

На правах рукописи

Дука Арина Александровна



**СОВМЕСТНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ УТИЛИЗАЦИЯ
УГЛЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ И ОТХОДОВ
РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ**

Специальность 1.6.21. Геоэкология

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Пашкевич Мария Анатольевна

Официальные оппоненты:

Эпштейн Светлана Абрамовна

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», научно-учебная испытательная лаборатория «Физико-химии углей», заведующая лабораторией.

Таловская Анна Валерьевна

доктор геолого-минералогических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение геологии, профессор.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск.

Защита диссертации состоится **16 сентября 2026 г. в 13:15** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1163**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 16 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ
Павел Игоревич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Современная концепция устойчивого развития предполагает переход к ресурсосберегающим технологиям, сокращение образования отходов и вовлечение их в хозяйственный оборот. В Российской Федерации принят ряд стратегических документов, в том числе распоряжение Правительства от 14 июля 2021 г. №1912-р «Об утверждении целей и основных направлений устойчивого (в том числе зеленого) развития», где среди приоритетных целей указано повышение эффективности использования ресурсов и снижение негативного воздействия на окружающую среду.

Ключевым условием реализации поставленных целей является разработка теоретически и экспериментально обоснованных технологий переработки промышленных отходов, среди которых особое место занимают углесодержащие отходы, характеризующиеся значительными объемами накопления и высокой экологической опасностью. Углесодержащие отходы представлены двумя основными видами: отходами обогащения угля (ООУ), образующимися в процессе получения высококачественной угольной продукции, и золошлаковыми отходами (ЗШО), генерируемыми при сжигании угля на тепловых электростанциях и котельных.

Ежегодно в результате деятельности угольных обогатительных фабрик на территории Российской Федерации образуется более 60 млн тонн отходов. Объем образования золошлаковых отходов составляет 20 млн тонн в год. При этом уровень утилизации данных отходов остается крайне низким и не превышает 20%, а основной объем направляется на захоронение.

Объекты размещения углесодержащих отходов оказывают многокомпонентное негативное воздействие на окружающую среду. Под действием ветровой эрозии происходит пыление отвалов и хвостохранилищ, сопровождающееся переносом тонкодисперсных частиц на прилегающие территории и формированием атмохимических ореолов рассеяния. Осаждение углесодержащей пыли приводит к деградации почвенно-растительного покрова и накоплению поллютантов в почвах и растительной массе. Фильтрация атмосферных осадков через тело техногенных образований сопровождается вымыванием загрязняющих веществ и их поступлением в водные объекты.

Помимо этого, объекты размещения отходов занимают значительные земельные площади, изымаемые из хозяйственного оборота.

Таким образом, актуальность диссертационного исследования обусловлена необходимостью снижения негативного воздействия объектов размещения углесодержащих отходов на компоненты природной среды путем разработки научно обоснованного способа их утилизации, обеспечивающего вовлечение отходов в хозяйственный оборот.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в изучение проблемы накопления углесодержащих отходов и негативного воздействия на природную среду в зоне влияния объектов их размещения внесли работы таких отечественных ученых, как Н.Г. Валиев, В.Г. Михайлов, В.А. Андроханов, а также зарубежных исследователей J. Zhan, M. Karmis, F. Zhang.

Вопросам утилизации рассматриваемых видов отходов посвящено значительное количество научных работ. В исследованиях показана возможность использования углесодержащих отходов в различных отраслях промышленности (В.Д. Глуховский, L.F. Petrik, A.B. Колганов), в том числе в качестве топливных компонентов (В.И. Мурко, П.А. Стрижак, И.П. Сверчков). Тематика совместной термической переработки углесодержащего сырья и биомассы в последние годы привлекает внимание многих исследователей как в России, так и за рубежом (Г.С. Няшина, H. Zhu, Y. Qin).

Вместе с тем анализ научно-технической литературы показывает, что вопросы термической утилизации таких видов углесодержащих отходов, как отходы обогащения углей и золошлаковые отходы совместно с отходами растительного сырья, изучены недостаточно. Отсутствуют систематические данные об активирующем действии минеральных компонентов растительной золы на процессы окисления низкорекреационного углерода, не в полной мере раскрыты механизмы снижения эмиссии кислых газов при сжигании топлива. Это определяет необходимость проведения исследований по совместной утилизации рассматриваемых видов отходов с получением композиционных топлив для сокращения негативного воздействия на окружающую среду от объектов их накопления.

Объект исследования - углесодержащие отходы, представленные отходами обогащения угля и золошлаковыми отходами.

Предмет исследования - процессы термической утилизации углесодержащих отходов и отходов растительного сырья.

Цель работы – снижение негативного воздействия объектов размещения углесодержащих отходов на компоненты природной среды.

Идея работы – утилизацию углесодержащих отходов следует проводить путем их совместного пеллетирования с отходами растительного сырья, представленными отходами сельского хозяйства или деревообработки, с получением композиционных топлив для последующего сжигания на объектах топливно-энергетического комплекса.

Поставленная в диссертационном исследовании цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Анализ и оценка существующих и перспективных технологий утилизации углесодержащих отходов, принятых в отечественной и зарубежной практике.

2. Оценка экологической обстановки, сложившейся под воздействием антропогенной нагрузки, в районах расположения объектов размещения углесодержащих отходов, включая установление в лабораторных условиях закономерностей изменения качества почвенно-растительного покрова под воздействием углесодержащей пыли.

3. Оценка возможности использования углесодержащих отходов и отходов растительного сырья в качестве компонентов композиционных топлив.

4. Исследование физико-химических процессов, лежащих в основе процесса совместного горения низкорекреационных углесодержащих отходов и растительной биомассы.

5. Разработка рецептуры твердых композиционных топлив из углесодержащих отходов и отходов растительного сырья на основе энергетических и экологических характеристик процесса их совместного сжигания, включая установление зависимости массы образования кислых газов в газообразных продуктах горения от компонентного состава топлив и температуры термической утилизации.

6. Разработка и экономическое обоснование технологии утилизации углесодержащих отходов совместно с отходами сельского

хозяйства и деревообработки с получением композиционных топлив в виде пеллет.

Научная новизна работы:

1. Установлена обратная зависимость содержания фотосинтетических пигментов в газонных травах от величины пылевой нагрузки на почвенно-растительный покров, создаваемой объектами размещения углесодержащих отходов.

2. Выявлено активирующее действие карбонатов щелочных и щелочноземельных металлов, содержащихся в золе растительной биомассы, на процесс горения углесодержащих отходов и снижение эмиссии NO_x и SO_2 .

3. Определены оптимальные диапазоны температуры сжигания и соотношения компонентов композиционных топлив, полученных из углесодержащих отходов и отходов растительного сырья, обеспечивающие снижение удельных выбросов NO_x и SO_2 .

Соответствие паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту научной специальности 1.6.21. Геоэкология по пунктам: 17. Ресурсосбережение, санация и рекультивация земель, утилизация отходов производства и потребления, в том числе возникающих в результате добычи, обогащения и переработки полезных ископаемых, строительной, хозяйственной деятельности и эксплуатации ЖКХ. Геоэкологическое обоснование безопасного размещения, хранения и захоронения токсичных, радиоактивных и других отходов; 24. Теория и методы геоэкологической оценки существующих и создаваемых технологий добычи и переработки полезных ископаемых природного и техногенного происхождения, инженерная защита экосистем, прогнозирование, предупреждение и ликвидация загрязнений природной среды.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Выполнена оценка экологической опасности объектов размещения углесодержащих отходов с дополнением существующих теоретических представлений о механизмах воздействия углесодержащей пыли на почвенно-растительный покров, включая процессы блокирования фотосинтеза и избирательного накопления растениями серы и фосфора.

