптимизации ключевых технологических режимов для минимизации экологических рисков при обеспечении экономической эффективности.

Методы и материалы исследования. Объектом исследования является комплекс по переработке отходов «Восток», расположенный в городском округе Егорьевск Московской области. КПО «Восток»

включает четыре основных технологических передела: участок приема и предварительной обработки, участок автоматической сортировки, участок компостирования и участок производства RDF. Проектная мощность линии RDF составляет 700 тыс. тонн в год [5].

Отбор проб «хвостов» сортировки и готового RDF осуществлялся по стандартизированной методике с ежемесячной периодичностью в течение 2023 года. Лабораторные исследования проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 33503-2015 (влажность), ГОСТ 11022-95 (зольность), ГОСТ 6382-2001 (выход летучих веществ). Элементный анализ (C, H, N, S, Cl) выполнялся на автоматическом CHNS-анализаторе Thermo Scientific FlashSmart, содержание хлора определялось методом ионной хроматографии после сжигания в калориметрической бомбе по EN 15408:2011. Теплота сгорания определялась на калориметре ИКА С1 по ГОСТ 147-2013. Для исследования термического поведения образцов использовался синхронный термоанализатор Netzsch STA 449 F5 Jupiter (нагрев до 1000 °C в токе синтетического воздуха).

Оптимизация параметров оптической сепарации ПВХ-содержащих фракций выполнялась на сепараторах TOMRA Autosort путем варьирования скорости конвейерной ленты (2,5–3,2 м/с) и задержки срабатывания пневмоклапанов (2–4 мс). Исследование биологической сушки проводилось в промышленном туннеле объемом загрузки 356 т с мониторингом температуры в трех точках бурта и влажности материала в течение 11-суточного цикла.

Математическая обработка результатов включала статистический анализ, корреляционный анализ и множественный регрессионный анализ с использованием пакета Python 3.11 (библиотеки pandas, numpy, scipy.stats, statsmodels). Проверка статистических гипотез выполнялась при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Результаты исследования. Характеристика сырья и материальные потоки. Морфологический состав поступающих на КПО «Восток» ТКО (усредненные данные за 2023 год) представлен следующими компонентами: пищевые отходы – 26,8 %, бумага и картон – 23,5 %, полимеры (всего) – 16,2 % (в том числе ПВХ – 1,2 %), стекло – 6,5 %, текстиль – 4,8 %, черные металлы – 3,2 %, цветные металлы – 1,1 %, древесина – 1,9 %, прочие компоненты – 15,0 %. Установлена выраженная сезонная динамика: доля «хвостов» сортировки возрастает с 76 % в зимний период до 81 % в летние месяцы, что обусловлено увеличением содержания пищевых отходов.

Годовой объем «хвостов» сортировки, являющихся сырьем для RDF, составил 933 тыс. тонн. На основе балансовых испытаний определен сквозной выход готового RDF – 42,7 % (398,5 тыс. т/год). Основные потери массы приходятся на отсев мелкой фракции (<40 мм) – 27,5 %, биологическую сушку (испарение влаги и разложение органики) – 27,8 % и оптическую сепарацию ПВХ – 9,3 %.

Оптимизация процесса биологической сушки. Исследование динамики биосушки в промышленном туннеле (начальная влажность 54,2 %) показало классическую двухстадийную картину: экзотермическая фаза (2–6 сутки, температура бурта до 55 °С) обеспечивает интенсивное удаление влаги (снижение с 51,8 % до 33,5 %), после чего процесс переходит в фазу затухания и охлаждения. Общее снижение влажности за 11-суточный цикл составило 32,7 % (с 54,2 % до 21,5 %).

Получена регрессионная зависимость продолжительности биосушки (τ , сут.) от начальной влажности (W_0 , %): $\tau = 0,51 \cdot W_0 - 16,1$, $R^2 = 0,89$. Уравнение справедливо для диапазона $W_0 = 48\text{--}58$ % при температуре подаваемого воздуха 35–38 °С и целевом значении конечной влажности 22 %.

Для холодного периода года (ноябрь–март) разработан и внедрен оптимизированный режим с повышенной температурой подаваемого воздуха: 35–40 °С в первые 5 суток с последующим снижением до 28–30 °С. Режим позволил сократить продолжительность цикла с 15 до 11 суток (на 27 %) при незначительном росте суммарного энергопотребления (с 33,3 до 35,0 кВт·ч/т). Годовой экономический эффект оценивается в 12,5 млн руб.

