

ПОЛЫГАЛОВ СТЕПАН ВЛАДИМИРОВИЧ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ
ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ ТВЕРДЫХ КОММУНАЛЬНЫХ ОТХОДОВ
С ПОЛУЧЕНИЕМ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА**

25.00.36 – Геоэкология (строительство и ЖКХ)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель:

Коротаев Владимир Николаевич,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Тугов Андрей Николаевич,
доктор технических наук, старший научный сотрудник, Открытое акционерное общество «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени теплотехнический научно-исследовательский институт», заведующий отделением парогенераторов и топочных устройств

Ощепкова Анна Зальмановна,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Уральский государственный научно-исследовательский институт региональных экологических проблем», заместитель директора по инновациям

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится «20» ноября 2019 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.02, по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29, ауд. 345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (www.pstu.ru).

Автореферат диссертации разослан «30» сентября 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д ПНИПУ.05.02,
кандидат технических наук, доцент

Е.В. Калинина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Твердые коммунальные отходы (ТКО) следует рассматривать как возможный энергетический ресурс, который безвозвратно теряется при их захоронении. Для обоснования использования ТКО в качестве энергетического ресурса и выбора эффективных методов и технологий получения энергии из ТКО необходимо в первую очередь оценить состав и свойства ТКО. В сложившейся практике обращения с отходами в России применение прямого сжигания ограничено по экологическим и экономическим причинам. Альтернативным решением является получение твердого топлива из отходов (ТТО), отвечающего требованиям ГОСТ 33516–2015 (EN 15359:2011). Использование ТТО в энергоемких процессах различных отраслей промышленного производства является одним из приоритетов развития отрасли обращения с отходами и области энерго- и ресурсосбережения. При этом одновременно снижается нагрузка на геосферные оболочки и уменьшается потребление первичных энергетических ресурсов (углеводородов), что также снижает геоэкологическую нагрузку при их добыче, подготовке и применении.

Однако в настоящее время в Российской Федерации практически весь объем (90–95 %) ТКО размещается как на полигонах, так и на несанкционированных свалках, которые создают нагрузку на геосферные оболочки за счет выделения биогаза в атмосферу и фильтрация в водные объекты. При этом изымаются значительные площади под захоронение ТКО. Эмиссии свалочного газа, состоящего преимущественно из двух парниковых газов – метана и диоксида углерода, вносят вклад в глобальные климатические изменения, влияют на состояние окружающей среды и биотопов.

Сортировка, сжигание и захоронение ТКО при выполнении всех нормативных требований по защите окружающей среды за счет применения эффективного пылегазоочистного оборудования, очистных сооружений и современных технологий при строительстве и эксплуатации полигонов не оказывают сверхнормативного воздействия на геосферные оболочки и могут считаться безопасными. В то же время географическая, временная и технологическая разобщенность объектов обращения с ТКО затрудняет геоэкологическую оценку их жизненного цикла. Таким образом, актуальным является выбор критериев (в частности выбросы парниковых газов и площади земель, заделываемые под участки захоронения ТКО), обеспечивающих сравнение сложных техногенных ресурсных циклов.

Тема диссертационной работы соответствует паспорту специальности 25.00.36 – Геоэкология (строительство и ЖКХ), пункту 5.18 «Теория, методы оценки существующих и создаваемых технологий, конструкций и сооружений, используемых в процессе строительства, в ЖКХ, и их влияние на состояние биотопов».

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в изучение состояния экологических проблем в области обращения с отходами внесли работы Н.Ф. Абрамова, Я.И. Вайсмана, В.Н. Коротаева, А.Н. Мирного, А.З. Ощепковой, К.Л. Чертеса, И.С. Глушанковой, В.И. Масликова, А.Н. Чусова, Н.В. Михайловой, и др. Методические подходы определения компонентного состава ТКО описаны в работах Г.В. Ильиных, П. Бруннера. Эмпирические модели расчета теплоты сгорания ТКО рассмотрены в работах Л. Кастило-

на, В. Комилиса, А. Хуриати и др. Результаты натурных исследований состава и свойств ТКО представлены в трудах А.Н. Тугова, О.В. Улановой, Г. Денафаса, М. Насрухала и др.

Известно, что исследования компонентного состава ТКО следует проводить с отбором достаточного количества представительных проб (SWA-Tool, 2004) в течение годового цикла в характерные сезоны с охватом в каждом сезонном исследовании всех дней недели (Методика исследования и свойств твердых отходов, 1970), а исследования теплотехнических свойств выполнять отдельно для каждой компонентной группы (методика, разработанная в ОАО «Всероссийский теплотехнический институт»). Вместе с тем рассматриваемые методики и полученные результаты не позволяют, во-первых, моделировать с необходимой детализацией состав и свойства ТТО, получаемых при разных технологиях обработки ТКО с учетом требований потребителей ТТО, во-вторых, оценить изменение воздействия всей системы обращения с отходами на геосферные оболочки при энергетической утилизации части исходного потока ТКО. Поэтому зачастую сложно обосновать технологии и оборудование для достижения заданных показателей качества ТТО с учетом компонентного и фракционного состава исходных отходов и выполнить сравнительную оценку возможных вариантов с точки зрения минимизации воздействия на окружающую среду.

Цель – разработка методических подходов к геоэкологической оценке технологий обработки твердых коммунальных отходов с получением твердого топлива на основе исследований состава и теплотехнических свойств отходов.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Установить факторы формирования геоэкологической нагрузки, в том числе влияющие на глобальные экологические эффекты, при обработке ТКО с получением твердого топлива из отходов.
2. Разработать методику геоэкологической оценки технологий обработки ТКО и получения ТТО на основе критериев, учитывающих снижение нагрузки на геосферные оболочки.
3. Оценить влияние различных компонентов ТКО на энергетический потенциал отходов на основе анализа их состава и свойств.
4. Обосновать возможность обработки ТКО и подготовки ТТО с целью получения топлива с заданными параметрами с учетом их состава и теплотехнических свойств.
5. Провести геоэкологическую оценку технологий получения ТТО на основе критериев, учитывающих снижение нагрузки на геосферные оболочки.