2. Выявлена возможность использования отходов растительного сырья в качестве источника активаторов, обеспечивающих снижение температуры воспламенения и энергии активации процесса термической деструкции низкореакционных углесодержащих отходов, а также способствующих связыванию кислых газов, образующихся в процессе горения, непосредственно в топочном пространстве.

3. Разработано техническое решение по совместной термической утилизации углесодержащих отходов и отходов растительного сырья, обеспечивающее снижение техногенной нагрузки на компоненты окружающей природной среды.

4. Результаты диссертационной работы приняты к использованию ООО «НПК ЭКОДРАЙВ» при разработке комплекса мероприятий по утилизации золошлаковых отходов (акт о внедрении (использовании) результатов от 25.03.2026).

5. Результаты диссертационной работы подтверждены патентом на изобретение № 2854163 «Брикетированное топливо из отходов углеобогащения».

Методология и методы исследования. Проведение исследований осуществлялось с использованием комплексных методов и подходов, включающих системный анализ проблемы обращения с углесодержащими отходами и факторами их негативного воздействия на компоненты окружающей среды; моделирование условий пылевого загрязнения почвенно-растительного покрова; лабораторные аналитические и экспериментальные исследования с использованием высокотехнологичной приборной базы Научного центра «Экосистема» Санкт-Петербургского горного университета; а также обработку данных и результатов с использованием средств и методов математического и компьютерного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Угнетение растительности в зоне воздействия техногенных массивов угольной промышленности и теплоэнергетики, вызванное осаждением на листовую поверхность растений до 12,2 мкг/(см²·сут) пыли в результате повышения пылевой нагрузки (до 1100 мг/(м²·сут)), сопровождается потерей содержания хлорофилла до 30%.

2. Интенсификация процесса горения углесодержащих отходов достигается их совместной термической утилизацией с отходами растительного сырья, содержащими 0,9-13,2 масс. % щелочных и щелочноземельных металлов в пересчете на активирующую способность калия, в определенных соотношениях (при утилизации с соломой 6:4, при утилизации с опилками 7:3).

3. Термическая утилизация углесодержащих отходов совместно с отходами растительного сырья на энергогенерирующих объектах приводит к снижению удельных выбросов NO_x на 40-55%, SO_2 на 78-92% на единицу энергии по сравнению со сжиганием твердого минерального топлива.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена комплексом теоретических и экспериментальных исследований с применением современного высокотехнологического оборудования, а также использованием классических и современных методов (методик) анализа и обработки данных; подтверждается их воспроизводимостью и отсутствием противоречий с известными и ранее опубликованными исследованиями.

Апробация результатов диссертации проведена на 7 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 6 международных; за последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных: 9-я Международная научно-практическая конференция «Инновационные перспективы Донбасса» (май 2023 года, г. Донецк); XI Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (май 2024 года, г. Санкт-Петербург); XII Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: Безопасное и эффективное освоение месторождений полезных ископаемых» (май 2025 года, г. Санкт-Петербург); XIX Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире» (март 2026 года, г. Пермь).

Реализация результатов работы. Диссертационное исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSRW-2024-0005).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе сведений по теме исследования; разработке программы и методологии экспериментальных исследований; непосредственном проведении лабораторных исследований и моделировании в лабораторных условиях с дальнейшей обработкой результатов; подготовке публикаций по результатам исследования и их апробации в рамках научных мероприятий.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 9 печатных работах, в том числе в 1 статье – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получен 1 патент и 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 213 наименований, и 7 приложений. Диссертация изложена на 216 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунка и 43 таблицы.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность и глубокую признательность научному руководителю д.т.н., профессору Пашкевич М.А. за научное руководство работой. За ценные научные консультации и помощь в реализации экспериментальных исследований к.т.н., директору научного центра «Оценка техногенной трансформации экосистем» Матвеевой В.А. и к.т.н., старшему научному сотруднику Сверчкову И.П., а также сотрудникам лаборатории моделирования экологической обстановки научного центра «Оценка техногенной трансформации экосистем» и всему коллективу кафедры геоэкологии Санкт-Петербургского горного университета.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель, задачи и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ проблемы образования и обращения с углесодержащими отходами. Дана характеристика состава и физико-химических свойств отходов. На основе обзора отечественного и зарубежного опыта обращения с углесодержащими отходами обоснована перспективность их использования в качестве компонентов твердых композиционных топлив.

Во второй главе рассмотрено воздействие объектов размещения углесодержащих отходов на компоненты природной среды. Описаны механизмы миграции загрязняющих веществ в окружающую среду, включая пылевынос с поверхностей техногенных массивов. Представлены результаты расчета рассеивания пыли и полевых исследований по определению величины пылевой нагрузки на территориях, прилегающих к объектам складирования отходов угольных предприятий. В рамках лабораторного вегетационного опыта приведена оценка воздействия углесодержащей пыли на растительный покров при различных уровнях пылевой нагрузки.

В третьей главе рассмотрена возможность повышения реакционной способности углесодержащих отходов соединениями щелочных и щелочноземельных металлов. Оценена применимость ООУ и ЗШО как компонентов композиционных топлив; лабораторно установлено влияние карбонатов металлов на характеристики и кинетику термической деструкции отходов. Обосновано использование отходов растительного сырья для интенсификации окисления углеродной матрицы, выполнена сравнительная оценка эффективности различных видов биомассы по изменению реакционной способности топливных смесей. Изучены закономерности образования оксидов азота и диоксида серы при сжигании композиционных топлив в зависимости от температуры и соотношения компонентов. На основе технологических и экологических критериев определены оптимальные рецептуры топлив и температурные режимы их термической утилизации.

Четвертая глава посвящена разработке технологической схемы изготовления твердых композиционных топлив из углеродсодержащих отходов и отходов растительного сырья путем их совместного пеллетирования, а также эколого-экономическому обоснованию эффективности способа утилизации.

В заключении сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Угнетение растительности в зоне воздействия техногенных массивов угольной промышленности и теплоэнергетики, вызванное осаждением на листовую поверхность растений до $12,2 \text{ мкг}/(\text{см}^2 \cdot \text{сут})$ пыли в результате повышения пылевой нагрузки (до $1100 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$), сопровождается потерей содержания хлорофилла до 30%.

Складирование отходов обогащения угля и золошлаковых отходов сопровождается ветровой эрозией поверхностей техногенных массивов. Ветровой перенос пылевых частиц приводит к формированию устойчивых атмохимических ореолов, которые охватывают значительные по площади прилегающие территории. Для оценки пространственного распространения загрязнения выполнен расчет рассеивания пыли от техногенных массивов предприятий угольной промышленности (рисунки 1, 2). По результатам расчета установлено превышение нормативных концентраций взвешенных веществ в атмосферном воздухе на границе санитарно-защитной зоны до $6,6 \text{ ПДК}_{\text{м.р.}}$ и жилых зон до $4,6 \text{ ПДК}_{\text{м.р.}}$.

