

А. А. Чернов^{1,2}, В. И. Татаренко¹, О. П. Ляпина¹✉, Л. А. Демидова¹

Анализ энергетического баланса и экономической составляющей процесса термической переработки ТКО

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: o.p.lyapina@sgugit.ru

Аннотация. В соответствии со стратегией РФ по развитию промышленности по переработке отходов производства и потребления на период до 2030 года ожидается десятикратное увеличение ввода в эксплуатацию объектов обработки ТКО. Возникнет избыток производства альтернативного топлива. Необходимы исследования по эффективности его применения в различных установках термической деструкции. Технологическая схема с пиролизом в реакторе с регулируемой температурой может стать еще более востребованной в связи с проблемой «вечные химикаты» (PFAS). В статье обсуждается энергетический баланс установки пиролиза и экономическая составляющая.

Ключевые слова: твердые коммунальные отходы, утилизация отходов, обращение с отходами, PFAS

A. A. Chernov^{1,2}, V. I. Tatarenko¹, O. P. Lyapina¹✉, L. A. Demidova¹

Analysis of the energy balance and the economic component of the MSW thermal processing process

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

²Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: o.p.lyapina@sgugit.ru

Abstract. In accordance with the strategy of the Russian Federation for the development of the industry for the processing of industrial and consumer waste for the period up to 2030, a tenfold increase in the commissioning of MSW treatment facilities is expected. There will be an excess of alternative fuel production. Research is needed on the effectiveness of its use in various thermal degradation plants. The technological scheme with pyrolysis in a temperature-controlled reactor may become even more in demand in the field of eternal chemicals (PFAS). The article discusses the energy balance of the pyrolysis plant and its economic component.

Keywords: municipal solid waste, waste disposal, waste management, negative impact on the environment, PFAS

Введение

В соответствии со стратегией РФ по развитию промышленности по переработке отходов производства и потребления на период до 2030 года ожидается десятикратное увеличение ввода в эксплуатацию объектов обработки ТКО [1]. Объекты обработки ТКО предназначены для выделения из ТКО иных видов отходов, пригодных для дальнейшей утилизации. Одним из продуктов сортировки

является альтернативное топливо. Методы и технологии подготовки альтернативного топлива из ТКО рекомендованы в ГОСТ Р 70719-2023 [2]. Данный ГОСТ детализирует регламентацию процессов строительства, модернизации и эксплуатации объектов, занимающихся переработкой твердых коммунальных отходов. Реализация этих требований обеспечит условия для повышенного внедрения альтернативных видов топлива, что, в свою очередь, способствует выполнению задач, определенных национальным проектом «Экология». Ключевым аспектом, влияющим на эффективность внедрения подобных инноваций, является изучение соотношения затрат на производство и транспортировку альтернативного топлива от пунктов сбора отходов к местам их утилизации и получаемых доходов от их термической переработки. Этим определяется актуальность представленного в статье исследования.

В мировой классификации альтернативное топливо называют Refuse Derived Fuel (RDF) или топливо из мусора. Объектами применения такого топлива являются цементные, металлургические производства и объекты генерации энергии.

Подача альтернативного топлива осуществляется различными способами в зависимости от объекта применения АТ ТКО [2]:

- а) цементные печи при "сухом" способе подача альтернативного топлива пневмотранспортом в декарбонизатор;
- б) цементные печи при "мокроем" способе подача альтернативного топлива пневмотранспортом на главную горелку;
- в) металлургия, доменные печи подача гранул альтернативного топлива пневмотранспортом на фурмы;
- г) энергетика твердотопливная подача гранул альтернативного топлива в топку вместе с твердым топливом;
- д) энергетика газовая подача альтернативного топлива в газификатор, с последующей подачей синтез-газа в топку.

В литературе мало публикаций по исследованию эффективности применения топлива из ТКО в виде RDF. Однако, технологии должны быть совместимы с современной промышленной инфраструктурой. Поэтому, намного удобнее применять газовое топливо, в том числе в виде пиролизного газа, получаемого при газификации RDF.

Газификатор уменьшает объем биотвердых веществ на 95 при производстве синтез-газа, синтетического топливного газа для промышленного использования и биоугля в качестве полезного побочного продукта с различными применениями в промышленных и бытовых продуктах. Кроме этого, в последнее время, высокую обеспокоенность вызывает отравление пахотных почв экологически стойких соединений «вечные химикаты» (PFAS). PFAS это пер- и полифторалкильные вещества. Эти соединения обычно встречаются в биотвердых веществах, побочном продукте очистки сточных вод. Их присутствие привело к загрязнению земли и воды там, где материал используется в сельском хозяйстве и на свалках. В США это привело к появлению новых правил и запрету использовать иловые остатки для удобрения сельхозугодий. В связи с этим нужны технологические возможности для обработки биотвердых веществ, которые образуются в результате очистки сточных вод.