Оптимизация сепарации ПВХ-содержащих фракций. Экспериментальное варьирование параметров оптических сепараторов TOMRA Autosort показало, что критическими факторами эффективности удаления ПВХ являются скорость конвейера и задержка срабатывания пневмоклапанов. Снижение скорости с 3,2 до 2,8 м/с и уменьшение задержки с 4 до 3 мс позволили повысить эффективность извлечения ПВХ с 68 % до 89 %, снизив при этом ложный отбор с 12 % до 7 %.

Внедрение оптимизированных настроек на всех 8 сепараторах линии RDF обеспечило снижение содержания хлора в готовом продукте с $0,98 \pm 0,15$ % до $0,55 \pm 0,08$ %. Доля проб с содержанием хлора выше 1,0 % (граница класса 3 по EN 15359) сократилась с 38 % до нуля, что соответствует классу 2 по европейскому стандарту ($Cl \leq 0,6$ %).

Физико-химические и теплотехнические характеристики RDF. По результатам анализа 104 промышленных партий определены ключевые характеристики готового продукта:

- гранулометрический состав: медианный размер $d_{50} = 32$ мм, доля частиц крупнее 80 мм – 1,2 % (при нормативе ≤ 5 %);
- насыпная плотность: 150 ± 7 кг/м³;
- влажность: $20,8 \pm 2,5$ %;
- зольность: $12,5 \pm 2,1$ %;
- выход летучих веществ (V_{daf}): 72,0 %;

- элементный состав (daf): C – 52,5 %, H – 7,2 %, N – 1,2 %, S – 0,15 %;
- низшая теплота сгорания: $16,5 \pm 1,2$ МДж/кг (коэффициент вариации 7,3 %).

Термогравиметрический анализ показал, что горение RDF протекает в интервале 180–650 °С с двумя выраженными экзотермическими пиками при 300 °С и 440 °С. Температура воспламенения составляет около 202 °С, что значительно ниже аналогичного показателя для каменного угля.

Разработка прогностической модели. Методом множественной линейной регрессии получено уравнение для прогнозирования низшей теплоты сгорания RDF:

$$H_i = 19,5 + 0,18 \cdot P_{\text{plast}} - 0,26 \cdot W_r - 0,12 \cdot A_d,$$

где P_{plast} – содержание пластика в сырье (%); W_r – конечная влажность (%); A_d – зольность (%). Модель характеризуется высокими показателями качества: $R^2 = 0,92$, $RMSE = 0,7$ МДж/кг. Верификация на независимой выборке показала среднюю ошибку прогноза 0,55 МДж/кг (3,3 %). Модель внедрена в систему производственного контроля КПО «Восток».

Обсуждение и эколого-экономическая оценка. Достигнутые в ходе оптимизации технологических параметров результаты имеют существенное значение для техносферной безопасности производства RDF. Снижение содержания хлора до 0,55 % обеспечивает двукратный запас по отношению к требованиям класса 3 по EN 15359 ($Cl \leq 1,0$ %) и позволяет использовать RDF не только в цементных печах, но и на энергетических установках с повышенной чувствительностью к коррозии. Это особенно важно в контексте российских условий, где нормативная база для RDF-топлива еще находится в стадии формирования [6].

Высокая температура в зоне спекания цементной вращающейся печи (1450–2000 °С) гарантирует полное разложение органических соединений,

включая стойкие диоксины и фураны. Щелочная среда (CaO) связывает HCl, SO₂ и HF в твердые соли, переходящие в клинкер, а зола RDF полностью встраивается в кристаллическую решетку клинкера, не образуя вторичных отходов. Это является принципиальным преимуществом цементной промышленности как потребителя RDF по сравнению с другими технологиями термической утилизации [7].

Экологическая эффективность производства RDF подтверждается следующими показателями. Предотвращение захоронения 933 тыс. т отходов в год эквивалентно предотвращенному экологическому ущербу в размере 2,22 млрд руб./год и экономии 5,8 га земель. Замещение каменного угля RDF обеспечивает сокращение выбросов парниковых газов на 235,5 тыс. т CO₂-экв./год за счет высокой доли биогенного углерода (40–50 % от общего содержания углерода). Результаты оценки жизненного цикла подтверждают снижение потенциала глобального потепления на 70–83 % по сравнению с захоронением «хвостов» на полигоне [8].