Для подтверждения расчетных данных проведена оценка интенсивности осаждения пыли из атмосферного воздуха путем полевых мониторинговых исследований. Результаты продемонстрировали, что величина пылевой нагрузки в зоне воздействия техногенных массивов угольной промышленности изменяется в широком диапазоне – от 154 до $1100 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, что соответствует уровням загрязнения от низкого до очень высокого. Наибольшие значения зафиксированы в непосредственной близости от источников пылевыведения. По мере удаления от техногенных массивов уровень пылевой

нагрузки снижается, однако на границах жилых зон сохраняются значения до $615 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, что соответствует высокому уровню загрязнения. Повышение пылевой нагрузки на территориях, прилегающих к угольным техногенным массивам, обуславливает высокую интенсивность осаждения пыли на почвенно-растительный покров, что является причиной угнетения растительных организмов.

Для количественной оценки изменения состояния растительного покрова под воздействием пылевого загрязнения проведен вегетационный опыт, заключающийся в культивировании газонных трав на почвенном субстрате при различных уровнях моделируемой пылевой нагрузки. В экспериментах использовалась углесодержащая пыль, полученная путем измельчения отходов обогащения угля. Величина пылевой нагрузки составляла 100, 250, 450, 850 и $1100 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$, что позволило воспроизвести условия как умеренного, так и очень высокого загрязнения.

В ходе экспериментов доказано, что рост пылевой нагрузки от 100 до $1100 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ сопровождается увеличением осаждения на листовую поверхность трав с 1,0 до $12,2 \text{ мкг}/(\text{см}^2 \cdot \text{сут})$ пыли. Накопление частиц на листовых пластинах приводит к уменьшению высоты растений до 14%. При нагрузке $5,1 \text{ мкг}/(\text{см}^2 \cdot \text{сут})$ и выше наблюдаются выраженные морфологические изменения (преждевременное увядание и пожелтение листовых пластин).

Физиологические изменения проявляются в нарушении пигментного комплекса растений. Установлено, что с ростом пылеосаждения происходит снижение концентраций хлорофиллов *a* и *b*, а также каротиноидов. При величине $12,2 \text{ мкг}/(\text{см}^2 \cdot \text{сут})$ общее содержание хлорофилла уменьшается на 30% по сравнению с контрольным уровнем (рисунок 3). Одновременно снижается отношение хлорофилла *a* к хлорофиллу *b* и соотношение общего хлорофилла к каротиноидам, что свидетельствует о нарушении работы фотосинтетического аппарата и развитии стрессовой реакции (рисунок 4).

Данные о накоплении химических элементов в системе «почва – растение» подтверждают, что увеличение пылевой нагрузки сопровождается аккумуляцией ряда элементов в растительной массе. Наибольшие коэффициенты биоаккумуляции установлены для фосфора (до $K_6=1,6$) и серы (до $K_6=6,0$), что обусловлено присутствием в

составе пыли доступных для растений соединений данных элементов (таблица 1).

2. Интенсификация процесса горения углесодержащих отходов достигается их совместной термической утилизацией с отходами растительного сырья, содержащими 0,9-13,2 масс. % щелочных и щелочноземельных металлов в пересчете на активирующую способность калия, в определенных соотношениях (при утилизации с соломой 6:4, при утилизации с опилками 7:3).

В исследовании в качестве углесодержащего сырья рассматривались отходы обогащения углей Кузнецкого угольного бассейна и золошлаковые отходы, образующиеся при слоевом сжигании угля в котельном цехе. Экспериментально установлено, что данные отходы обладают значительным энергетическим потенциалом. Содержание углерода в отходах обогащения угля составляет 58,5%, в золошлаковых отходах – 57,7%, низшая теплота сгорания составляет 22,78 и 20,90 МДж/кг соответственно (таблица 2). Полученные значения подтверждают возможность использования ООУ и ЗШО в составе топливных композиций. Вместе с тем низкий выход летучих веществ указывает на то, что основная часть органической массы отходов представлена фиксированным низкорекреационным углеродом. Процесс его окисления протекает в высокотемпературной области, что ограничивает самостоятельное использование отходов в качестве топлива и обуславливает необходимость введения активаторов с целью повышения реакционной способности углеродной матрицы.

Для интенсификации процесса горения углесодержащих отходов в качестве активирующих добавок были рассмотрены карбонаты щелочных и щелочноземельных металлов – K_2CO_3 , Na_2CO_3 , $CaCO_3$ и $MgCO_3$, вводимые в состав ООУ и ЗШО в количестве от 0,5 до 20 масс. %. В серии экспериментов по термогравиметрическому (ТГ) анализу установлено, что введение данных соединений сокращает время полного озоления образцов, а выраженный эффект проявляется при содержании добавки не менее 1 масс. %. Наибольшей активностью характеризуется карбонат калия, при этом эффективность добавок возрастает в ряду $MgCO_3 < CaCO_3 < Na_2CO_3 < K_2CO_3$. Увеличение содержания активатора свыше 10 масс. % не приводит к

пропорциональному ускорению процесса и сопровождается шлакообразованием, в связи с чем оптимальным диапазоном содержания добавки является 1-10 масс. %. Для сравнения активирующего действия металлов на основе результатов ТГ анализа рассчитана их относительная активность по отношению к калию (принята за единицу), составляющая для Na 0,67, для Ca 0,39, для Mg 0,34.

Исследование механизма действия активаторов проводилось с использованием образцов углесодержащих отходов, модифицированных K_2CO_3 . Установлено, что введение 10 масс. % карбоната калия приводит к смещению процесса окисления в область более низких температур, что отражено на ТГ и дифференциальных термогравиметрических (ДТГ) кривых (рисунки 5, 6): температура воспламенения (T_i) ООУ снижается на 82 °С, температура выгорания (T_b) – на 143 °С; для ЗШО – на 110 и 59 °С соответственно. Интегральные индексы горения (S_b), воспламеняемости (G) и комплексный индекс горения (S) возрастают на 28-62%, что свидетельствует об ускорении воспламенения, повышении стабильности пламени и полноты выгорания (таблица 3). Кинетический анализ продемонстрировал снижение энергии активации горения ООУ с 78,6 до 46,5 кДж/моль, для ЗШО – с 111,3 до 85,1 кДж/моль. Механизм активирующего действия реализуется путем формирования более развитой реакционной поверхности, что подтверждается увеличением удельной площади поверхности и результатами сканирующей электронной микроскопии образцов после термической обработки с K_2CO_3 (рисунок 7).

Поскольку соединения щелочных и щелочноземельных металлов входят в состав минеральной части растительной биомассы, использование растительных отходов в качестве компонента топливных смесей позволяет заменить чистые карбонаты металлов доступным и возобновляемым сырьем. В качестве источника активирующих добавок были рассмотрены солома, подсолнечник (листья и стебли), лузга подсолнечника и опилки. Их использование обосновано как высоким содержанием летучих веществ, обеспечивающим ускорение воспламенения, так и наличием в минеральной составляющей соединений K, Na, Ca и Mg. Суммарное содержание указанных металлов в растительном сырье изменяется от 0,81 до 7,69 масс. % (таблица 4). Для подтверждения активирующей способности минеральной части

биомассы проводилось исследование смесей ООУ и ЗШО с 10 масс.% золы растительных отходов. Выявлено, что введение золы приводит к смещению пиков ДТГ в область более низких температур, увеличению максимальной скорости потери массы и росту интегральных индексов горения (таблица 5). Полученные данные обуславливают целесообразность изучения топливных смесей углесодержащих отходов непосредственно с отходами растительного сырья.