Научная новизна:

1. Разработана методика геоэкологической оценки технологий обработки ТКО и получения ТТО, основанная на расчете прямых, косвенных и предотвращенных выбросов парниковых газов на всех этапах обращения с отходами и оценке задалживания земельных территорий под захоронение ТКО с учетом состава отходов и свойств отдельных компонентов.
2. Установлены закономерности изменения теплоты сгорания, влажности и зольности отдельных компонентов в зависимости от размера фракции. Теплота сгорания

ТКО увеличивается с возрастанием размера фракции: отсев с размерами частиц 0–15 мм имеет теплоту сгорания в три раза меньше теплоты сгорания несортированных ТКО, а фракции с размерами частиц от 100 мм – в 1,3 раза выше.

3. Обоснована возможность получения ТТО с заданными параметрами на основании выявленных зависимостей массы и теплоты сгорания ТТО от содержания отдельных компонентов в исходных отходах и их влажности. Установлено, что для городов с населением более миллиона человек при исходной влажности энергетической фракции ТКО разного состава теплота сгорания колеблется от 10,5 (при влажности 47,8 %) до 18,1 МДж/кг (при влажности 24,9 %), при этом масса ТТО составляет 36 и 15 % от исходной массы ТКО. Путем высушивания и измельчения можно получить ТТО от 11,7 до 21,1 % от исходного потока ТКО с теплотой сгорания от 20 до 22 МДж/кг (при влажности 10 %).

4. Доказано снижение воздействия на геосферные оболочки (атмосферный воздух и почву) при обработке ТКО и получении ТТО разных композиций. Сокращение выбросов парниковых газов составит от 18 до 68 % и площади заделываемых земель – от 25 до 47 % по отношению к размещению отходов на полигоне ТКО в зависимости от отбираемого состава ТТО.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в разработке методических подходов к определению теплотехнических свойств ТКО, а затем оценке их энергетического потенциала на основе покомпонентных и пофракционных исследований теплотехнических свойств ТКО.

Практическая значимость работы заключается в апробации методического подхода к оценке состава и теплотехнических свойств ТКО для городов Самары, Перми, Екатеринбурга, Казани, Санкт-Петербурга, Оренбурга и Первоуральска. Результаты исследований использованы для анализа состава и свойств потоков ТКО с последующей геоэкологической оценкой технологий обращения с отходами при проведении совместного научного проекта международных исследовательских групп ученых на базе ПНИПУ «Разработка научных основ совершенствования технологий глубокой оптико-механической сортировки муниципальных отходов для извлечения ресурсного потенциала» (грант Министерства образования Пермского края № С–26/615 от 19.12.2012 г.) и государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках мероприятия «Инициативные научные проекты» (код заявки 5.9729.2017/8.9). Материалы диссертационного исследования использованы в учебном процессе подготовки обучающихся по направлению «Техносферная безопасность».

Методология и методы исследования. При выполнении работы проводились полевые и лабораторные исследования проб отходов с использованием физико-химических методов. Для обработки результатов исследования применялись методы: анализа и обобщения информации, анализа материального баланса, системного и структурного анализов, анализа жизненного цикла, статистической обработки результатов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика геоэкологической оценки технологий обработки ТКО и получения ТТО, основанная на расчете выбросов парниковых газов на всех этапах обращения с отходами и оценке заделывания земельных территорий под захоронение ТКО с учетом состава отходов и свойств отдельных компонентов.
2. Установленные закономерности изменения теплотехнических свойств ТКО в зависимости от размера их фракции и свойств отдельных компонентов.
3. Выявленные зависимости массы и теплоты сгорания ТТО от содержания отдельных компонентов ТКО и их влажности.
4. Геоэкологическая оценка технологий обработки ТКО и получения ТТО разных композиций, позволяющая определить снижение воздействия объектов обращения с ТКО на окружающую среду.

Степень достоверности результатов обеспечивается применением стандартных методов исследования, отбора проб и определения физико-химических свойств образцов компонентов ТКО. Научные положения, выводы, сформулированные в диссертации, подкреплены апробацией. Подготовка, статистический анализ данных и интерпретация полученных результатов осуществлены с использованием современных методов обработки информации.

Апробация результатов исследований. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на конференции по совместным действиям в области формирования демократичного гражданского общества на фоне глобальных проблем климата и охраны окружающей среды и сохранения мира (Республика Молдова, г. Кишинев, 2015 г.), международном конкурсе научно-исследовательских проектов молодых ученых и студентов «Eurasia Green» VIII Евразийского экономического форума молодежи (г. Екатеринбург, 2017 г.), специализированной конференции Международной ассоциации по твердым отходам (ISWA) «Системы управления в обращении с ТКО: правовые, финансовые и технические решения» (г. Москва, 2017 г.), международной научной конференции «От обращения с отходами к управлению ресурсами» (г. Пермь, 2015 г., 2017 г.), международной конференции «Управление муниципальными отходами как важный фактор устойчивого развития мегаполиса» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.).

Публикация результатов. По материалам диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них: четыре – в журналах, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных изданиях, три работы опубликованы в журналах, индексируемых в международных реферативных базах: Chemical Abstract, GeoRef, Scopus, Web of Science, и два патента.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит список литературы из 161 источников, 4 приложений. Текст изложен на 158 страницах, включает 35 рисунков и 28 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность проблемы и степень ее разработанности, сформулированы основная цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены методология и методы исследований, изложены основные выносимые на защиту положения, степень достоверности и апробация результатов.