2 апреля 2025 г. был выпущен отчет, подтверждающий уничтожение PFAS при газификации на заводе компании Aries Clean Technologies [3]. Таким образом, технологическая схема с пиролизом отходов в реакторе быстрого пиролиза TOP-5 [4] может стать еще более востребованной. Были проведены испытания нескольких температурных режимов переработки отходов с получением материального и энергетического баланса.

Цель статьи – оценить энергетический и экономический баланс пиролиза альтернативного топлива из отходов в соответствии с технологической схемой и алгоритмом технологического расчета, представленных в нашей работе [4].

Материальный и энергетический баланс газификации альтернативного топлива из ТКО

После выхода установки на режим в реактор в течение около 2 часов загружалось альтернативное топливо из ТКО. При разложении отходов образуются летучие газы и слаболетучие органические соединения, а также твердые частицы. На выходе из реактора смесь газов и частиц охлаждается до 200 °С. Твердые частицы имеют зольность до 36 %, жидкость по своему составу и свойствам близка к мазуту. Смесь летучих продуктов состоит из смеси газов: N₂, H₂, CO, CO₂, CH₄ и т.д. Теплосодержание смеси 23±2 кДж/м³.

В таблице 1 представлены экспериментальные данные массового баланса полученных продуктов деструкции. После фильтрующих циклонов при температуре 15 °С был осуществлен сбор продуктов разложения с помощью компрессора, осажденного аэрозоля в виде черной жидкости и твердых частиц. Проведено взвешивание жидкости и частиц из различных мест возможной конденсации. Основную массу продуктов составляют газообразные при комнатной температуре продукты разложения углеродсодержащих отходов.

В таблице 2 представлены данные оценки энергетического баланса полученных продуктов деструкции. Из таблицы видно, что электрическая энергия тратится значительно меньше, чем тепловая при сжигании пропана. Ею можно пренебречь при расчете экономической эффективности.

Таблица 1. Результаты оценки массового баланса деструкции RDF

Наименование	Масса, кг	Массовая доля, %
Загружено материала	1000	100%
Газообразные продукты разложения углеродсодержащих отходов	735,2	74%
Углеродный остаток из реактора и шнека	148,4	15%
Углеродный остаток из бункера	81,3	8%
Углеродный остаток из циклона №1	1,3	0%
Углеродный остаток из циклона №2	6,9	1%
Жидкость	26,9	3%
Сумма	1000	100%

Таблица 2. Результаты оценки энергетического баланса деструкции RDF

Наименование	Величина
Загружено материала, кг	1000
Израсходовано электричества, кВт/час	1,46
Израсходовано пропана, м ³	46,94
Израсходовано тепловой энергии на деструкцию, Гкал	0,93
Получено газообразных продуктов разложения углеродсодержащих отходов, м ³	735,2
Получено запасенной тепловой энергии, Гкал	14,6

Численная модель газификации альтернативного топлива из ТКО

В оборудовании TOP-5 реализована наиболее востребованная сегодня технология быстрого пиролиза отходов. Был проведен численный анализ деструкции альтернативного топлива из ТКО, изготовленного по ГОСТ [2]. Целью моделирования являлось детальное изучение температурного режима, а также характеристик потоков газа внутри реактора при разнообразных режимах его функционирования. В рамках работы выполнялись следующие ключевые задачи:

- разработка трехмерной геометрической модели реактора с использованием инструментария Ansys DesignModeler;
- определение теплофизических и иных необходимых свойств материалов, участвующих в процессе работы реактора;
- установление начальных и граничных условий для последующего моделирования;
- выполнение серии вычислений в программном комплексе Ansys Fluent, учитывающих процессы газификации RDF в условиях пиролиза;
- тщательный анализ рассчитанных данных и их корреляция с данными, полученными в ходе лабораторных и практических испытаний.

Количественный и качественный составы отходов могут отличаться в зависимости от места их образования и условий получения. Тем не менее, для технологических расчетов процесса газификации достаточно иметь данные физико-химическим свойствам по следующим веществам: вода и полимер.

На рисунке 1 представлены результаты численного расчета установившегося в течение длительного времени поля температур и поля скоростей движения газа внутри реактора. В расчетах температура внешних стенок реактора задавалась равной температуре окружающей среды, а внутренние стенки нагревались до заданной температуры за счет горения пропана в боковых горелках. Температура продуктов сгорания пропана из горелок на входе во внешний контур реактора 936 °С, массовый поток 0,359 кг/с. При таких параметрах, средняя температура внутри реактора до попадания отходов 900 °С. Этого достаточно для нагрева твердых частиц до температуры 700 °С. Затраты энергии при этом составляют 468 кДж/с на 0,28 кг/с отходов с влажностью 5 %.