Исследование горения топливных смесей с содержанием указанных растительных отходов от 10 до 50 масс. % выявило снижение температур протекания процесса с увеличением доли биомассы. В качестве наиболее показательного критерия выбран комплексный индекс горения S , который позволяет оценить не только реакционную способность топлива, но и полноту протекания процесса горения. Рост данного показателя подтверждает ускорение воспламенения, повышение скорости выгорания и стабилизацию процесса окисления (рисунок 8). Наиболее выраженный эффект установлен для топливных смесей с 30-40 масс. % соломы и опилок. Подсолнечник обладает меньшим эффектом. Лузга не обеспечивает достаточной интенсификации горения. На основании установленного оптимального содержания активатора 1-10 масс. % и оптимальной доли растительного компонента 30-40 масс. % рассчитаны граничные значения суммарного содержания К, Na, Са и Mg в исходном растительном сырье. Для обеспечения активирующего эффекта содержание должно составлять 0,9-13,2 масс. % в пересчете на активирующую способность калия. Рассчитанные значения для исследуемых растительных отходов составляют: солома – 1,7%, подсолнечник – 5,6%, лузга – 0,7%, опилки – 1,3%. Для лузги суммарное содержание активных металлов является недостаточным, что согласуется с результатами, полученными в ходе термогравиметрического анализа. Следовательно, применение лузги в составе топливных композиций нецелесообразно.

Для композиций на основе углесодержащих отходов и опилок оптимальным соотношением является 7:3, для топливных смесей с соломой – 6:4. Снижение доли растительных отходов менее указанных значений ведет к уменьшению объема реакционноспособной биомассы, что не позволяет в полной мере реализовать активирую-

щий эффект минеральных компонентов. Увеличение доли растительных отходов не приводит к улучшению характеристик горения, при этом удельная теплота сгорания смеси снижается более интенсивно за счет разбавления отходов менее энергоемкой биомассой.

3. Термическая утилизация углесодержащих отходов совместно с отходами растительного сырья на энергогенерирующих объектах приводит к снижению удельных выбросов NO_x на 40-55%, SO_2 на 78-92% на единицу энергии по сравнению со сжиганием твердого минерального топлива.

Использование на объектах теплоэнергетики композиционных топлив, получаемых из углесодержащих отходов и отходов растительного сырья, может рассматриваться как эффективный способ уменьшения техногенной нагрузки на атмосферный воздух. Введение в состав топлива растительных отходов с высоким содержанием летучих веществ позволяет снизить максимальную температуру в топке, что приводит к уменьшению выхода термических NO_x . Сокращение эмиссии SO_2 при совместном сжигании достигается вследствие разбавления углесодержащих отходов биомассой, характеризующейся низким содержанием серы.

Кроме того, сокращение выбросов NO_x и SO_2 в процессе сжигания топлива обусловлено, в том числе, присутствием в минеральной части растений соединений щелочных и щелочноземельных металлов, которые вступают в реакции связывания и восстановления указанных газообразных продуктов в топочном пространстве. Для подтверждения теоретических данных проведены экспериментальные исследования по анализу отходящих газов при сжигании углесодержащих отходов с добавлением 10 масс. % золы отходов растительного сырья. Как следует из результатов, представленных на рисунках 9, 10 добавление золы биомассы к углесодержащим отходам приводит к уменьшению удельных выбросов оксидов азота и диоксида серы. Максимальный эффект достигается при использовании золы подсолнечника: на 39% для ЗШО и 59% для ООУ по NO_x , 53% для ЗШО и 84% для ООУ по SO_2 .

Результаты экспериментальных исследований показали, что снижение удельных выбросов оксидов азота при сжигании углесодержащих отходов в присутствии золы растительного сырья связано

с изменением условий горения и восстановления соединений азота. Минеральные компоненты биомассы, содержащие соединения щелочных и щелочноземельных металлов, повышают реакционную способность углеродистого остатка, способствуют восстановлению NO_x до N_2 и обеспечивают снижение температур протекания горения, что ограничивает образование термических NO_x . Снижение выбросов SO_2 достигается его связыванием соединениями щелочных и щелочноземельных металлов с образованием сульфатов. Данный механизм подтверждается результатами рентгенофазового анализа золы от сжигания композиционного топлива.

Для уточнения оптимальных составов композиционных топлив и оценки влияния температурного режима на эффективность снижения эмиссии NO_x и SO_2 были проведены экспериментальные исследования по анализу отходящих газов при совместном сжигании углесодержащих отходов и отходов растительного сырья. Эксперименты проводились в интервале температур 800-1100 °C с шагом 50 °C. Данный диапазон охватывает типичные режимы работы камер сгорания теплоэнергетических установок и позволяет выявить температурные границы, при которых эффект биомассы проявляется наиболее полно.

Результаты, представленные на рисунках 11-14, показывают, что для всех исследованных композиций наблюдается выраженная зависимость удельных выбросов NO_x и SO_2 от температуры и доли растительных отходов. Однако выявлено, что введение подсолнечника в состав топливной смеси сопровождается увеличением выбросов NO_x до 43% вследствие более высокого содержания азота в данном виде растительного сырья. Следовательно, применение подсолнечника в составе топливных композиций нецелесообразно.

На основании анализа отходящих газов установлены оптимальные соотношения компонентов в составе композиционных топлив. Наибольшее снижение эмиссии оксидов азота и диоксида серы достигается при содержании 40 масс. % соломы или 30 масс. % опилок, что коррелирует с результатами термогравиметрических исследований. Кроме того, определены оптимальные температурные интервалы сжигания – 900-1000 °C, в которых наблюдается наибольшая эффективность снижения выбросов NO_x и SO_2 при сохранении

высокой полноты сгорания углеродной матрицы.

По результатам сравнительного анализа установлено, что относительно сжигания длиннопламенного угля, принятого за образец сравнения, использование композиционных топлив позволяет снизить удельные выбросы (на 1 МДж) оксидов азота на 40-55% (от 40% для смеси ООУ с соломой до 55% для смеси ЗШО с опилками), а диоксида серы – на 78-92% (от 78% для смеси ООУ с соломой до 92% для смеси ООУ с опилками) (рисунок 15).

Технологическая реализация процесса утилизации предполагает совместное пеллетирование углесодержащих отходов и отходов растительного сырья с получением твердого композиционного топлива. Основные стадии включают подготовку и измельчение сырья, дозирование компонентов, смешивание с добавлением воды, формование пеллет и их последующую сушку (рисунок 16). Получаемое топливо по техническим характеристикам соответствует требованиям, установленным для биотоплива твердого и топлива твердого минерального, что подтверждает возможность его применения в энергетических установках. Экономический эффект от реализации технологии формируется за счет сокращения платы за размещение отходов и продажи товарного угля, который используется в качестве основного топлива на котельных угольных предприятий. При годовой потребности котельной 6956 т угля расчетный экономический эффект составляет 18,6 млн руб./год для топлива на основе ООУ и опилок и 15,5 млн руб./год для топлива на основе ООУ и соломы, при сроке окупаемости менее одного года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предлагается новое решение актуальной научной задачи – снижение негативного воздействия объектов размещения углесодержащих отходов путем их термической утилизации совместно с отходами растительного сырья.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Экспериментально подтверждено, что воздействие углесодержащей пыли на почвенно-растительный покров сопровождается проявлением морфологических признаков угнетения растений и потерей содержания фотосинтетических пигментов до 30%.

