

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Института металлургического  
института ФГБОУ ВО «ЛГТУ»

В.Б. Чупров

« 02 » апреля 20 21 г.



## ПРОТОКОЛ

заседания кафедры химии «Липецкого государственного технического университета» № 7 от «31» марта 2021 г.

Присутствовали: директор МИ, к.т.н. Чупров В.Б., зав. кафедрой химии, д.х.н. Калмыкова Е.Н., д.т.н., профессор Коршиков В.Д., д.т.н., профессор Дождиков В.И., д.т.н., профессор Володин И.М., д.х.н., профессор Ермолаева Т.Н., к.х.н., доцент Бондаренко А.В., к.т.н., доцент Андриянцева С.А., к.х.н., доцент Глазунова И.В., к.х.н., доцент Дергунова Е.С., к.х.н., доцент Красникова Е.М., к.х.н., доцент Мелихова Е.В., к.х.н., доцент Соболева И.Г., к.х.н., доцент Фарафонова О.В., к.х.н., доцент Шашканова О.Ю., к.т.н., доцент Чмырев И.Н..

Всего присутствовало: 16 человек.

### ПОВЕСТКА ДНЯ

Предварительное рассмотрение диссертационной работы старшего преподавателя кафедры химии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет» Хоперского Руслана Игоревича на тему: «Энергоэффективная утилизация «хвостов» сортировки твёрдых коммунальных отходов с получением твёрдого и газообразного топлива».

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

Тема диссертационной работы Хоперского Р.И. и научный руководитель к.х.н., доцент, Бондаренко А.В. утверждены на заседании Ученого совета Metallургического института Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет», протокол №2 от 25.10.13 г.

СЛУШАЛИ:

Сообщение Хоперского Р.И., изложившего основное содержание своей диссертационной работы.

Хоперскому Р.И. были заданы следующие вопросы:

(к.х.н., Мелихова Е.В.): В качестве замечания или рекомендации по презентации: в таблице на слайде 9 необходимо добавить доверительные интервалы. Экологи по поводу RDF топлива бьют тревогу, что в России плохо налажена сортировка отходов и в ТКО остаются. У вас есть пункт на слайде, где представлены меры по обеспечению экологической безопасности сжигания RDF, в котором указан контроль за содержанием прекурсоров. А как будет осуществляться этот контроль? Как происходила идентификация газовых продуктов в работе, каким методом?

(д.х.н., Ермолаева Т.Н.): Как определяли параметры уравнения Аррениуса? В дальнейшем в работе они где-то использовались? Как проводил термогравиметрический анализ?

(д.х.н., Ермолаева Т.Н.): В работе у вас сказано, что монтмориллонит использовали в качестве катализатора. Объясните каталитические действия этого минерала, с чем они связаны?

(к.х.н., Мелихова Е.В.): Зачем в работе использовали добавку монтмориллонита? По составу пиролизных газов где-то идет уменьшение показателей, а где-то увеличение. С чем это связано?

(к.х.н., Глазунова И.В.): По морфологическому составу содержание металлов составляет около 1%. Можно ли было избавиться от них на стадии сортировки?

(к.х.н., Глазунова И.В.): Почему такая высокая влажность у «хвостов» ТКО? Скажите, а какие размеры у пеллет из коммунальных отходов? Теплота сгорания такого топлива соизмерима с какими видами твердых горючих ископаемых?

(д.х.н. Калмыкова Е.Н.): Определяли ли Вы зольность и состав золы полученного топлива?

(к.х.н. Фарафонова О.В.): Какие методики использовали при проведении технического анализа компонентов ТКО? У Вас есть таблица, где вы проводите корреляционный анализ. Расскажите, почему использовали именно коэффициент Фишера в данном случае?

Основные выводы из отзыва о диссертационной работе Хоперского Р.И. внутреннего рецензента к.т.н., доцента Андриянцевой С.А.:

В проведенных автором исследованиях использовались современные подходы к решению сложных задач и новейшие теоретические и физико-химические методы исследования, включая компьютерное моделирование. Работа Хоперского Р.И. содержит ряд новых интересных результатов, научная достоверность которых не вызывает сомнения, имеющих значение для применения топлива из фракций коммунальных отходов в промышленных печах (металлургических, цементных или обжиговых). В целом диссертация Р.И. Хоперского является законченным исследованием, представляет решение актуальных задач, объединенных общим подходом с использованием. Считаю, что диссертация Хоперского Р.И. «Энергоэффективная утилизация "хвостов" сортировки твердых коммунальных отходов с получением твердого и газового топлива»

удовлетворяет требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» и рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.07 – «Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ».