В **первой главе** представлена оценка объектов обращения с отходами в совокупности с компонентами прилегающей геосреды как природно-техногенной системы. Приведены теплотехнические свойства компонентов и фракций ТКО. Выявлены основные методы управления качеством ТТО для их последующей термической утилизации, а также установлены требования к ТТО (теплота сгорания, содержание хлора и ртути). Дополнительные требования к качеству ТТО (например, по влажности и зольности) устанавливаются исходя из условий использования конкретным потребителем. Дана оценка объемов выбросов парниковых газов от использования ТКО или ТТО и площадей заделываемых земель от захоронения ТКО при разной системе обращения с отходами. Например, при сжигании 1 кг ТТО выделяется от 1,42 до 1,68 кг CO_2 -эквивалента прежде всего за счет наличия пластика в потоке ТТО. Под объекты размещения ТКО ежегодно отчуждается более 10 тыс. га земель по всей России, следовательно, происходит постоянное увеличение земельных площадей под захоронение.

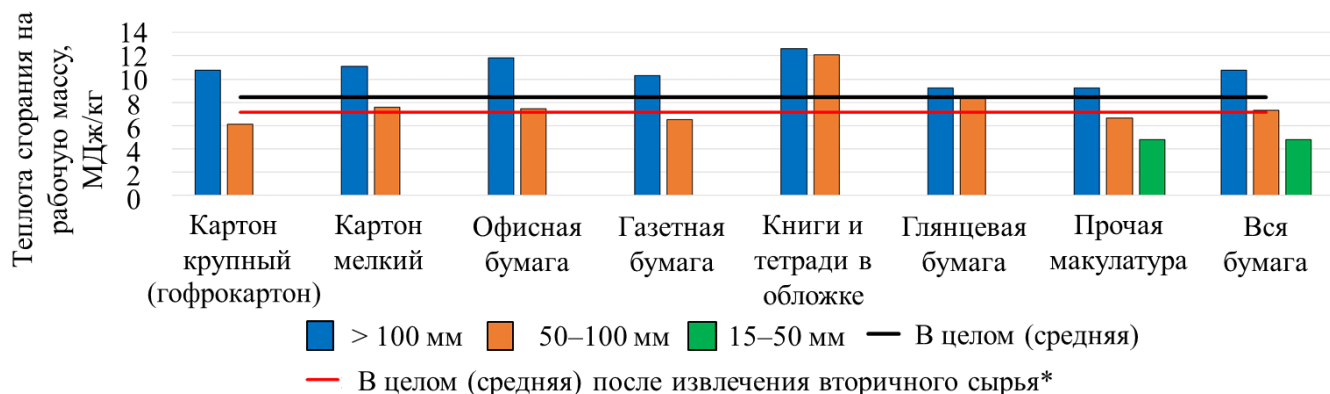
Во **второй главе** приведены основные положения методики геоэкологической оценки технологий обработки ТКО и получения ТТО, включающей оценку энергетического потенциала ТКО, моделирование технологий обработки ТКО, оценку воздействия на геосферные оболочки и сравнительную оценку вариантов обращения с отходами (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Методика геоэкологической оценки технологий обработки ТКО и получения ТТО

Для оценки энергетического потенциала ТКО предложена методика определения основных показателей, которая включает в себя: 1) развернутые полевые пофракционные исследования компонентного состава ТКО; 2) отбор проб отдельных компонентов и пофракционные лабораторные исследования их влажности и зольности; 3) расчет влажности, зольности и теплоты сгорания ТКО в целом на основании состава отходов и свойств отдельных компонентов. Для обоснования технологий обработки ТКО и подготовки ТТО разработан алгоритм моделирования технологий обработки ТКО, который позволяет рассчитать количественные и качественные характеристики потоков ТКО в зависимости от используемых технологий, эффективности оборудования и степени извлечения компонентов на различных этапах, состава и свойств исходных ТКО, а также оценить возможность получения ТТО для дальнейшего применения в различных энергоемких технологических процессах, например, в цементном производстве. Оценка воздействия технологий обработки ТКО и получения ТТО на геосферные оболочки основана на расчете прямых, косвенных и предотвращенных выбросов парниковых газов на всех этапах обращения с отходами с учетом состава и свойств ТКО и характеристик применяемого оборудования, а также на оценке площадей, изымаемых и заделываемых земель под захоронение ТКО. Данные показатели позволяют сравнивать разные системы обращения с отходами и учитывать воздействие на атмосферный воздух и почву даже при соблюдении нормативных требований по защите окружающей среды за счет контроля и очистки выбросов загрязняющих веществ и фильтрата.

В **третьей главе** по результатам пофракционных исследований влажности и зольности 40–43 компонентов (обобщены в 13 категорий, к основным относятся бумага и полимеры) установлено, что теплотехнические свойства отдельных компонентов ТКО отличаются внутри одной категории компонентов и зависят от размера фракции. Например, теплота сгорания на рабочую массу отходов бумаги размером более 100 мм колеблется от 9,2 до 12,6 МДж/кг для разных видов, бумаги размером 50–100 мм изменяется от 6,1 до 12,1 МДж/кг. Средняя теплота сгорания бумаги размером 15–50 мм составляет 4,8 МДж/кг, при средней теплоте сгорания всех отходов бумаги 8,4 МДж/кг (Рисунок 2).

