

## ОТЗЫВ

официального оппонента к.т.н. Мурашова Владимира Ефимовича  
на диссертационную работу Хоперского Руслана Игоревича  
«Энергоэффективная утилизация «хвостов» сортировки твердых  
коммунальных отходов с получением твёрдого и газообразного топлива»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 2.6.12. (05.17.07) Химическая технология топлива и  
высокоэнергетических веществ.

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Диссертационная работа Хоперского Р.И. посвящена вопросу переработки остаточной части коммунальных отходов после сортировки на мусоросортировочных станциях, что на сегодняшний момент является актуальной и острой проблемой для городских властей страны. Использование не востребованной на многих мусоросортировочных станциях остаточной части ТКО позволит сократить объём захораниваемых на полигоне отходов. Также автор в своей работе показал возможность получения из горючих фракций ТКО города Липецка готового топлива (RDF) для промышленных печей, что поможет снизить их зависимость от выросших в цене традиционных видов энергоносителей.

### **Цель диссертационной работы**

Целью работы является обоснование технологии производства RDF из остаточной части ТКО после сортировки на мусоросортировочной станции на примере города Липецка с последующей возможностью получения горючего газа методом пиролиза для замещения части традиционного топлива на действующих производствах, а также снижение экологической нагрузки городов за счет сокращения объемов полигонного захоронения ТКО.

### **Научная новизна работы**

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Автором на основе проведенного морфологического состава остаточной части ТКО на станции города Липецка была рассчитана оценочная теплота сгорания горючих фракций отходов. Разработаны технологические основы производства и использования альтернативного топлива из горючих фракций остатков ТКО после промышленной сортировки.
2. Изучено влияние температуры и скорости нагрева на выход и состав продуктов реакции при пиролизе основных полимерных материалов в составе ТКО (ПВД, ПНД, ПП и ПЭТ). Показано влияние на процесс минерального катализатора.

3. На примере печи обжига цементного клинкера выполнен анализ условий сжигания RDF и пиролизного газа. Предложены и обоснованы технологические решения для обеспечения экологической безопасности использования альтернативных видов энергоресурсов в промышленных печах-реакторах.

4. Разработана компьютерная модель процесса пиролиза RDF, которая позволяет прогнозировать количество и состав продуктов реакции в зависимости от морфологического состава исходного топлива. Также автором разработана компьютерная программа, позволяющая рассчитать элементный состав и теплоту сгорания топлива по морфологии исходного сырья.

### **Практическая значимость**

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Определен и проанализирован морфологический состав остаточной части ТКО на мусоросортировочной станции города Липецка. Предложены рекомендации по сокращению объема захораниваемых отходов на полигоне города за счет использования горючих фракций как топлива для действующих производств.
2. Рассмотрен ряд мер для обеспечения экологической безопасности использования топлива из коммунальных отходов в цементных печах.
3. Предложен и апробирован на мусороперерабатывающем предприятии города Липецка способ изготовления готового топлива из «хвостов» сортировки ТКО после удаления не горючих и потенциально опасных компонентов. Определены основные характеристики для полученного топлива, которые включают: влажность, зольность, элементный состав, теплоту сгорания и другое.
4. Определены условия пиролиза RDF для максимального выхода и теплоты сгорания пиролизного газа.
5. Показан укрупненно экономический эффект при внедрении на действующем мусороперерабатывающем комплексе технологических решений, предложенных автором.
6. Показана дозировка каталитической алюмосиликатной добавки - монтмориллонита в RDF, обеспечивающая повышение теплоты сгорания и увеличение выхода пиролизного газа.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается применением современных физико-химических методов исследования (хроматографией, термическим анализом, спектроскопией и т.д.), методов планирования эксперимента и обработкой результатов с использованием программных продуктов статистического анализа, согласованностью экспериментальных результатов между собой, а также апробацией технологии на предприятии.

## **Общее содержание работы**

Диссертация состоит из введения, 4х глав, заключения, списка литературы и приложений. Диссертационная работа изложена на 164 страницах, содержит 51 рисунок, 35 таблиц, список использованной литературы из 211 наименований и 2 приложения.