В обсуждении приняли участие: директор МИ, к.т.н. Чупров В.Б., зав. кафедрой химии, д.х.н. Калмыкова Е.Н., д.т.н., профессор Коршиков В.Д., д.т.н., профессор Дождиков В.И., д.т.н., профессор Володин И.М., д.х.н., профессор Ермолаева Т.Н., к.х.н., доцент Бондаренко А.В., к.т.н., доцент Андриянцева С.А., к.х.н., доцент Глазунова И.В., к.х.н., доцент Дергунова Е.С., к.х.н., доцент Красникова Е.М., к.х.н., доцент Мелихова Е.В., к.х.н., доцент Соболева И.Г., к.х.н., доцент Фарафонова О.В., к.х.н., доцент Шашканова О.Ю., к.т.н., доцент Чмырев И.Н..

#### ПОСТАНОВИЛИ:

Заслушав и обсудив диссертационную работу Хоперского Р.И., принять следующее заключение.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация на тему: «Энергоэффективная утилизация «хвостов» сортировки твёрдых коммунальных отходов с получением твёрдого и газообразного топлива» по научной специальности 05.17.07 – Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ, по техническим наукам, выполнена на кафедре химии Metallургического института Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет».

В процессе подготовки диссертации Хоперский Руслан Игоревич, «08» марта 1990 года рождения, проходил обучение в очной аспирантуре с 01.10.2012 по 30.09.2016г. В период с 2016 по 2018 гг. работал в должности

ассистента кафедры химии, с 2018 по 2020 гг. – в должности преподавателя СПО, с 2020 г. и по настоящее время – старший преподаватель на кафедре химии и по совместительству научный сотрудник НИИ ЛГТУ. Является членом научного сообщества молодых ученых ЛГТУ.

Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов (справка об обучении (сроках обучения)) выдано ФГБОУ ВО «ЛГТУ» в 2013 и 2016 годах.

Научный руководитель: кандидат химических наук, доцент кафедры химии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет», Бондаренко Антонина Викторовна

По результатам рассмотрения диссертации на тему: «Энергоэффективная утилизация «хвостов» сортировки твёрдых коммунальных отходов с получением твёрдого и газообразного топлива» принято следующее заключение.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена тем, что одним из приоритетных направлений развития в России является внедрение эффективных технологий глубокой переработки возобновляемого сырья и отходов. Твёрдые коммунальные отходы (ТКО) имеют высокую долю горючих компонентов с содержанием различных углеводородов, поэтому их можно использовать для получения энергии. Правительство РФ в январе 2018 года приняло «Стратегию развития промышленности по переработке отходов на период до 2030 года», которая рассматривает в качестве наиболее перспективного метода утилизации ТКО производство альтернативного твёрдого топлива (RDF), что и является целью исследования настоящей диссертационной работы. Однако, сложность производства такого топлива из отходов обусловлена нестабильностью морфологического состава ТКО, наличием экологически опасных фракций, а также присутствием материалов, которые пригодны для вторичной переработки. Поэтому в рамках настоящего исследования в качестве сырья для RDF используется остаточная часть ТКО после сортировки на мусоросортировочной станции

регионального оператора АО «ЭкоПром-Липецк». Наиболее энергоемкими являются промышленные печи строительной и металлургической индустрии. Поскольку запасы природного сырья постепенно истощаются, то использование различных отходов с целью замещения минерального топлива в таких печах является весьма актуальным. Также это приносит дополнительные преимущества: условия сжигания в печах обжига цементного клинкера позволяют после незначительной модернизации обеспечить экологическую безопасность использования RDF. Поэтому в диссертационной работе предложено использовать газ пиролиза RDF для замещения части природного газа, что позволяет стабилизировать состав и теплоту сгорания газа, уменьшить затраты на традиционное топливо и исключает образование золы и примесей, ухудшающих показатели товарного продукта. Кроме того применение алюмосиликатных добавок позволяет смещать термическую деструкцию в сторону образования газообразных продуктов с более высокой теплотой сгорания. Таким образом, возможность квалифицированной энергетической утилизации ТКО, сокращение полигонного захоронения, ресурсосбережение при замещении части минерального топлива RDF делает тему диссертационных исследований безусловно актуальной.