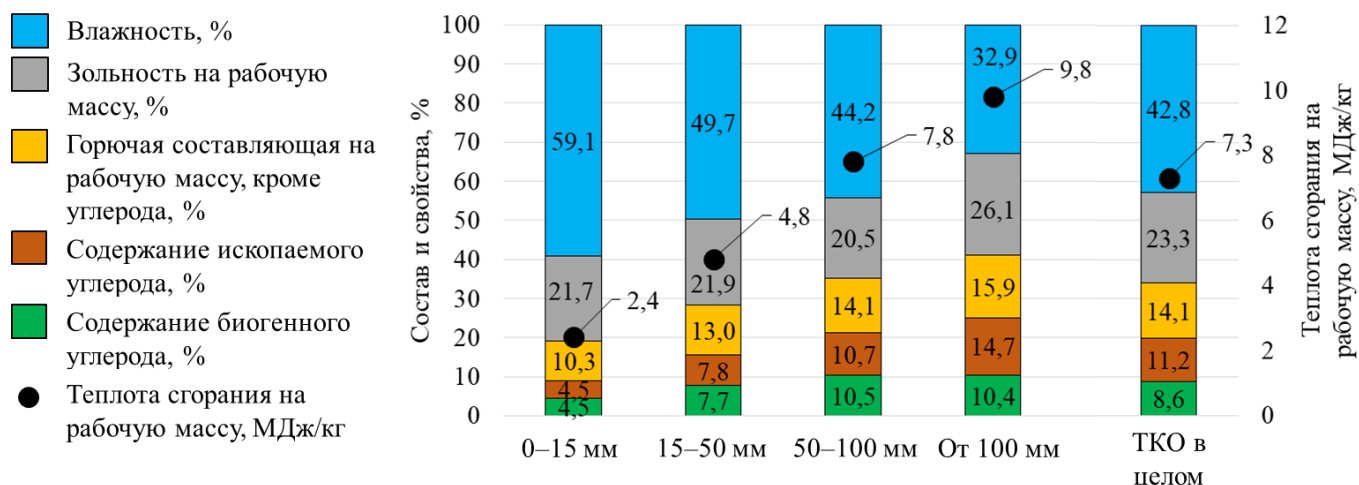


Примечание: * после отбора 80 % востребованных видов бумаги (гофрокартона, мелкого картона, офисной бумаги, газетной бумаги, книг и тетрадей) размером более 100 мм

Рисунок 2 – Теплота сгорания бумаги на рабочую массу

Выявлено, что при извлечении ценных видов бумаги размером более 100 мм на технологических линиях сортировки ТКО теплота сгорания оставшейся бумаги на рабочую массу снижается до 7,1 МДж/кг из-за увеличения доли влажной прочей бумаги со значительным загрязнением песком.

Установлено, что вклад пищевых отходов и отсева в общую влажность ТКО в летний и осенний период составляет около 70–80 % всей влаги отходов (при общей влажности отходов – 40–49 %), в зимний и весенний период – около 50–60 % (при общей влажности отходов – 32–36 %). Общая зольность на сухую массу ТКО колеблется по сезонам от 30 до 45 %, на рабочую массу – от 20 до 27 %, что обусловлено высоким содержанием негорючих компонентов (камней, строительных отходов, стекла и т.п.). Теплотехнические свойства ТКО разных фракций значительно отличаются (Рисунок 3). Выполненные исследования позволили установить, что фракция ТКО размером более 100 мм характеризуется относительно низкой влажностью (32 %) и высоким содержанием горючей массы и, соответственно, относительно высокой теплотой сгорания. Высокая влажность фракции ТКО размером 0–15 мм (59 %) обуславливает ее низкую теплоту сгорания. Фракция ТКО размером более 100 мм имеет наибольшую зольность из-за высокой доли стекла, металлов. С увеличением размера фракции ТКО увеличивается содержание горючих веществ (для сравнения – 19 % для фракции 0–15 мм и 41% для фракции ТКО размером более 100 мм).



Компонент	Содержание, %				
Полимеры	0,0	1,8	4,1	10,8	16,7
Макулатура	0,0	2,9	2,3	6,1	11,3
Органические отходы	0,0	10,4	5,2	8,0	23,6
Стекло	0,0	0,4	1,4	5,8	7,6
Прочее	18,7	4,6	4,0	13,4	40,7

Рисунок 3 – Теплотехнические свойства ТКО разного размера и состава

Таким образом, фракция с размерами частиц более 50 мм составляет в среднем 60 % массы отходов и приносит 80 % энергетического потенциала ТКО (Рисунок 4). Изменения теплоты сгорания ТКО в зависимости от размера фракции позволяют рассматривать методы разделения отходов по крупности (грохочение, просеивание) как способ концентрирования горючих компонентов в одном потоке и, соответственно, повышения его теплоты сгорания.