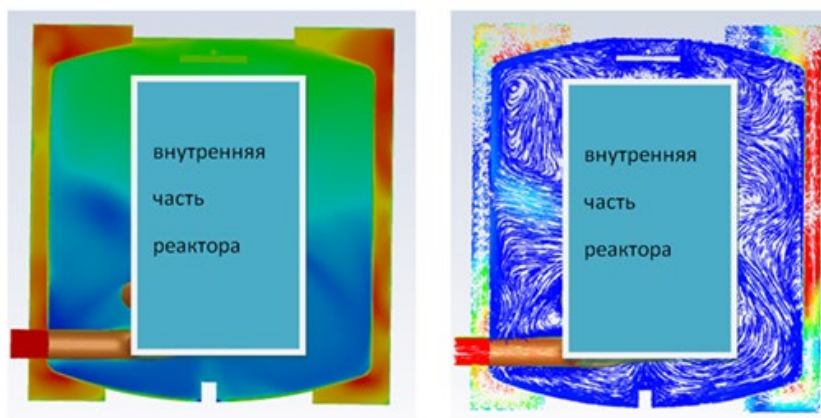


Рис. 1. Расчетные поле температур (слева) и поле скоростей движения газа (справа) внутри реактора

При температуре 400 °С наблюдается пиковая скорость образования диоксинов и фуранов [5]. PFAS при этой температуре остаются стабильными. Расчеты показывают, что в реакторе нагрев твердого материала происходит достаточно быстро из-за того, что масса горячего газа с температурой свыше 700 °С значительно больше, чем масса подаваемого материала. Это позволяет быстро миновать опасный диапазон температур образования диоксинов.

Экономическая составляющая работы реактора

Результаты экспериментов показывают, что для получения из 1000 кг альтернативного топлива ТКО 735 м³ горючего газа необходимо затратить 0,93 гигакалорий. Результаты моделирования показывают, что достаточно 0,4 гигакалорий. Потери тепла составляют до 50 %. Тем не менее, при сжигании 735 м³ полученного при этом горючего газа выделяется 14 гигакалорий. За вычетом тепла необходимого для получения газа, в денежном выражении это составит: $(14-1)*2000 \text{ руб/гкал}=26 \text{ тыс.руб.}$

Стоимость 1 тонны альтернативного топлива из ТКО на рынке составляет от 700 до 1500 рублей, при себестоимости 500 руб. Таким образом, доход составит порядка 25 тыс. рублей.

Заключение

Согласно информации, предоставленной Российским экологическим оператором (РЭО) [6], инициативу «Применение альтернативного топлива из отходов в промышленном производстве на период с 2022 по 2030 годы» [7] поддержали более 30 промышленных предприятий. Планируется, что реализация проектов на данных предприятиях к 2025 году позволит достичь показателя использования альтернативного топлива из отходов на уровне 1,8 милл. тонн ежегодно. Это направление будет способствовать повышению экологичности промышленного сектора, а также усилению устойчивого развития экономики в целом. Таким образом, актуальным направлением в области обращения с ТКО становится метод быстрой термической деструкции с последующей газификацией, формирующей газовую смесь с повышенной калорийностью.

Представленные в статье результаты исследования материального и энергетического баланса указывают на экономическую эффективность данного процесса. Основные достоинства методики включают:

1. концентрацию энергетических ресурсов ТКО в виде газа с высокими показателями теплотворной способности.
2. отсутствие вредных диоксинов и фуранов благодаря быстрому темпу подогрева и разложения ТКО во флеш-реакторе.
3. формирование остаточной золы с содержанием нетоксичных соединений солей серы и хлора.

Высокоэнергетический газ, получаемый в ходе процесса термического пиролиза, может быть интегрирован в различные теплотехнологические циклы, что укрепляет его промышленную и экономическую значимость. Внедрение такого метода способствует снижению социально-экологической проблематики, связанной с переработкой бытовых отходов и уменьшает их негативное влияние на окружающую среду.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Распоряжение Правительства РФ от 25 января 2018 г. № 84-р «Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года»
2. ГОСТ Р 70719-2023 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Методические рекомендации по подготовке альтернативного топлива из твердых коммунальных отходов. Основные требования (с Поправкой)
3. <https://www.wastedive.com/press-release/20250421-aries-clean-technologies-proves-commercial-scale-pfas-destruction-in-wastew/>
4. <https://geosib.sgugit.ru/upload/geosibir/sborniki/2023/tom-3/287-294.pdf>.
5. Gordon McKay Dioxin characterisation, formation and minimisation during municipal solid waste (MSW) incineration: review, Chemical Engineering Journal, Volume 86, Issue 3, 28 April 2002, Pages 343-368
6. <https://reo.ru/tpost/7j4yht2ci1-34-rossiiskih-zavoda-nachnut-rabotat-na?ysclid=ljly7izdqw931704534>
7. Паспорт отраслевой программы "Применение альтернативного топлива из отходов в промышленном производстве на 2022-2030 годы", Правительство РФ 28.12.2022 N 16042п-П11

© А. А. Чернов, В. И. Татаренко, О. П. Ляпина, Л. А. Демидова, 2026