2. На основе критического обзора установлено, что наиболее перспективным направлением утилизации углесодержащих отходов является их использование в качестве компонентов топливных композиций.

3. Доказано, что отходы обогащения углей и золошлаковые отходы обладают высоким энергетическим потенциалом, а их совместное использование с отходами растительного сырья позволяет получать топливные композиции с удовлетворительными теплотехническими характеристиками.

4. Экспериментально подтверждено, что интенсификация горения углесодержащих отходов достигается применением активаторов на основе щелочных и щелочноземельных металлов, доступным источником которых выступают отходы сельского хозяйства и деревообработки.

5. Выявлено снижение удельных выбросов NO_x и SO_2 при сжигании композиционных топлив, содержащих 30-40 масс. % отходов растительного сырья.

6. Доказано, что внедрение технологии утилизации отходов с получением композиционного топлива сопровождается положительным экономическим эффектом, начиная с первого года реализации мероприятия.

Полученные результаты диссертационного исследования могут быть использованы для проектирования и внедрения комплексных решений по утилизации углесодержащих отходов. Дальнейшее развитие темы диссертации предполагает проведение опытно-промышленных испытаний разработанных композиционных топлив в реальных условиях теплоэнергетических установок и разработки технологического регламента совместной термической утилизации углесодержащих и растительных отходов.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Дука А.А. Совместная термическая утилизация углесодержащих отходов с золой растительной биомассы: термическое поведение и характеристика продуктов горения / А.А. Дука, М.А. Пашкевич // Вестник Евразийской науки. – 2026. – Т 18, № 1. – 12 с.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

2. **Дука А.А.** Повышение эффективности термической утилизации низкосортного угольного сырья путем внесения добавок карбонатов щелочных металлов / **А.А. Дука**, М.А. Пашкевич, И.П. Сверчков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 11-1. – С. 113-130. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_113.

3. **Дука А.А.** Влияние совместной термической утилизации углесодержащих и сельскохозяйственных отходов на плавкость золы / **А.А. Дука**, М.А. Пашкевич, И.П. Сверчков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. – № 9. – С. 67-85. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_9_0_67.

4. Пашкевич М.А. Оценка экологического состояния почвенно-растительного покрова, загрязненного угольной пылью / М.А. Пашкевич, **А.А. Дука** // Горный журнал. – 2023. – № 9. – С. 68-74. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.10.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

5. Патент на изобретение № 2854163 Российская Федерация, МПК C10L 10/00 (2006.01). Брикетированное топливо из отходов углеобогащения. Заявка № 2025109495 : заявл. 16.04.2025: опубл. 29.12.2025 / В.А. Матвеева, **А.А. Дука**, Т.А. Петрова, Е.Н. Муравьева; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 11 с.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024684870 Российская Федерация. Программа для пересчета результатов анализа на различные состояния топлива. Заявка № 2024682639 : заявл. 02.10.2024: опубл. 24.10.2024 / И.П. Сверчков, **А.А. Дука**, Ю.Д. Смирнов; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 433 Кб.

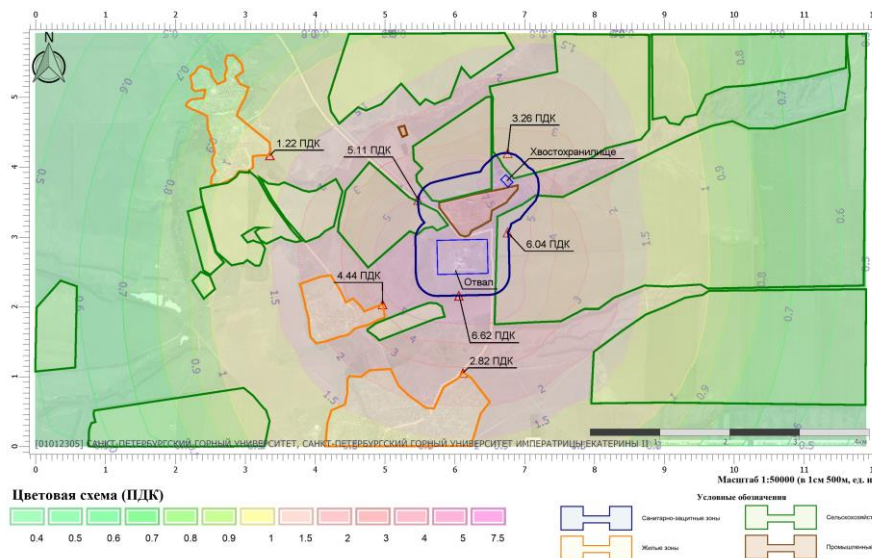


Рисунок 1 – Ореол атмосферического загрязнения пылью (предприятие Ростовской области)

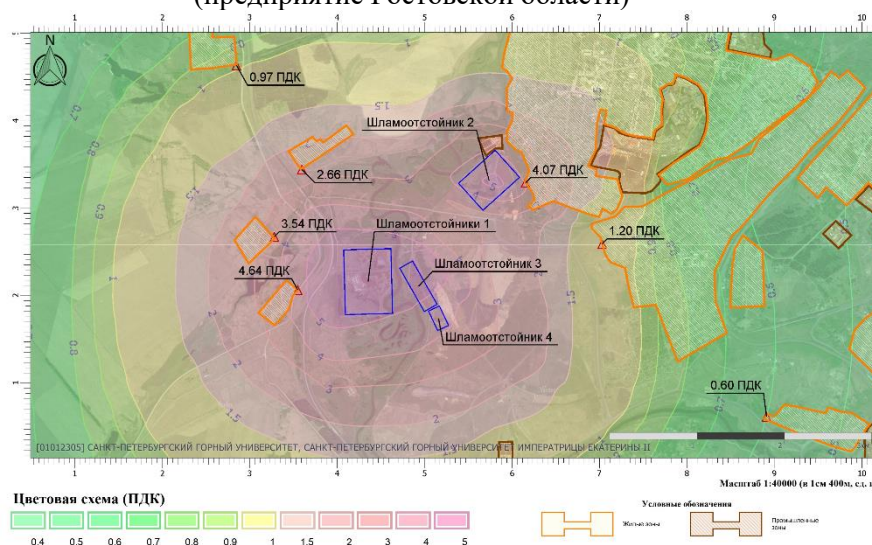


Рисунок 2 – Ореол атмосферического загрязнения пылью (предприятие Кемеровской области)

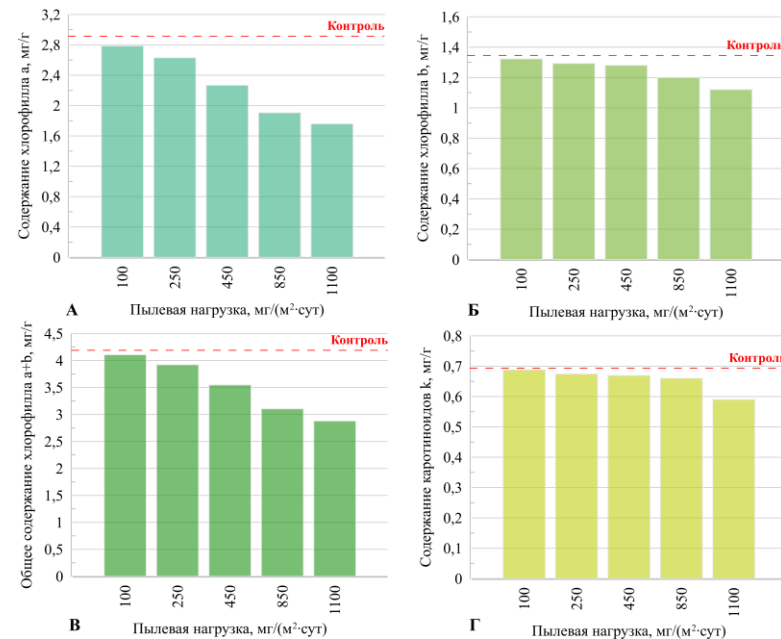


Рисунок 3 – Изменение содержания пигментов при увеличении пылевой нагрузки: А – хлорофилла а; Б – хлорофилла б; В – общего хлорофилла а+б; Г – каротиноидов