Экономическая оценка показывает, что фактическая себестоимость производства RDF составляет 1 849 руб./т, полная себестоимость с доставкой до потребителя – 2 199 руб./т. При отпускной цене 2 500 руб./т рентабельность продаж достигает 26 %. Цена энергии из RDF (151,5 руб./ГДж) на 22 % ниже цены энергии из каменного угля, доставленного в Московский регион, что создает устойчивый экономический стимул для потребителей. Годовая маржинальная прибыль от реализации RDF составляет 260 млн руб. Капитальные затраты на создание линии RDF (4,2 млрд руб.) в 4–6 раз ниже удельных затрат на строительство мусоросжигательных заводов.

Заключение. В результате проведенного комплексного исследования получены следующие основные выводы:

1. Установлено, что «хвосты» сортировки КПО «Восток» (933 тыс. т/год) обладают значительным энергетическим потенциалом, однако

их переработка требует оптимизации технологических режимов для обеспечения показателей техносферной безопасности. Сквозной выход готового RDF составляет 42,7 % (398,5 тыс. т/год).

2. Разработаны и внедрены оптимизированные режимы биологической сушки, позволившие сократить продолжительность цикла в холодный период года с 15 до 11 суток (на 27 %) и увеличить пропускную способность участка на 36 % при незначительном росте энергопотребления.

3. Посредством оптимизации параметров оптической сепарации (скорость конвейера 2,8 м/с, задержка клапанов 3 мс) достигнуто снижение содержания хлора в готовом RDF с 0,98 % до 0,55 %, что соответствует классу 2 по стандарту EN 15359 и обеспечивает снижение рисков образования диоксинов и коррозии оборудования.

4. Разработана регрессионная модель прогнозирования теплоты сгорания RDF ($H_i = 19,5 + 0,18 \cdot P_{\text{plast}} - 0,26 \cdot W_r - 0,12 \cdot A_d$, $R^2 = 0,92$), внедренная в систему производственного контроля для оперативного управления качеством.

5. Эколого-экономическая оценка подтверждает высокую эффективность производства RDF: предотвращение захоронения 933 тыс. т отходов в год, сокращение выбросов парниковых газов на 235,5 тыс. т CO₂-экв./год, рентабельность 26 % при цене энергии на 22 % ниже, чем у каменного угля.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что RDF-топливо является экономически и экологически эффективным инструментом декарбонизации промышленности и решения проблемы обращения с отходами. Дальнейшее развитие направления требует совершенствования национальной нормативной базы, включая принятие ГОСТ Р на твердое восстановленное топливо, а также создания экономических стимулов для

замещения ископаемого топлива альтернативными источниками энергии из отходов.

Использованные источники:

1. РЭО. Отчет о деятельности ППК «Российский экологический оператор» за 2023 год. – М., 2023. – 186 с.
2. Rotter V.S. Mechanical-biological treatment of waste and the utilization of solid recovered fuels. – Berlin: Rhombos-Verlag, 2012. – 242 p.
3. РТ-Инвест. Комплекс по переработке отходов «Восток»: проектная документация. Том 1, книга 2. – М., 2023. – 254 с.
4. Vainikka P., Hupa M. Review on bromine and chlorine in solid fuels with focus on fluidized bed combustion // Fuel. – 2012. – Vol. 95. – P. 1-14.
5. РТ-Инвест. Технологический регламент линии производства RDF КПО «Восток». – М., 2022. – 86 с.
6. Ильиных Г.В., Коротаев В.Н., Слюсарь Н.Н. Стандартизация твердого восстановленного топлива в России // Экология производства. – 2022. – № 5. – С. 54-61.
7. Chatziaras N., Psomopoulos C.S., Themelis N.J. Use of waste derived fuels in cement industry: a review // Management of Environmental Quality. – 2016. – Vol. 27, No. 2. – P. 178-193.
8. РТ-Инвест. Аналитический отчет КПО «Восток» по содержанию биогенного углерода в RDF (метод ASTM D6866-21). – М., 2023. – 18 с.
9. Reza B., Soltani A., Ruparathna R., Sadiq R., Hewage K. Environmental and economic aspects of production and utilization of RDF as alternative fuel in cement plants // Journal of Cleaner Production. – 2013. – Vol. 54. – P. 252-260.

10. ТУ 38.21.11-001-2022. Топливо твердое восстановленное из коммунальных отходов. Технические условия. – М.: РТ-Инвест, 2022. – 24 с.