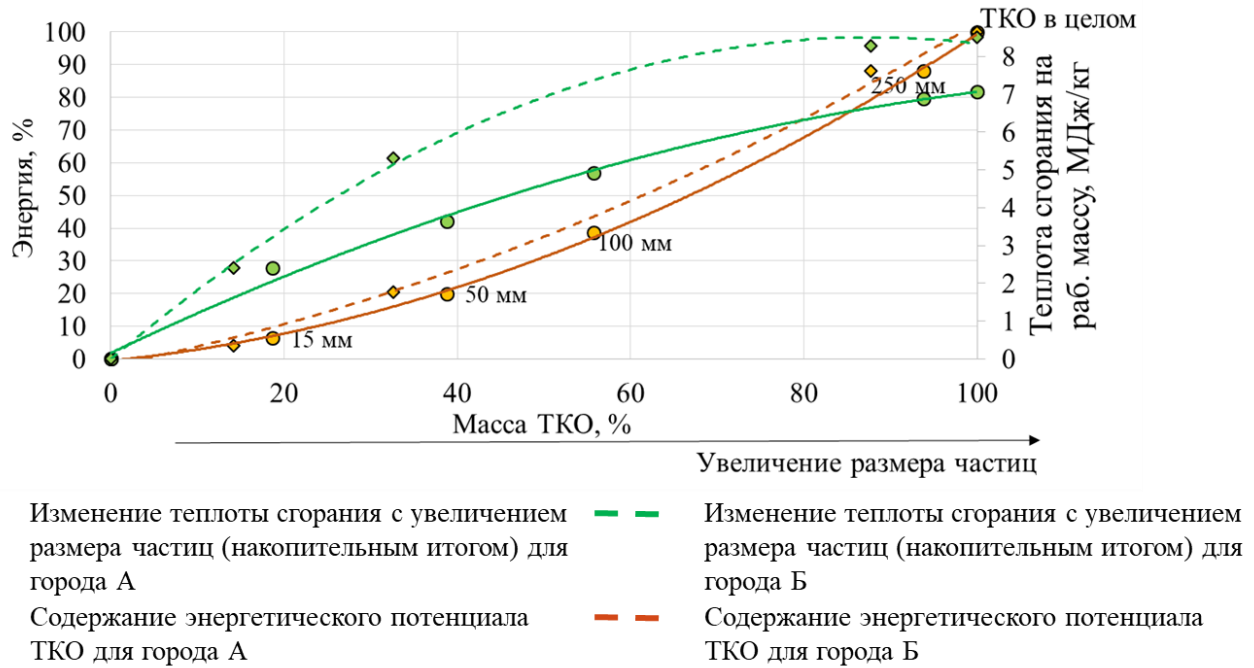


Рисунок 4 – Зависимость энергетического потенциала ТКО от доли ТКО в мере увеличения размера частиц

Расширенные исследования теплотехнических свойств отдельных компонентов ТКО позволяют получить подробные и достоверные данные для последующего моделирования качественных характеристик выходящих потоков и обосновывать оборудование для той или иной технологической линии обработки ТКО. В частности, выделение большого перечня компонентов и исследования их теплотехнических свойств позволяют оценивать энергетический потенциал «хвостов» сортировки, который меняется в зависимости от перечня отбираемых видов вторичного сырья.

В **четвертой главе** выполнена оценка технологий обработки ТКО для их последующей энергетической утилизации по нескольким вариантам на примере типичного российского города с численностью населения более 1 млн человек. По результатам исследований состава ТКО по всем сезонам был произведен расчет среднегодового фракционного и компонентного состава ТКО, а также теплоты сгорания ТКО на основании экспериментальных исследований влажности, зольности на сухую массу отдельных компонентов. Для расчетов выделены четыре возможные технологии обращения с ТКО:

- **Вариант 0. Захоронение ТКО (В.0).** Данный вариант считается базовым, так как в России более 95 % ТКО размещается на объектах их захоронения.
- **Вариант 1. Прямое сжигание необработанных ТКО (В.1).** Сжигание осуществляется на мусоросжигательных заводах (МСЗ) без предварительной подготовки ТКО с получением тепловой и электрической энергии.
- **Вариант 2. Выделение вторичного сырья (В.2).** Применяется для выделения только вторичного сырья из общего потока ТКО. Оставшаяся часть ТКО направляется на объекты захоронения.

• Вариант 3. Получение твердого топлива из отходов (В.3). «Хвосты» сортировки подвергаются дополнительной обработке с выделением горючих компонентов. Для этого варианта возможны несколько подходов к реализации с точки зрения возможных комбинаций компонентов, извлекаемых в поток ТТО (Таблица 1).

Общий материальный баланс технологического процесса обработки ТКО и получения ТТО композиции 1 (см. Таблицу 1) и качественные характеристики каждого потока представлены на рисунке 5.

Результаты расчетов показали, что распределение компонентов по пото-

кам влияет на их теплоту сгорания:

- при использовании варианта 1 все 100 % ТКО отправляются на МСЗ с низшей теплотой сгорания 7,3 МДж/кг;
- после грохочения теплота сгорания потока увеличивается до 8,7 МДж/кг, отсев направляется на захоронение;
- при выделении вторичного сырья низшая теплота сгорания «хвостов» сортировки ТКО, составляющих 62 % от массы исходных ТКО, составляет 7,7 МДж/кг;
- с помощью оптико-механической сортировки выделяется энергетическая фракция ТКО (14,2 % от массы исходных ТКО) с теплотой сгорания 17,8 МДж/кг;
- в варианте 3 масса ТТО с теплотой сгорания 22,0 МДж/кг составляет 11,7 % от массы исходных ТКО.

В остатки сортировки уходит примерно треть энергетического потенциала исходных ТКО, что сопоставимо с потенциалом ТТО. Это объясняется тем, что остатки сортировки, имея относительно низкую теплоту сгорания 4,8 МДж/кг, по массе более чем в три раза превосходят получаемое ТТО. Поток ТТО обладает высокой теплотой сгорания при относительно небольшой массе.