**Во введении** к диссертации автором обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель и задачи. Здесь же автором изложены его представления о научной новизне и практической значимости полученных результатов, сформулирована методология исследования и положения диссертации, выносимые на защиту. Также во введении приведена информация об апробации и публикации полученных результатов.

**В первой главе** диссертационной работы рассмотрены нормативно-законодательная база в области обращения с ТКО в России, тенденции развития мировой и российской практики переработки ТКО, специфика морфологического состава ТКО в различных регионах России и мира, рассмотрены основные технологии переработки отходов. Особое внимание автор уделил термическим методам переработки твердых коммунальных отходов, таким как сжигание, пиролиз и газификация. В данной главе обоснована целесообразность получение топлива из горючих фракций ТКО (RDF) с последующим использованием в промышленных печах для замены традиционных энергоресурсов. В заключительном разделе проведен анализ ситуации в сфере обращения с ТКО в городе Липецке, представлены прогнозные данные по накоплению ТКО в городе на основе статистических данных из отчетности регионального оператора. В конце главы сформулированы основные выводы по литературному обзору и задачи работы.

**Во второй главе** рассмотрена производственная деятельность мусоросортировочной станции города Липецка, представлен морфологический состав остатков ТКО после сортировки (или «хвостов» ТКО). Автор отметил, что часть из таких отходов обладает «энергетической» ценностью и может быть использована для получения топлива.

В разделе 2 предложена методика изготовления топливных брикетов из горючих фракций «хвостов» сортировки ТКО, которая состоит из следующих стадий: предварительное измельчение, сушка, прессование модельного состава ТКО с последующим нагревом для обеспечения плавления (размягчения) полимеров и формирование за счет расплавленной массы

брикета. Далее автор для определения оптимальных условий формирования брикета поставил полный факторный эксперимент, где независимыми величинами были температура и время выдерживания при этой температуре. В качестве характеристик топлива были использованы: теплота нагрева воды при сжигании навески RDF в условиях теплоизоляции от окружающей среды, плотность брикета, его влагоёмкость и адсорбированная влага при 100% влажности воздуха. Для полученного лабораторного образца топливного брикета определена теплота сгорания в независимой лаборатории, которая составила в среднем 30,7 МДж/кг.

В данной главе показаны результаты проведенного термогравиметрического анализа полученных образцов топлива. Автором было отмечено, что в диапазоне температур 180-480 °С происходит потеря примерно 80% массы образца, при температуре 700 °С потеря массы образца достигает 93%.

В последнем разделе главы 2 показаны и обоснованы меры для обеспечения экологической безопасности использования топлива из ТКО в цементных печах. Глава завершается основными выводами.

В третьей главе представлены экспериментальное исследование термодеструкции отдельных компонентов «хвостов» сортировки ТКО, определено влияние температуры и продолжительности нагрева на выход летучих компонентов. На лабораторной установке, состоящей из герметично закрытой металлической реторты с газоотводной трубкой проведено исследование пиролиза «хвостов» сортировки ТКО при температурах 250, 450 и 650 °С. Представлены зависимость выхода продуктов пиролиза от температуры процесса, данные о составе и теплоте сгорания выделившегося пиролизного газа.

В следующем разделе главы показаны результаты пиролиза отдельных видов отходов из таких полимеров, как полиэтилен низкого и высокого давления, полиэтилентерефталат и полипропилен. Автор приводит результаты влияния алюмосиликатной каталитической добавки (монтмориллонита) как на процесс пиролиза отдельных полимеров, так и на пиролиз топлива из отходов. Результаты экспериментов показали, что такая добавка к сырью поможет снизить выход жидких продуктов реакции. Далее изложены выводы по главе 3.