Научная новизна заключается в следующем:

Было разработано научно-технологическое обоснование эффективного получения и применения RDF топлива из остатков ТКО после промышленной сортировки, а так же технология получения и использования продуктов пиролиза RDF для замещения части природного газа при обогреве промышленных печей-реакторов.

Определен типовой морфологический состав и технические характеристики остатков ТКО после промышленной сортировки на примере промышленного города ЦФО с населением 500 тыс. человек, доказана эффективность получения топлива из остатков ТКО, предложена брутто-

формула топлива, рассчитана и экспериментально подтверждена теплота сгорания полученного топлива.

Изучено термическое поведение при пиролизе основных полимерных материалов составляющих основу остатков ТКО после сортировки, экспериментально определен состав пиролизного газа отходов полимеров, рассчитана его теплота сгорания, исследована возможность применения монтмориллонита в топливо для увеличения выхода газа за счет сокращения количества конденсированных продуктов пиролиза.

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.

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

Практическая ценность работы состоит в том, что были представлены результаты проведённого морфологического анализа остаточной части ТКО после сортировки на мусороперерабатывающем предприятии г. Липецка, показана возможность использования их 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. Определены условия пиролиза, которые обеспечивают максимальный выход и высокую теплоту сгорания пиролизного газа, определена дозировка каталитически активной добавки в RDF, обеспечивающая повышение теплоты сгорания на 16% и увеличение

объёма 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. Произведена оценка действующей технологии переработки отходов на примере промышленного города ЦФО с населением 500 тыс. человек, которая показала, что более 90% отходов отправляются на полигон и только 7% ТКО используется для вторичной переработки.

Работа характеризуется логичностью построения, аргументированностью основных научных положений и выводов, а также четкостью изложения.

Основные положения диссертации получили полное отражение в 3-х публикациях в рецензируемых изданиях, из них 2 статьи в журналах, индексируемых в международных системах цитирования Web of Science и Scopus, а также в 12 публикациях в изданиях, индексируемых в российских базах данных.

Публикации, в изданиях, индексируемых в международных базах данных:

1. Carbon sorbents for the purpose of ecological safety of rdf combustion Khoperskii R.I., Bondarenko A.V., Andriyantseva S.A., Dubinina L.A., Petukhova G.A. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2018. Т. 54. № 1. С. 78-84. DOI: 10.1134/S2070205118010100

2. Khopersky, R.I., Bondarenko, A.V., Andriyantseva, S.A. et al. Coke-Battery Disposal of Solid Municipal Waste. Coke Chem. 63, 443–448 (2020). DOI : 10.3103/S1068364X20090045

Публикации, в изданиях, рекомендованных ВАК для защиты кандидатских и докторских диссертаций:



1. Хоперский Р.И., Бондаренко А.В. Энергетическая утилизация твердых коммунальных отходов методом среднетемпературного пиролиза RDF // Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. 2018. №4.

Публикации, в изданиях, индексируемых в российских базах данных:

1. Хоперский Р.И. В.В. Лёвкина, М.В. Конев и др. Изучение продуктов пиролиза твёрдых бытовых отходов, подлежащих полигонному захоронению // Экология ЦЧО РФ №1(28) 2012г.; С. 35-43.

2. Хоперский Р.И., Бондаренко А.В. Экологическая безопасность сжигания RDF – топлива в промышленных печах // Экология ЦЧО №1-2 (30-31), 2013; С. 126-128.

3. Хоперский Р.И., Бондаренко А.В. Исследование морфологического состава и энергетического потенциала «хвостов ТБО» комплекса по переработке твёрдых бытовых отходов «ЭкоПром-Липецк» // Рециклинг, переработка отходов и чистые технологии: Сборник материалов 8-й Международной научно-практической конференции. – М.: ФГУП «Институт ГИНЦВЕТМЕТ», 2012.; С. 55-58.

4. Хоперский Р.И., Бондаренко А.В. Энергетическая утилизация твёрдых бытовых отходов как эффективный метод снижения экологической нагрузки крупных городов // Наша общая окружающая среда: сб. тез. докл. XIII науч. – практ. конф. молодых учёных, аспирантов, студентов и школьников г. Липецка, 2012г. – Липецк: ЛЭГИ, 2012; С 8-9.

