

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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 Руслана Игоревича посвящена актуальным вопросам повышения эффективности утилизации твердых коммунальных отходов (ТКО), в частности вопросам получения и использования твердого топлива из «хвостов» сортировки ТКО (refuse derived fuel, RDF). Несмотря на широкое внедрение технологий сортировки, вопрос возможностей использования «хвостов» сортировки ТКО и снижения объемов их захоронения в РФ остается актуальным. Научное обоснование подходов к получению твердого и газообразного топлива из не утилизируемых остатков сортировки ТКО позволит не только снизить объемы отходов, направляемых на захоронение, но и уменьшить потребление первичных природных ресурсов за счет замещения части природного газа при обогреве промышленных печей-реакторов.

### **Цель диссертационной работы**

Цель диссертационной работы заключается в научном обосновании и разработке технологии производства RDF из остаточной части ТКО после сортировки (так называемых «хвостов») на мусоросортировочной станции с возможностью получения высококалорийного пиролизного газа для замещения части традиционного топлива или совместного их сжигания в энергоемких производствах, а также снижение экологической нагрузки крупных муниципальных образований за счет существенного сокращения объемов полигонного захоронения ТКО.

### **Научная новизна работы**

Научная новизна работы заключается в том, что автором:

1. Разработано научно-технологическое обоснование эффективного получения и применения RDF топлива из остатков ТКО после промышленной сортировки, а также технология получения и использования продуктов пиролиза RDF для замещения части природного газа при обогреве промышленных печей-реакторов. На основании морфологического состава предложена брутто-формула топлива, рассчитана по составу и экспериментально определена теплота сгорания полученного топлива, показана энергетическая ценность сырья на уровне твердых горючих ископаемых.

2. С целью разработки технологии получения отопительного газа из RDF для частичной замены природного газа изучено термическое поведение в пиролизном процессе при варьировании температуры и скорости нагрева таких основных полимерных материалов, составляющих углеводородную компоненту «хвостов» ТКО, как полиэтилен высокого и низкого давления – ПНД и ПВД, полипропилен - ПП, полиэтилентерефталат - ПЭТ, экспериментально определен состав пиролизного газа отходов полимеров, рассчитана его теплота сгорания, экспериментально определены константы скорости пиролиза, исследована возможность применения монтмориллонита в качестве катализатора для увеличения выхода газа за счет сокращения образования жидких продуктов пиролиза.

3. Выполнен анализ условий сжигания RDF и пиролизного газа, предложены решения, обеспечивающие экологическую безопасность использования данных энергоресурсов в промышленных печах на примере установки обжига цементного клинкера.

4. Разработана впервые компьютерная модель процесса пиролиза RDF в программном комплексе ChemCad, которая позволяет прогнозировать количество и средний состав продуктов пиролиза, подобрать оптимальный режим работы реактора в зависимости от морфологического состава исходного топлива.

### **Практическая значимость**

Практическая значимость работы заключается в разработке следующих положений:

- определен типовой морфологический состав и технические характеристики остаточной части («хвостов») ТКО после сортировки на мусороперерабатывающем предприятии на примере промышленного города ЦФО с населением 500 тыс. человек (г. Липецк), показана возможность использования «хвостов» в качестве сырья для изготовления альтернативного топлива промышленных печей, что позволит сократить объем отходов, отправляемых на захоронение;
- разработана технология изготовления RDF из горючих фракций остаточной части ТКО, которая предусматривает удаление балластных компонентов, контроль за содержанием опасных составляющих, капсулирование за счет размягчения полимерных фракций ТКО (технология была апробирована на мусоросортировочной станции г. Липецка);
- определены оптимальные условия пиролиза, которые обеспечивают максимальный выход и высокую теплоту сгорания пиролизного газа для его использования совместно с природным газом в промышленных печах;
- определена дозировка каталитической алюмосиликатной добавки - монтмориллонита в RDF, обеспечивающая повышение теплоты сгорания на 16% и увеличение объема пиролизного газа в 1,2 раза;
- предложены и обоснованы меры по обеспечению экологической безопасности сжигания RDF в цементных печах;

- рассчитан ожидаемый экономический эффект от внедрения технологии, который складывается из предотвращенного экологического ущерба, снижения затрат на содержание полигонов, а также экономии промышленных энергоресурсов при их частичной замене газом пиролиза;
- разработана компьютерная модель пиролиза RDF на основе литературных и экспериментальных данных о кинетике термического разложения топлива в программном комплексе ChemCad, которая позволяет оценить изменение состава продуктов пиролиза на выходе из реактора при варьировании морфологического состава исходного топлива.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждается применением современных физико-химических методов исследования (хроматографией, термическим анализом, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопией и т.д.), согласованностью экспериментальных результатов между собой и их не противоречием литературным данным.

### **Характеристика работы**

Диссертационная работа изложена на 164 страницах, содержит 51 рисунок, 35 таблиц, список использованной литературы из 211 наименований и 2 приложения.

**Во введении** к диссертационной работе автором обоснована актуальность работы, сформулирована ее цель и задачи. Автором изложены представления о научной новизне и практической значимости полученных результатов, сформулирована методология исследования и положения диссертации, выносимые на защиту. Отражен личный вклад автора и приведена информация об апробации и публикации полученных результатов.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена вопросам современного состояния и тенденций развития отрасли обращения с отходами. В том числе рассмотрены вопросы нормативно-правового регулирования отрасли обращения с отходами, отмечены основные тенденции изменения морфологического состава ТКО, проанализированы основные технологии утилизации ТКО, в том числе энергетическая утилизация отходов в части сжигания ТКО в промышленных печах. Отдельное внимание уделяется вопросам обеспечения экологической безопасности процессов сжигания и пиролиза ТКО.

