

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию и автореферат *Воробьева Кирилла Александровича* «Обоснование технологии депонирования углеродсодержащих выбросов шлаками от сжигания твердых коммунальных отходов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.21 - Геоэкология (технические науки)

Актуальность исследования Воробьева Кирилла Александровича лежит в парадигме выполнения федеральных проектов Российской Федерации, направленных на решение проблемы размещения твердых коммунальных отходов: в национальный проект «Экология» входит программа «Комплексная система обращения с твердыми коммунальными отходами», целью которой является создание высокотехнологичной инфраструктуры для обработки и утилизации отходов, включая экотехнопарки и «нулевые» полигоны; работа соответствует и Федеральному проекту «Чистая страна», направленному на ликвидацию несанкционированных свалок в городах с целью улучшения качества жизни населения. К 2030 г. по национальным стратегическим целям планируется добиться 100% сортировки отходов и уменьшить объем захоронения в два раза, одновременно увеличив долю утилизированных отходов до 50%. Основная масса твердых коммунальных отходов (ТКО) все еще поступает на захоронение.

В связи с вышесказанным диссертационное исследование Воробьева К.А. актуально и своевременно, так как **целью работы** является обоснование и разработка технологических и технических условий депонирования углеродсодержащих выбросов шлаками от сжигания ТКО.

Степень обоснованности научных положений и выводов представленной диссертации обеспечивается проведенными теоретическим и эмпирическим анализами заявленной проблемы исследования; логической целостностью структуры работы; корректной интерпретацией результатов лабораторных исследований; решением поставленных задач и достижением цели исследования.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечена применением современной приборной базы, апробированных методов анализа и статистической обработки фактического материала, представительностью исходных данных, использованием общепринятых критериев оценки полученных результатов; подтверждается согласованностью выводов теоретического анализа и данных эксперимента, удовлетворительной сходимостью результатов измерений и экспериментальных исследований.

По теме диссертации опубликовано 23 научные работы, 9 из которых представлены в ведущих рецензируемых научных журналах, включенных в перечень изданий ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, из них 3 по специальности 1.6.21 - Геоэкология (технические науки), 4 статьи в изданиях, входящих в Scopus и Web of Science. Результаты исследования неоднократно обсуждались на конференциях разного уровня, в том числе международного, о чем свидетельствуют публикации автора в сборниках по итогам конференций.

Основная оригинальная идея диссертационного исследования состоит в том, что минеральный, химический, фазовый состав отходов от сжигания ТКО, присутствие и них в достаточном количестве кальций- магнийсодержащих фаз, способных к химическому связыванию диоксида углерода в процессе принудительной минеральной карбонизации, определяют или обосновывают использование их в качестве альтернативы природным материалам для секвестрации диоксида углерода с одновременным повышением экологической безопасности хранения карбонизированных отходов.

Теоретическая значимость диссертационного исследования состоит в углублении существующих и получении новых научных знаний о вещественном составе и свойствах отходов от сжигания ТКО, их реакционной способности и активности к связыванию диоксида углерода; в теоретической и экспериментальной оценке секвестрационного потенциала остатков от сжигания ТКО для технологии ускоренной минеральной карбонизации; в уточнении механизмов и установлении закономерностей гидратации и принудительной карбонизации шлаков и летучей золы.

Полученные новые научные знания и практические результаты расширяют и углубляют современные представления о принудительной карбонизации систем на основе остатков от сжигания ТКО с одновременным связыванием диоксида углерода в стабильные карбонатные комплексы.

Практическая значимость исследования состоит в установлении рациональных параметров процесса минеральной карбонизации углеродсодержащих выбросов шлаками и летучей золой от сжигания твердых коммунальных отходов, в разработке развернутой схемы технологических маршрутов комплексной переработки остатков от сжигания ТКО и одновременного связывания углеродсодержащих выбросов методом минеральной карбонизации. Реализация процессов минерализации выбросов CO₂ путем карбонизации техногенных отходов будет способствовать с одной стороны более безопасному хранению, утилизации и вторичному использованию карбонизированных отходов, с другой стороны – связыванию некоторого количества диоксида углерода и сокращению его выбросов.

Научна новизна работы Воробьева К.А. состоит в следующем:

1. Теоретический потенциал карбонизации шлаков и золы, рассчитанный по данным химического анализа, минералогических исследований фазового состава и фактического потенциала связывания диоксида углерода на уровне 47–79 кг CO₂ на 1 т сухого вещества, определенный экспериментально, доказывает возможность полезного использования остатков от сжигания ТКО в технологии секвестрации или депонирования углеродсодержащих выбросов.

2. Разработана методика, позволяющая на специально изготовленной модельной установке, экспериментально изучить улавливание диоксида углерода природными и техногенными материалами в газовых средах, установить оптимальные параметры процесса ускоренной карбонизации и определить фактический потенциал связывания диоксида углерода различными материалами.

3. Установлены зависимости степени карбонизации золы и шлаков от сжигания ТКО от вещественного состава отходов и основных параметров процесса ускоренной минеральной карбонизации: времени гидратации и времени карбонизации, температуры, концентрации и давления газа, соотношения жидкой и твердой фаз.