5. Хоперский Р.И., Бондаренко А.В. Производство топливных брикетов из ТБО – эффективный метод снижения экологической нагрузки городов // Наша общая окружающая среда: сб. тез. докл. XIV науч. – практ. конф. молодых учёных, аспирантов, студентов и школьников города Липецка; - Липецк: ЛЭГИ, 2013; С. 59-60.

6. Хоперский Р.И., Бондаренко А.В., Бондаренко В.В. Исследование энергетического потенциала «хвостов» ТБО для получения высококалорийного топлива // Сборник тезисов докладов научной

конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета, Липецк, ЛГТУ, 2012г.; С. 44-45.

7. Хоперский Р.И., Бондаренко А.В., Красникова Е.М., Конев В.А. К вопросу о синтезе диоксинов при сжигании RDF топлива в печах синтеза цементного клинкера // Рециклинг, переработка отходов и чистые технологии: Сборник материалов 9-й Международно научно-практической конференции. - М.: ФГУП «Институт ГИНЦВЕТМЕТ», 2013. С. 26-28.

8. Хоперский Р.И. Бондаренко А.В., Петухова Г.А., Дубинина Л.А. Углеродные сорбенты для обеспечения экологической безопасности сжигания RDF – топлива // Материалы Всероссийской конференции с международным участием и симпозиума. Актуальные проблемы теории адсорбции, пористости и адсорбционной селективности; Москва, 14 – 18 апреля 2014 г.; 2014; С. 39-40.

9. Хоперский Р.И., Бондаренко А.В., Гончаров К.И. Изучение состава и теплоты сгорания пиролизных газов полимеров как основного компонента RDF-топлива промышленных и бытовых отходов // Современная металлургия начала нового тысячелетия к 80-летию НЛМК («Кадры для регионов»). Л.: Липецкий государственный технический университет (Липецк), 2014; С. 114-118.

10. Хоперский Р.И., Бондаренко А.В. Исследование продуктов каталитического пиролиза твердых бытовых отходов // Рециклинг, переработка отходов и чистые технологии: Сборник материалов 11-й Международно научно-практической конференции. - М.: ОАО «Институт «ГИНЦВЕТМЕТ», 2015; С. 31-40.

11. Хоперский Р.И., Бондаренко А.В. Энергетическая утилизация ТКО методом среднетемпературного пиролиза // Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии – 2018: материалы международной научно-практической конференции, Курск, 2018; С. 214-216.

12. «Исследование термического поведения твердых коммунальных отходов для их утилизации в коксовой батарее»; Хоперский Р.И., Бондаренко

А.В., «Проблемы и инновационные решения в химической технологии ПИРХТ-2019» Материалы всероссийской конференции с международным участием / Воронеж. Гос. ун-т инж. Техн. – Воронеж: ВГУИТ, 2019. С.310-311

Результаты диссертации представлены на 6 международных конференциях.

Публичные доклады на международных научных мероприятиях:

1. «Исследование морфологического состава и энергетического потенциала «хвостов ТБО» комплекса по переработке твёрдых бытовых отходов «ЭкоПром-Липецк»; Рециклинг, переработка отходов и чистые технологии. 8-я Международная научно-практическая конференция; 23 октября 2012г.; г. Москва, ФГУП «Институт ГИНЦВЕТМЕТ»

2. «К вопросу о синтезе диоксинов при сжигании rdf топлива в печах синтеза цементного клинкера»; 9-я Международная научно-практическая конференция «Рециклинг, переработка отходов и чистые технологии»; 30 октября 2013г., г. Москва ФГУП «Институт ГИНЦВЕТМЕТ»

3. «Изучение состава и теплоты сгорания пиролизных газов полимеров как основного компонента RDF-топлива промышленных и бытовых отходов»; Международная научно-практической конференции «Современная металлургия начала нового тысячелетия к 80-летию НЛМК («Кадры для регионов»); 17-21 ноября 2014 г., г. Липецк, ЛГТУ.

4. «Исследование продуктов каталитического пиролиза твердых бытовых отходов»; 11-я Международная научно-практическая конференция «Рециклинг, переработка отходов и чистые технологии»; 29 октября 2016г., г. Москва ОАО «Институт «ГИНЦВЕТМЕТ»

5. «Исследование свойств альтернативного топлива из «хвостов» сортировки ТКО для обогрева цементных печей», Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы строительной науки»; 8-10 февраля 2017 г., гор. Липецк, ЛГТУ.