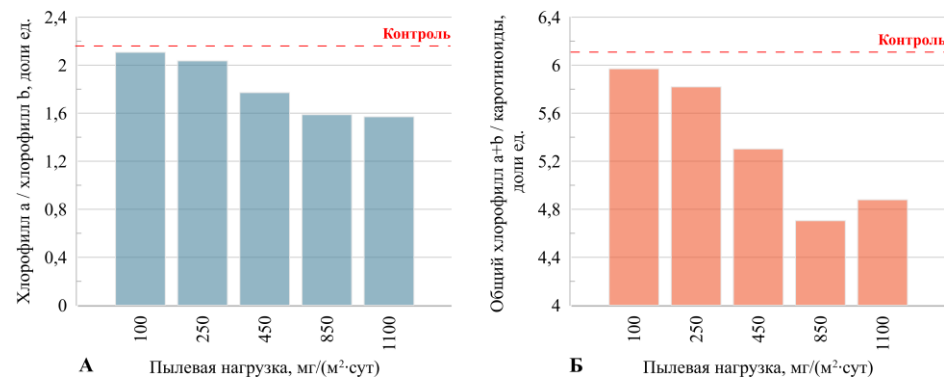


Рисунок 4 – Изменение соотношений пигментов при увеличении пылевой нагрузки: А – хлорофилл а/хлорофилл б; Б – общий хлорофилл а+б/каротиноиды

Таблица 1 – Коэффициенты биоаккумуляции

Пылевая нагрузка, мг/(м²·сут)	Фосфор	Сера
100	1,1	5,0
250	1,2	5,1
450	1,5	5,5
850	1,5	6,0
1100	1,6	6,0

Таблица 2 – Характеристика углесодержащих отходов

Отход	W, %	A ^d , %	V ^d , %	C ^d , %	H ^d , %	N ^d , %	S ^d , %	O ^d , %	Q, МДж/кг
ООУ	1,7	32,0	14,5	58,50	3,00	1,51	0,35	3,32	22,78
ЗШО	6,6	32,2	12,3	57,70	1,54	0,54	0,19	1,44	20,90

где W – влажность; A^d – зольность на сухое состояние; V^d – выход летучих веществ на сухое состояние; C^d, H^d, N^d, S^d, O^d – содержание углерода, водорода, азота, серы и кислорода на сухое состояние соответственно; Q – удельная теплота сгорания на сухое состояние

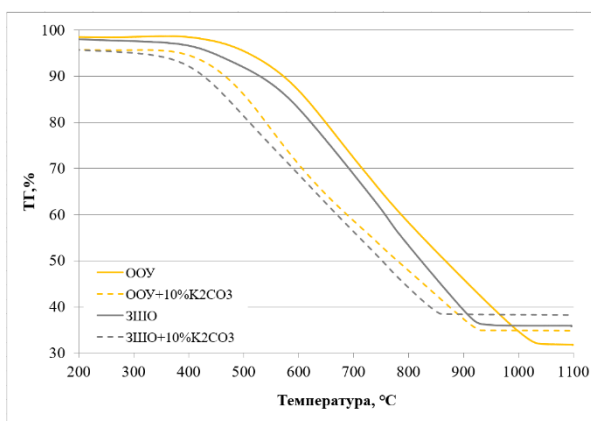


Рисунок 5 – ТГ кривые горения углесодержащих отходов и их смесей с добавкой карбоната калия

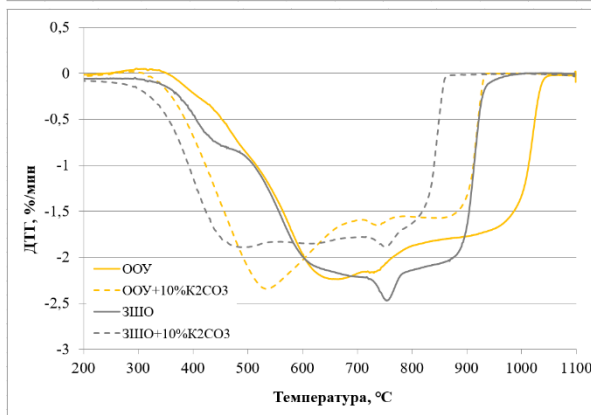


Рисунок 6 – ДТГ кривые горения углесодержащих отходов и их смесей с добавкой карбоната калия

Таблица 3 – Параметры процесса горения углесодержащих отходов и их смесей с добавкой карбоната калия

Образец Параметр	ООУ	ООУ + 10 масс. % K ₂ CO ₃	ЗШО	ЗШО + 10 масс. % K ₂ CO ₃
T _i , °C	517	435	500	390
T _{max} , °C	655	537	765	485
R _{max} , %/мин	2,323	2,374	2,538	1,987
R _{mean} , %/мин	0,709	0,679	0,670	0,649
T _b , °C	985	842	907	848
C _b × 10 ⁻⁶ , %/°C ² × мин	8,69	12,55	10,15	13,06
G × 10 ⁻⁶ , %/°C ² × мин	6,86	10,16	6,64	10,50
S × 10 ⁻⁹ , %/°C ³ × мин ²	6,26	10,12	7,50	10,00
E, кДж/моль	78,6	46,5	111,3	85,1

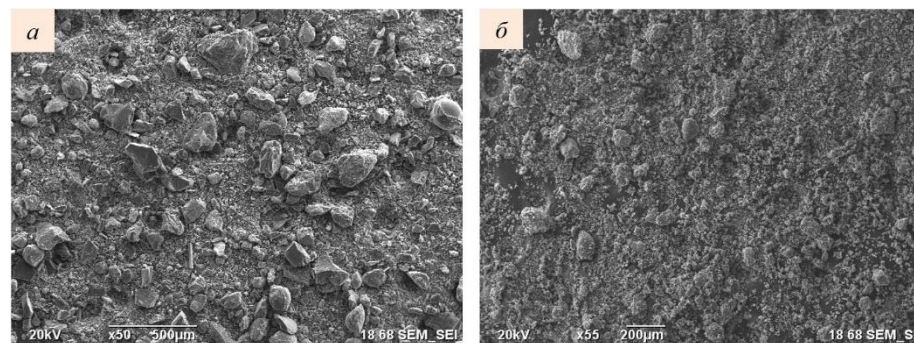
Рисунок 7 – Поверхность образцов после нагрева:
а – ООУ; б – ООУ+ K₂CO₃ 10 масс. %