В четвертой главе укрупненно рассчитан возможный экономический эффект от внедрения предлагаемых автором решений на действующем

мусороперерабатывающем предприятии города. Приведена блок-схема материальных потоков на предприятии и показано, что из общего объёма поступающих на станцию отходов только 21% или 43 тыс. тонн ТКО в год может идти на изготовление топлива. Автор указал перечень и цену оборудования необходимого для дооснащения действующей линии сортировки на станции регионального оператора. Во втором разделе главы показаны модель процесса пиролиза топлива из отходов в программной среде ChemCad, которая позволяет провести оценку продуктов реакции. Также автором была написана компьютерная программа на языке Python, которая позволяет рассчитать элементный состав и теплоту сгорания топлива по морфологическому составу отходов. Далее представлены основные выводы по главе 4.

**Заключение и выводы** обоснованы и отражают основные результаты и положения диссертационной работы.

### **Соответствие паспорту специальности**

Содержание диссертационной работы и автореферата соответствует паспорту специальности 2.6.12. (05.17.07) Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ в части:

3. Катализаторы и каталитические процессы переработки углеводородного сырья.

10. Электродные технологии и технологии производства углеродных материалов различного назначения, технический углерод. Новые виды сырьевых углеродистых материалов.

12. Экологические аспекты переработки топлив. Разработка технических и технологических средств и способов защиты окружающей среды от вредных выбросов производств по переработке топлив.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 15 печатных изданиях, в том числе 2-х статьях в журналах, индексируемых в научной базе Web of Science и 1-й статье в журнале, рекомендованном ВАК. Оформлен один патент на полезную модель, а также получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Автореферат и публикации по теме диссертации (статьи, тезисы докладов конференциях различного уровня) в полной мере отражают основные положения и содержание диссертационной работы.

## **Замечания и рекомендации по диссертации**

1. В диссертационной работе был представлен морфологический состав ТКО в городе Липецке, но не отмечено на сколько он типичен для мусоросортировочных станций в России и, если имеются заметные различия, то с чем они связаны. Это помогло бы ответить на вопрос о том, можно ли использовать результаты работы автора для практического применения в других регионах страны.
2. В разделе 2.4 было предложено использовать сорбент на основе коксовой пыли для обеспечения экологической безопасности сжигания топлива из ТКО в печах-реакторах, но из текста диссертации не понятно является ли он промышленно производимым?
3. В главе 4 диссертационной работы выполнена расчетная модель процесса пиролиза топлива из отходов. Поэтому было бы уместным представить основные конструктивные характеристики установки пиролиза с учетом предложенных решений.
4. В тексте диссертации для обозначения топлива из ТКО используются разные названия: топливные брикеты, RDF или ТТО, что вносит некоторую неясность при прочтении. В РФ согласно ГОСТ 33516-2015 принято название «топливо твердое из бытовых отходов».

## **Заключение**

Общее содержание диссертации Хоперского Руслана Игоревича «Энергоэффективная утилизация «хвостов» сортировки твердых коммунальных отходов с получением твёрдого и газообразного топлива», уровень выполнения её разделов и полученные результаты позволяют считать, что она является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», утвержденного приказом ректора от 17 сентября 2021 г. № 1523, предъявляемыми к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. В ней проведены экспериментальные исследования по получению товарного твердого топлива из горючих фракций остатков сортировки ТКО в городе Липецке. В работе рассмотрен способ глубокой переработки отходов методом пиролиза для получения энергетических продуктов. Кроме того, в работе рассмотрены вопросы использования твердого топлива из отходов в промышленных печах, а также представлена математическая модель процесса в программе ChemCad. Обоснованность результатов работы также подтверждается апробацией технологии изготовления топлива из отходов на действующем предприятии.

Считаю, что автор диссертации Хоперский Руслан Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.12. (05.17.07) Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ.

Официальный оппонент:

заместитель директора ГКУ Московской области «Дирекция по организации обращения с отходами», доцент, кандидат технических наук по специальности 05.17.08 «Процессы и аппараты химических производств» и 25.00.36 «Геоэкология»

**Мурашов Владимир Ефимович**

Почтовый адрес: 117246. Москва ул. Кулакова, д. 20, корп. 1

Телефон: +79859222256

Адрес электронной почты: murashov60@list.ru

*Владимир Ефимович Мурашов*

ГЛАВНЫЙ СПЕЦИАЛИСТ  
И.Б.А. *В.Е.М.*