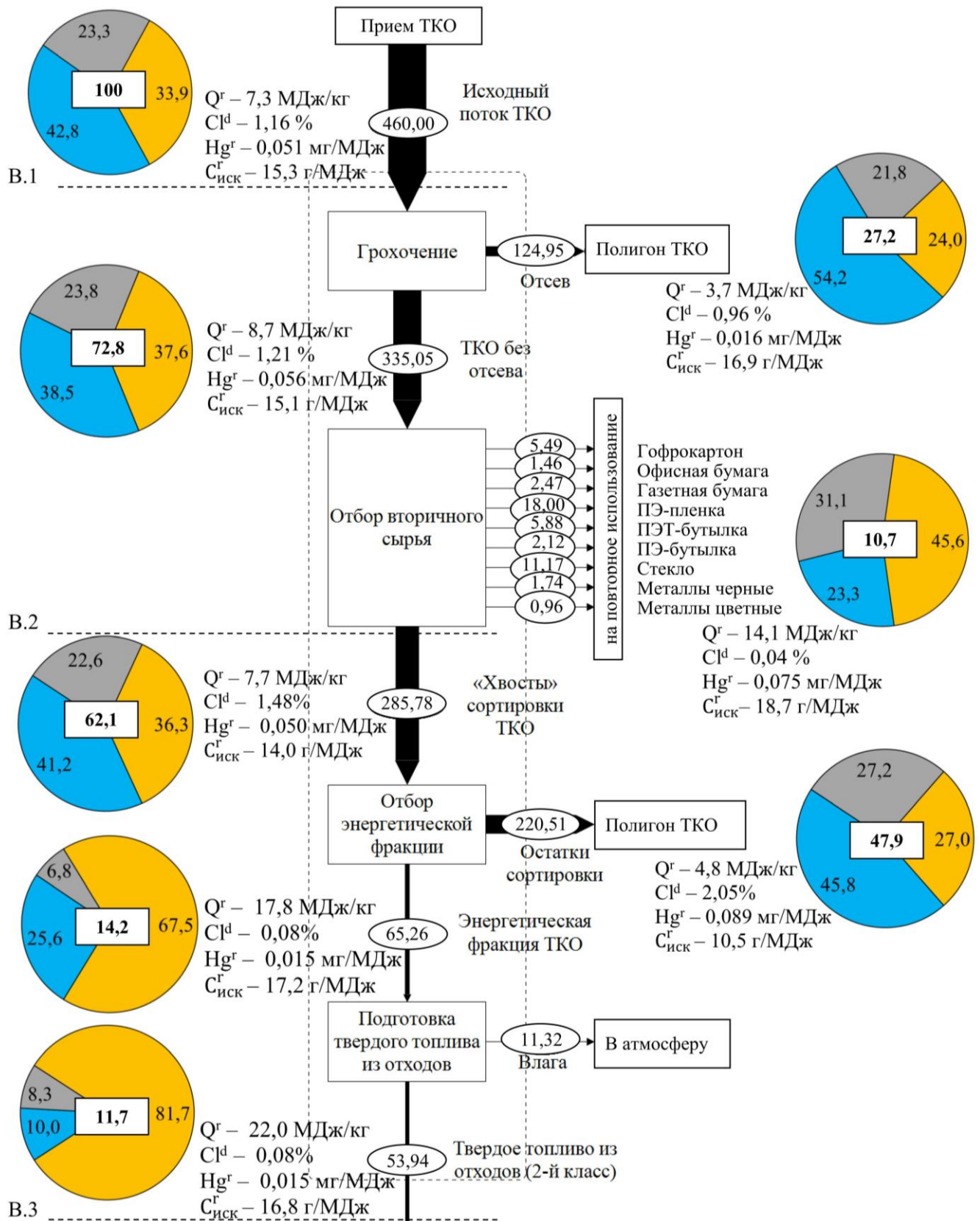
Установлено, что теплота сгорания ТТО зависит как от перечня отбираемых компонентов, так и от их влажности. Результаты теплоты сгорания ТТО для всех семи композиций и разной влажности представлены на рисунке 6. При исходной влажности энергетической фракции ТКО разного состава теплота сгорания колеблется от 10,5 МДж/кг (при влажности 48,0 %) до 18,1 МДж/кг (при высушивании до влажности 25,0 %). Например, при получении ТТО только из компонентов макулатуры и полимеров (композиция 1) из энергетической фракции с исходной влажностью 25,6 % и теплотой сгорания 17,8 МДж/кг можно получить ТТО с влажностью 10,0 % и теплотой сгорания 22,0 МДж/кг. При этом масса ТТО после высушивания будет составлять около 12,0 %.

Таблица 1 – Составы композиций ТТО влажностью 10 %

Отбираемые компоненты	Номер композиций						
	1	2	3	4	5	6	7
Доля от массы ТКО, %	11,7	12,5	13,4	15,7	16,3	18,1	21,1
Состав, % масс.:							
макулатура	42	40	37	32	30	26	22
полимеры	58	55	51	44	42	37	30
кожа, резина, обувь		5	5	4	4	4	3
дерево			7	6	6	5	4
текстиль				14	14	12	10
тетрапак					4	3	3
подгузники						13	9
органические отходы							19