**Во второй главе** диссертационной работы проанализирована технология сортировки ТКО на мусоросортировочном комплексе г. Липецка, приведены результаты исследований компонентного и химического состава «хвостов» сортировки, а также данные об энергетической ценности горючей массы и «хвостов» сортировки ТКО. Разработана технология изготовления твердого топлива из отходов из горючих фракций «хвостов» сортировки ТКО, которая предусматривает удаление балластных компонентов, контроль за содержанием опасных составляющих, капсулирование за счет размягчения полимерных фракций ТКО, экспериментально определены теплотехнические свойства брикетов твердого топлива. Проанализированы условия

формирования экотоксикантов и предложены меры по обеспечению экологической безопасности при сжигании твердого топлива из отходов в промышленных печах-реакторах. Для снижения содержания ПХДД и ПХДФ при использовании твердого топлива из отходов в цементных печах предложено использование термостабильного сорбента.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований термического поведения компонентов «хвостов» сортировки ТКО, исследовано влияние температуры и продолжительности нагрева на выход летучих веществ компонентов ТКО, получены данные о составе и теплоте сгорания газа, выделяющегося при пиролизе «хвостов» сортировки ТКО при различных температурах процесса, определены оптимальные параметры процесса, способствующие более полному выходу летучих веществ. Отдельно приведены результаты исследований материальных балансов пиролиза и состава пиролизных газов полимеров (ПП, ПЭТ, ПВД, ПНД). Результаты анализа влияния катализатора на выход продуктов пиролиза твердого топлива из отходов показали, что использование алюмосиликатной каталитической добавки увеличивает выход и приводит к увеличению низшей теплоты сгорания пиролизного газа. Определены оптимальные концентрации катализатора для процесса пиролиза каждого вида исследуемых полимеров.

**В четвертой главе** диссертационной работы представлены результаты расчетов экономического эффекта от внедрения предлагаемых технологий переработки «хвостов» сортировки ТКО на примере г. Липецка. Представлена укрупненная структура затрат по дооснащению действующей мусоросортировочной станции оборудованием для производства твердого топлива из отходов, показана возможность сокращения затрат на утилизацию ТКО за счет внедрения технологии пиролиза «хвостов» ТКО. Для оценки ожидаемого качества и количества состава продуктов пиролиза твердого топлива из отходов на основе литературных и экспериментальных данных разработана модель в программном комплексе ChemCad 7.1. Для оценки основных свойств твердого топлива из отходов написана программа на языке Python, которая позволяет рассчитать средний элементный состав, теплоту сгорания и характеристики горения топлива на основе компонентного состава «хвостов» сортировки ТКО.

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

#### **Замечания и рекомендации по диссертации**

1. Описание технологии сортировки ТКО и возможности производства твердого топлива из «хвостов» сортировки отходов целесообразно дополнить анализом работы оборудования оптической идентификации компонентов ТКО, использование которых в том числе позволяют извлекать опасные компоненты из состава топлива.

2. Среди мероприятий для обеспечения экологической безопасности сжигания твердого топлива отмечается предварительная сортировка с целью удаления прекурсоров, таких как медь и хлорсодержащие соединения в составе ТКО. В то же время описание технологии подготовки топлива не содержит конкретного перечня компонентов ТКО, которые необходимо удалить из потока. Кроме того, ГОСТ 33516-2015 «Топливо твердое из бытовых отходов. Технические характеристики и классы» кроме содержания хлора, регулирует содержание ртути, которое следует рассматривать как маркерное вещество, определяющее экологическую опасность топлива.

3. В работе рассматривается возможность замещения топлива газом пиролиза RDF в промышленных печах как строительной, так и металлургической индустрий. В то же время вопросы экологической безопасности использования твердого топлива из отходов в металлургических печах изучены недостаточно детально.

4. В диссертационной работе используется сокращение RDF, в то время как в стандартах РФ установлено использование терминов «топливо, полученное из отходов (ТПО)» (ГОСТ Р 54258-2010) и «топливо твердое из бытовых отходов» (ГОСТ 33516–2015). Также по тексту работы используются разные формулировки «остаточная часть ТКО», «хвосты» ТКО», «хвосты» сортировки ТКО».

### **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». В ней, на основании выполненных автором исследований, впервые обоснованы научно-технологические аспекты получения и использования в промышленных печах-реакторах продуктов пиролиза твердого топлива из «хвостов» сортировки ТКО, а также исследована возможность применения монтмориллонита в качестве катализатора для увеличения выхода газа за счет сокращения образования жидких продуктов пиролиза.

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.

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.

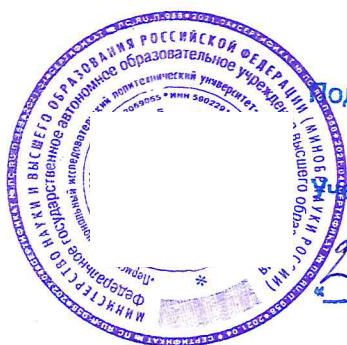
Официальный оппонент  
Профессор кафедры «Охрана окружающей среды»  
ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет», доцент, доктор технических  
наук по специальности 25.00.36 - Геоэкология (строительство и ЖКХ)  
**Слюсарь Наталья Николаевна**

*д*  
*28 марта 2022 г.*

Почтовый адрес: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29

Телефон: +7 9223202560

Адрес электронной почты: [nnslyusar@gmail.com](mailto:nnslyusar@gmail.com)



Подпись *Слюсарь*

ЗАВЕРЯЮ:

Исполнительный секретарь ПНИПУ

*В.И. Макаревич*

*28 03 22* г.