Таблица 4 – Характеристика отходов растительного сырья

Отход	A ^d , %	V ^d , %	C ^d , %	H ^d , %	N ^d , %	S ^d , %	Q, МДж/кг	Суммарное содержание (K, Na, Mg, Ca), масс. %
солома	4,3	77,3	42,9	7,1	1,3	0,08	16,0	2,12
подсолнечник	9,0	71,9	40,1	6,1	3,9	0,14	15,7	7,69
лузга	3,4	75,0	46,9	7,3	0,5	0,17	19,0	0,81
опилки	0,4	82,4	43,3	7,1	0,1	0,03	19,7	1,53

Таблица 5 – Характеристика горения ООУ и ЗШО с добавками золы

Образец	$R_{\max}, \%/мин$	$R_{\text{mean}}, \%/мин$	$C_b \times 10^{-6}, \%/^{\circ}C^2 \times мин$	$G \times 10^{-6}, \%/^{\circ}C^2 \times мин$	$S \times 10^{-9}, \%^2/^{\circ}C^3 \times мин^2$
ООУ	2,323	0,709	8,69	6,86	6,26
ООУ + зола подсолнечника	2,676	0,659	11,71	9,33	9,11
ООУ + зола лузги	2,274	0,667	10,89	8,73	8,35
ООУ + зола соломы	2,592	0,652	11,11	8,84	8,62
ООУ + зола опилок	2,658	0,579	11,39	9,02	8,40
ЗШО	2,538	0,670	10,15	6,64	7,5
ЗШО + зола подсолнечника	2,460	0,621	10,81	6,59	7,94
ЗШО + зола лузги	2,262	0,614	9,82	6,12	7,18
ЗШО + зола соломы	2,268	0,609	9,80	6,19	6,95
ЗШО + зола опилок	3,036	0,622	10,97	7,31	8,19

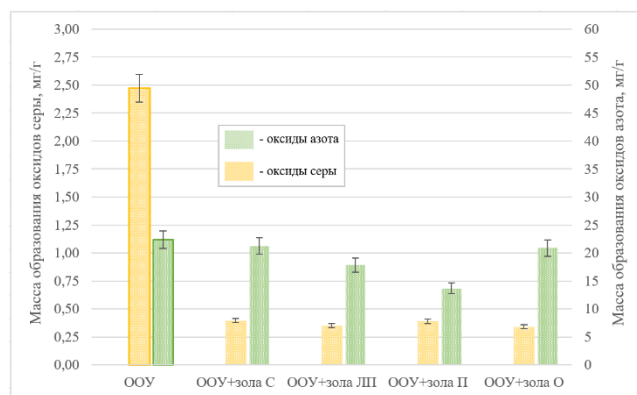


Рисунок 9 – Влияние добавки золы растительных отходов на образование NO_x и SO_2 при сжигании ООУ

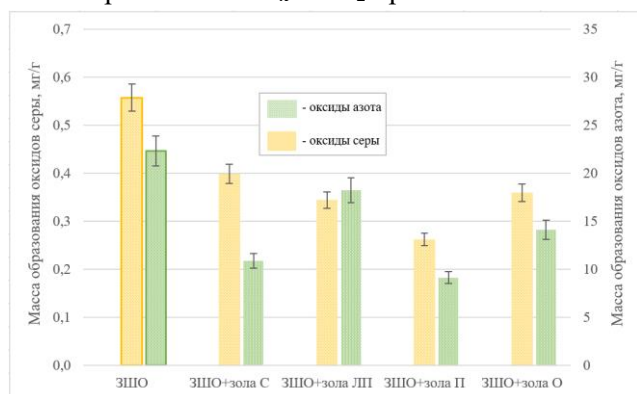
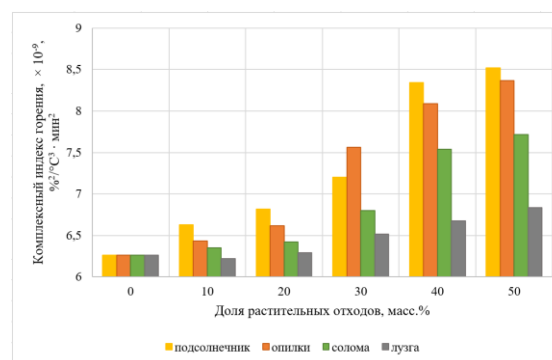
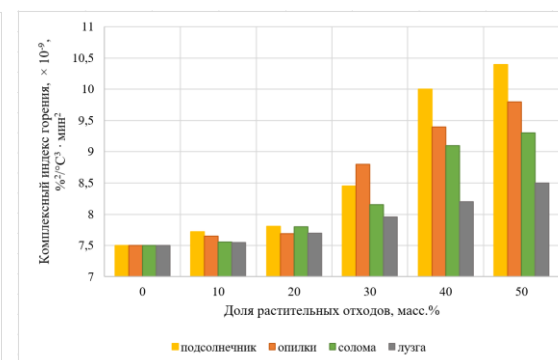


Рисунок 10 – Влияние добавки золы растительных отходов на образование NO_x и SO_2 при сжигании ЗШО

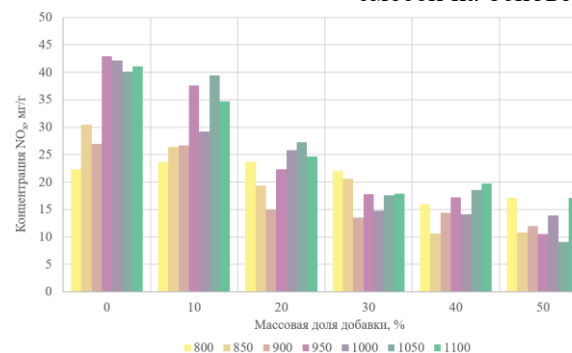


а

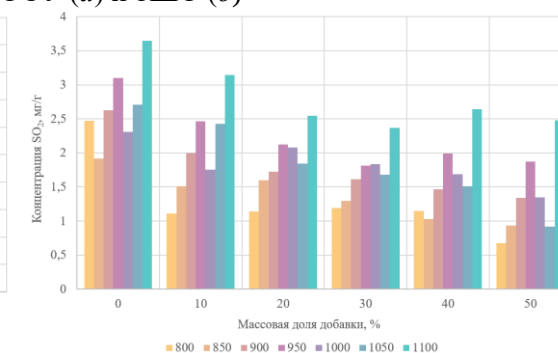


б

Рисунок 8 – Изменение комплексного индекса горения для топливных смесей на основе ООУ (а) и ЗШО (б)

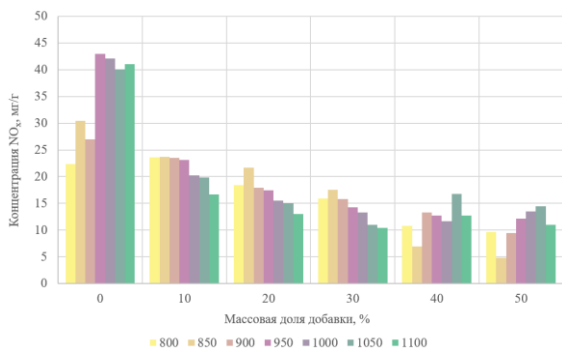


а

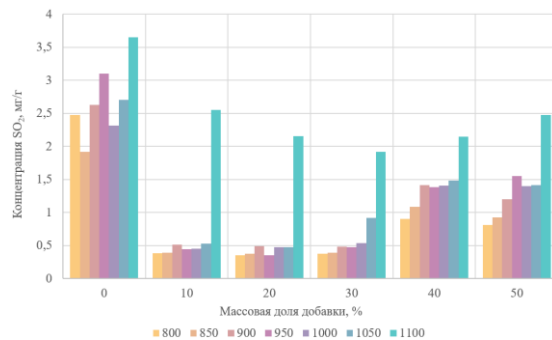


б

Рисунок 11 – Изменение удельных выбросов NO_x (а) и SO_2 (б) при сжигании смесей ООУ+солома