Вход: 460,0 тыс. т/год

Выход: 460,0 тыс. т/год

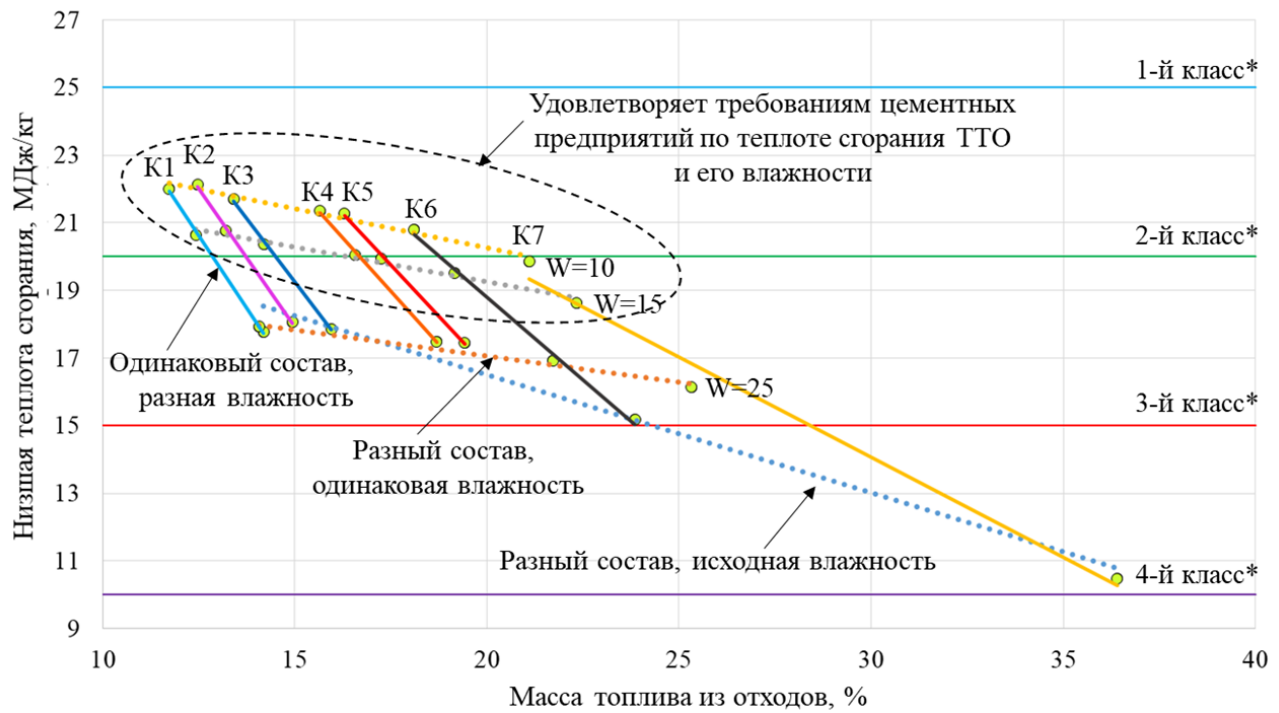


■ Влажность, % ■ Зольность, % ■ Горючая масса, % 47,9 Рабочая масса ТКО, %

Q – низшая теплота сгорания; Cl – содержание хлора; Hg – содержание ртути;

$C_{иск}$ – содержание ископаемого углерода; r – рабочая масса; d – сухая масса

Рисунок 5 – Материальный баланс технологического процесса обработки ТКО с получение ТТО (на примере композиции 1)



Примечание: * по системе классификации ТТО (ГОСТ 33516), W – влажность; K1–K7 – номер композиции (см. Таблицу 1)

Рисунок 6 – Зависимость теплоты сгорания ТТО от его влажности и перечня компонентов твердого топлива

Комплексная оценка технологий обработки ТКО с получением ТТО должна проводиться на основании результатов исследований компонентного и фракционного состава ТКО и их теплотехнических свойств, расчета материального баланса технологической линии сортировки и подготовки ТТО с учетом эффективности используемого оборудования, качественных характеристик получаемого ТТО, требований предприятий к ТТО.

В пятой главе на основании расчетов выбросов парниковых газов в пересчете на CO_2 -эквивалент и площадей земель, заделываемых под захоронение ТКО, для разных схем обращения с отходами сделан вывод, что обработка ТКО с выделением вторичного сырья и ТТО позволяет снизить нагрузку на окружающую среду, даже с учетом выбросов парниковых газов от работы машин и оборудования. Если принять выбросы парниковых газов при традиционном (В.0) способе обращения с отходами за 100 %, то при использовании В.2 можно снизить выбросы парниковых газов на 5,8 %, а при внедрении В.3 – от 18,4 до 67,6 %. Площадь участка захоронения отходов уменьшится на 10,7 % при применении технологии сортировки ТКО с выделением только вторичного сырья, при обработке ТКО и получении ТТО разного состава – от 25 до 47 %.

Для определения выбросов парниковых газов от получения ТТО нами предложено в систему классификации ТТО (ГОСТ 33516–2015) ввести дополнительный параметр – содержание ископаемого углерода, который позволит оценивать влияние применяемого топлива в том или ином энергетическом процессе на окружающую среду (Таблица 2). Содержание биогенного углерода при расчете выбросов парниковых газов не учитывается, так как сгорание биогенных материалов приводит к так называемым «климатически нейтральным» эмиссиям углекислого газа, вписывающимся в естественный цикл углерода.

Таблица 2 – Предложенная система классификации ТТО

Классификационный параметр	Статистическая характеристика	Единица измерения	Класс				
			1	2	3	4	5
Низшая теплота сгорания* Q^r , не менее	Среднеарифметическое значение	МДж/кг	25	20	15	10	3
Содержание хлора* Cl^d , не более	Среднеарифметическое значение	%	0,2	0,6	1,0	1,5	3,0
Содержание ртути* Hg^r , не более	Усредненное значение	мг/МДж	0,02	0,03	0,08	0,15	0,50
	80%-ное значение	мг/МДж	0,04	0,06	0,16	0,3	1,00
Содержание ископаемого углерода $C_{иск}^r$, не более	Среднеарифметическое значение	г/МДж	5	10	15	20	30

Примечание: * система классификации ТТО по ГОСТ 33516.

Содержание компонентов ископаемого происхождения в составе топлива определяет выбросы парниковых газов, поэтому для топлива, состоящего только из бумаги, значение выбросов парниковых газов будет стремиться к нулю, так как бумага состоит из биогенных материалов на 98 %.

Технико-экономическая оценка технологий обращения с ТКО с учетом расходов на захоронение или сжигание ТКО, расходов на экологические платежи за размещение отходов, расходов на обработку (капитальные и операционные затраты), доходов от реализации вторичного сырья и ТТО показала, что при захоронении и сжигании всех ТКО удельные значения итоговых затрат составляют 1,26 и 2,85 тыс. руб./т ТКО соответственно.

При реализации технологий обработки ТКО и получения ТТО с положительной стоимостью возможна их самоокупаемость и получение дохода от 0,58 до 0,65 тыс. руб./т ТКО. При внедрении технологии обработки ТКО только с извлечением вторичного сырья удельные значения дохода составляют 0,53 тыс. руб./т ТКО.

Сравнительная оценка технологий обращения с отходами с точки зрения геоэкологических и технико-экономических показателей показала, что технологии обработки ТКО эффективны по сравнению с захоронением ТКО. Наиболее эффективным методом является технология обработки ТКО и получения ТТО композиции 7, так как данный вариант позволяет максимально предотвратить выбросы парниковых газов в пересчете на CO_2 -эквивалент – около 196 тыс. т в год, при этом существенно сэкономить – до 860 млн руб. в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для геоэкологической оценки технологий обработки ТКО предложено использовать показатели: площади земель, задалживаемых под захоронение ТКО, и эмиссии парниковых газов на всех этапах обращения с отходами в качестве интегральных показателей, характеризующие влияние на геосферные оболочки (атмосферный воздух и почву) при соблюдении норм экологической безопасности объектов обращения с ТКО.