6. «Энергетическая утилизация ТКО методом среднетемпературного пиролиза» Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные исследования в области химии и экологии-2018» на базе Юго-Западного государственного университета (Россия, г. Курск); 24-26 сентября 2018 г.

Публичные доклады на 7 всероссийских научных мероприятиях:

1. «Энергетическая утилизация твёрдых бытовых отходов как эффективный метод снижения экологической нагрузки крупных городов»; Наша общая окружающая среда. XIII научно–практическая конференция молодых учёных, аспирантов, студентов и школьников г. Липецка; 28 апреля 2012г., г. Липецк, ЛГТУ.

2. «Производство топливных брикетов из ТБО – эффективный метод снижения экологической нагрузки городов»; Наша общая окружающая среда. XIV научно– практическая конференция молодых учёных, аспирантов, студентов и школьников г. Липецка; 24 апреля 2013 г.; г. Липецк.

3. «Углеродные сорбенты для обеспечения экологической безопасности сжигания RDF – топлива»; Всероссийский симпозиум с участием иностранных ученых: Актуальные проблемы теории адсорбции, пористости и адсорбционной селективности; 14 – 18 апреля 2014 г.; г. Москва.

4. Научный семинар 10-й школы молодых ученых Липецкой области «Актуальные проблемы естественных наук и их преподавания», 2015, г. Липецк.

5. «Исследование термического поведения твердых коммунальных отходов для их утилизации в коксовой батарее» Проблемы и инновационные решения в химической технологии ПИРХТ-2019. Всероссийская конференция с международным участием / Воронеж. Гос. ун-т инж. Техн. – Воронеж: ВГУИТ, 7-8 октября 2019.

6. «Перспективы использования энергетического потенциала твердых коммунальных отходов в промышленных технологиях» III Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием

«Современная металлургия нового тысячелетия», посвященная 10-летию Металлургического института ЛГТУ, 21-22 октября 2020 г, гор. Липецк, ЛГТУ.

7. «Экологическая цена электроэнергии» Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. Научно-практическая конференция, 2021 г., гор. Липецк, ЛГТУ.

По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 05.17.07 «Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ» в части 3, 10 и 12.

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертация Хоперского Руслана Игоревича является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей результаты, полученные на основании исследований, проведенных на высоком научном и техническом уровне с применением современных методов исследования. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные автором, теоретически обоснованы и не вызывают сомнений. Представленные в работе результаты принадлежат Хоперскому Руслану Игоревичу, они оригинальны, достоверны и отличаются научной новизной и практической значимостью.

С учетом научной зрелости автора, актуальности, научной новизны и практической значимости работы, а также ее соответствия требованиям положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», предъявляемым к подобным работам, диссертация на тему: «Энергоэффективная утилизация «хвостов» сортировки твёрдых коммунальных отходов с получением твёрдого и газообразного топлива» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.07 – «Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ».

Диссертация рассмотрена на заседании кафедры химии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Липецкий государственный технический университет», состоявшемся «31» марта 2021 года, протокол № 7. В обсуждении приняли участие: директор МИ, к.т.н. Чупров В.Б., зав. кафедрой химии, д.х.н. Калмыкова Е.Н., д.т.н., профессор Коршиков В.Д., д.т.н., профессор Дождиков В.И., д.т.н., профессор Володин И.М., д.х.н., профессор Ермолаева Т.Н., к.х.н., доцент Бондаренко А.В., к.т.н., доцент Андриянцева С.А., к.х.н., доцент Глазунова И.В., к.х.н., доцент Дергунова Е.С., к.х.н., доцент Красникова Е.М., к.х.н., доцент Мелихова Е.В., к.х.н., доцент Соболева И.Г., к.х.н., доцент Фарафонова О.В., к.х.н., доцент Шашканова О.Ю., к.т.н., доцент Чмырев И.Н.

Принимало участие в голосовании 16 человек. Результаты голосования: «За» - 16 человек, «Против» - 0 человек, воздержались - 0 человек, протокол № 7 от «31» марта 2021 г.

Председатель заседания  
зав. кафедрой химии, д.х.н.



Е.Н. Калмыкова

Секретарь заседания  
к.х.н., доцент



И.В. Глазунова