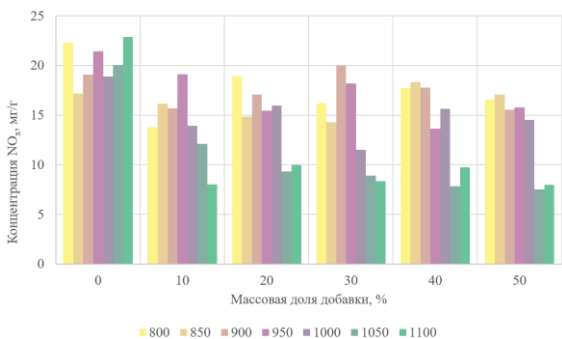


a

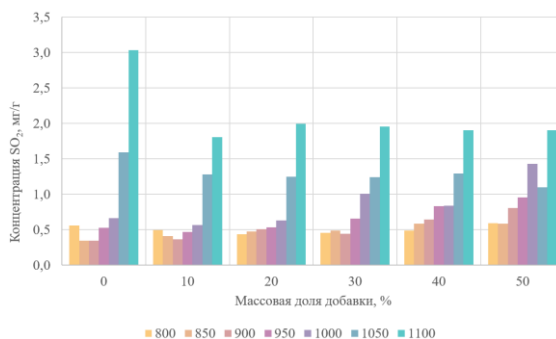


б

Рисунок 12 – Изменение удельных выбросов NO_x (*a*) и SO_2 (*б*) при сжигании смесей ООУ+опилки

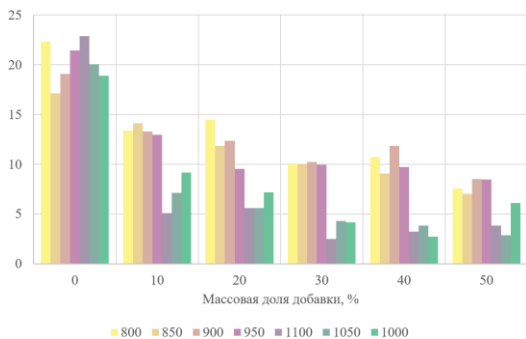


a

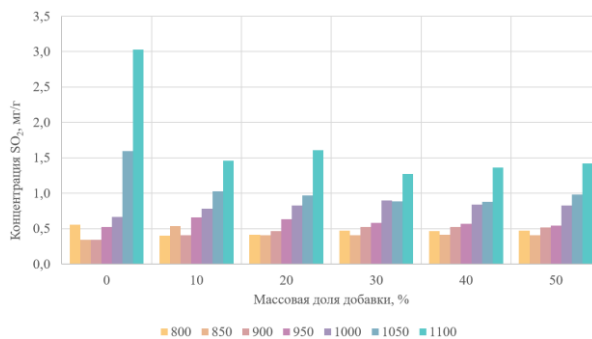


б

Рисунок 13 – Изменение удельных выбросов NO_x (*a*) и SO_2 (*б*) при сжигании смесей ЗШО+солома



a



б

Рисунок 14 – Изменение удельных выбросов NO_x (*a*) и SO_2 (*б*) при сжигании смесей ЗШО+опилки

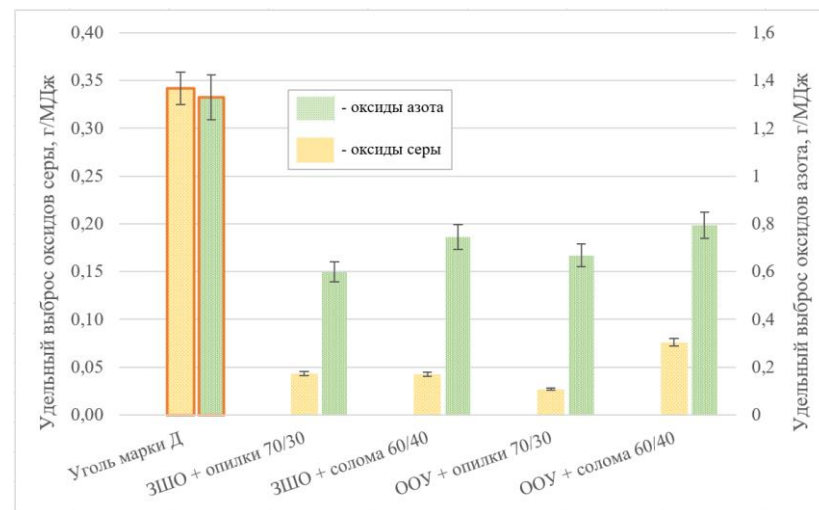


Рисунок 15 – Сравнение удельных выбросов NO_x и SO_2 при сжигании каменного угля и композиционных топлив

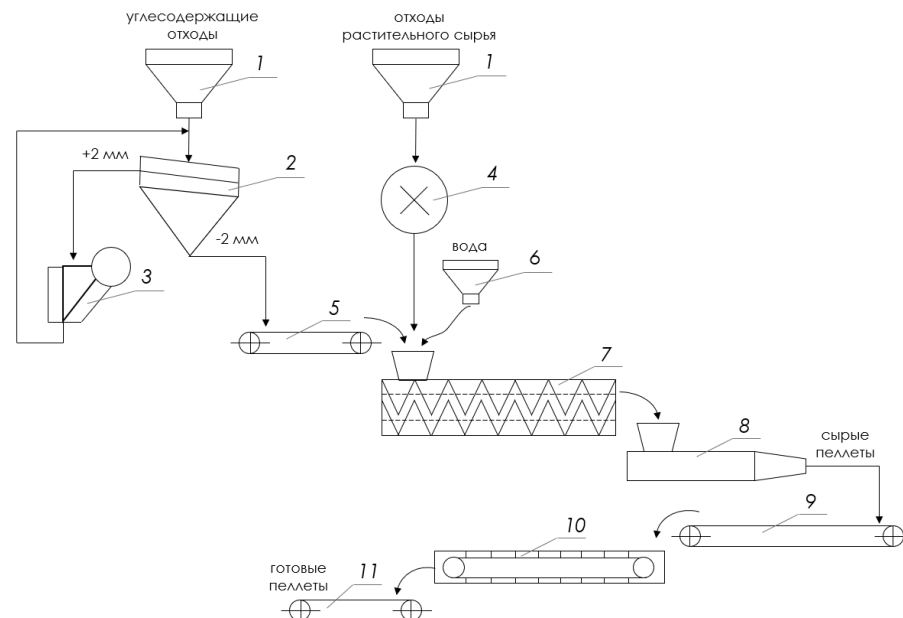


Рисунок 16 – Схема цепи аппаратов для производства топливных пеллет из углеродсодержащих отходов и отходов растительного сырья:

- 1 – бункер-накопитель; 2 – грохот; 3 – дробилка щековая;
- 4 – мельница режущая; 5 – питатель; 6 – бункер-дозатор;
- 7 – смеситель шнековый; 8 – гранулятор; 9, 11 – конвейер;
- 10 – сушильная машина