2. Разработана методика геоэкологической оценки технологий обработки ТКО и получения ТТО, основанная на оценке воздействия на геосферные оболочки,

моделировании технологий обработки ТКО, при помощи которого можно обосновать технологии и оборудование для достижения заданных показателей качества композиций ТТО, а также оценки энергетического потенциала ТКО с учетом исследований компонентного и фракционного состава ТКО и их теплотехнических свойств.

3. Установлены закономерности изменения теплоты сгорания, влажности и зольности отдельных компонентов в зависимости от размера фракции: теплота сгорания на рабочую массу бумаги размером более 100 мм колеблется от 9,2 до 12,6 МДж/кг, бумаги размером 50–100 мм изменяется от 6,1 до 12,1 МДж/кг. Средняя теплота сгорания бумаги размером 15–50 мм составляет 4,8 МДж/кг, при средней теплоте сгорания всех отходов бумаги – 8,4 МДж/кг.

4. Обоснована возможность получения ТТО с заданными параметрами на основании выявленных зависимостей массы и теплоты сгорания ТТО от влажности и содержания отдельных компонентов. При получении топлива, состоящего только из компонентов макулатуры и полимеров (композиция 1) из 1 тонны ТКО исходной влажностью 25,6 % и теплотой сгорания 17,8 МДж/кг после отбора вторичного сырья, извлечения и подготовки может быть получено 0,12 кг ТТО с влажностью 10 % и теплотой сгорания 22,0 МДж/кг.

5. Доказано снижение воздействия на геосферные оболочки при обработке ТКО и получении ТТО разных композиций. Выбросы парниковых газов сократятся с 18 до 68 % и площадь под захоронение ТКО – с 25 до 47 % по отношению к размещению отходов на полигоне ТКО в зависимости от композиции ТТО.

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с геоэкологической оценкой технологий обработки отходов на основании проведения полевых и лабораторных исследований состава и свойств экскавированных отходов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях и в изданиях, приравненных к ним:

1. Исследования морфологического состава модельных проб твердых бытовых отходов с использованием оптико-механической сортировки / Г.В. Ильиных, Д.Л. Борисов, **С.В. Польшгалов**, Я.В. Базылева // Экология и промышленность России. – 2014. – № 4. – С. 24–28.

2. Польшгалов, С.В. Применение функционально-стоимостного анализа для оценки эффективности мусоросортировочных линий / **С.В. Польшгалов**, Г.В. Ильиных, В.Н. Коротаев // Экология промышленного производства – Межотраслевой научно-практический журнал. – 2015. – № 4. – С. 27–34.

3. Польшгалов, С.В. Систематизация технических и технологических решений по сортировке твердых коммунальных отходов / **С.В. Польшгалов** // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – №2 (26). – С. 17–31.

4. Польшгалов, С.В. Зависимость теплотехнических свойств твердых коммунальных отходов от их компонентного и фракционного состава / **С.В. Польшгалов**, Г.В. Ильиных,

В.Н. Коротаев // Теоретическая и прикладная экология. – 2018. – № 2. – С. 48–56 (**Scopus, Web of Science**).

5. Полыгалов, С.В. Управление свойствами твердого топлива из отходов / **С.В. Полыгалов**, Г.В. Ильиных, В.Н. Коротаев // Экология и промышленность России. – 2018. – № 22(10). – С.18–23 (**Chemical Abstract, GeoRef, Scopus**).

6. Полыгалов, С.В. Техничко-экономическая оценка технологий обработки твердых коммунальных отходов для их последующей энергетической утилизации / **С.В. Полыгалов** // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2018. – № 4. – С. 31–46.

7. Challenges and opportunities for energy recovery from municipal solid waste in the Russian Federation / **S. Polygalov**, G. Ilinykh, N. Sliusar, V. Korotaev, I. Rukavishnikova // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2019. Vol.222. – P.131–143. Doi:10.2495/EQ180131 (**Scopus**).

Патенты:

8. Способ оценки компонентного состава твердых коммунальных отходов: патент на изобретение: № 2613589 Российская Федерация, МПК G01N 19/00 (2006.01) / Коротаев В.Н., Ильиных Г.В., Борисов Д.Л., **Полыгалов С.В.**, Базылева Я.В., Вайсман Я.И., Слюсарь Н.Н., Куликова Ю.В.; заявитель и патентообладатель Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – № 2015152927; заявл. 09.12.2015; опубл. 17.03.2017.

9. Способ получения альтернативного топлива из твердых коммунальных отходов: патент на изобретение: № 2681655 Российская Федерация, МПК C10L 5/48 (2006/01), C10L 5/40 (2006.01), B09B 3/00 (2006.01), B03B 9/06 (2006.01) / **Полыгалов С.В.**, Коротаев В.Н., Бычков Е., Ильиных Г.В., Слюсарь Н.Н.; заявитель и патентообладатель Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – № 2018125358; заявл. 10.07.2018; опубл.: 12.03.2019.

Прочие работы по теме диссертации:

10. Внедрение раздельного сбора отходов в г. Перми / Я.В. Базылева, **С.В. Полыгалов**, Г.В. Ильиных, Н.Н. Слюсарь // Твердые бытовые отходы. – 2014. – № 10(100). – С. 56–59.

11. Зависимость качества и количества вторичного топлива от способа выделения и состава исходного потока отходов / Я.В. Базылева, **С.В. Полыгалов**, Г.В. Ильиных, В.Н. Коротаев // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2015. – № 3(19). – С. 97–111.