4. Сформирован научно-методологический подход разработки технологических решений по секвестрации углеродсодержащих выбросов шлаками от сжигания ТКО, основанный на расчете теоретического потенциала карбонизации по данным химического анализа, детальных минералогических исследованиях фазового состава, оценке потенциальной опасности выщелачивания экоконтролируемых элементов по содержанию тяжелых металлов и микроэлементов в водных и буферных вытяжках, экспериментальном определении фактического потенциала связывания диоксида углерода.

5. Впервые разработана схема технологических маршрутов переработки техногенных отходов от сжигания ТКО и минеральной карбонизации, обеспечивающих наиболее полную обработку и стабилизацию (нейтрализацию) отходов технологических процессов сжигания ТКО с получением вторичного сырья для производства строительных материалов и снижение экологической нагрузки.

Выводы диссертации могут быть использованы в системе подготовки студентов в образовательных организациях высшего экологического образования в рамках освоения основных профессиональных программ и программ дополнительного профессионального образования, а также будут востребованы в реальном секторе экономики.

Структура диссертации соответствует логике исследования и включает в себя введение, пять глав, заключение, список литературы из 186 наименований. Текст диссертации изложен на 165 страницах, иллюстрирован 49 рисунками и 40 таблицами.

Во введении диссертации аргументирована актуальность темы исследования, описана степень научной разработанности проблемы, обоснованы цель, гипотеза и задачи исследования, определены его объект и предмет, приведены положения, выносимые на защиту, демонстрирующие научную новизну работы.

В первой главе детально исследуются теоретические аспекты и современная практика обращения с ТКО, оценены существующие виды и состав ТКО, изучены потенциальные технологии секвестрации углеродсодержащих выбросов. Проведенный анализ современного состояния и практика минеральной карбонизации в технологии секвестрации диоксида углерода показал, что шлак от сжигания ТКО значительно обогащен токсичными микроэлементами по сравнению с исходным материалом отходов, но после специальной обработки обычно захоранивается на полигонах, либо используется, например, в качестве вторичного сырья в строительстве. Автором сформулированы цель и задачи исследования, направленные на разработку технологии депонирования углеродсодержащих выбросов посредством ускоренной карбонизации остатков от сжигания ТКО с одновременным снижением их экологической опасности.

Во второй главе диссертантом представлены результаты комплексного исследования вещественного состава и технологических свойств шлаков и летучей золы, образующихся при термической переработке твердых коммунальных отходов. Методологическая основа работы включала применение рентгено-флуоресцентного, рентгенофазового и оптико-минералогического анализов, ситового и лазерного гранулометрического методов, дифференциально-термического анализа, а также методов оценки выщелачивания экоконтролируемых элементов. Установлено, что шлаки характеризуются преобладанием частиц крупностью свыше 1,25 мм (до 96,1%) и содержат активные кальций-силикатные фазы (геленит, акерманит, белит), способные к гидратации и карбонизации. Зола, обладая тонкодисперсной структурой (80% частиц <18,9 мкм), отличается повышенным содержанием СаО (39%), хлоридов, сульфатов и тяжелых металлов (Zn, Pb, As). Выявлено, что минеральный состав золы включает портландит, гидроксихлорид кальция и двухкальциевый силикат, что определяет ее высокий потенциал для реакций связывания CO₂. Результаты фазового анализа подтвердили наличие естественных процессов карбонизации в шлаках, а термодинамические расчеты продемонстрировали возможность интенсификации этих процессов.

В третьей главе приведены результаты проведенного диссертантом исследования закономерностей перехода тяжелых металлов из шлаков и золы от сжигания твердых коммунальных отходов в водную фазу при выщелачивании. Проанализированы эколого-гигиенические аспекты утилизации и хранения остатков, выявлено значительное превышение содержания токсичных элементов (Pb, Zn, Cd, As и др.) в летучей золе над ПДК для почв, что подтверждает ее классификацию как опасного отхода. Для шлаков проведены тесты на выщелачивание в водной и ацетатно-аммонийной средах с последующим анализом макро- и микроэлементного состава методом ICP-MS и ICP-OES. Установлено, что концентрации тяжелых металлов в водных вытяжках шлаков (Московского МСЗ и Брестского МПЗ) не превышают ПДК для воды, за исключением лития и вольфрама. Выявлены региональные различия в элементном составе шлаков, обусловленные спецификой исходных отходов и технологий сжигания. Показано, что шлаки обладают низкой миграционной активностью токсикантов, что подтверждает их стабильность и потенциальную пригодность для использования в технологиях ускоренной карбонизации.

В четвертой главе представлены результаты исследования теоретических и практических аспектов секвестрации диоксида углерода шлаками и золой от сжигания твердых коммунальных отходов. Теоретически обоснованы механизмы минеральной карбонизации, включая анализ кинетики и термодинамики реакций гидратации и связывания CO₂ кальций- и магниесодержащими минералами. Расчет энергии Гиббса подтвердил возможность протекания реакций карбонизации при нормальных условиях (25°C, 1 атм.) с потенциалом связывания 0,17–0,34 т CO₂ на 1 т отходов. Разработана и запатентована лабораторная установка для изучения улавливания CO₂ в газовых средах, позволившая экспериментально определить влияние времени, влажности, давления, температуры и концентрации CO₂ на процесс. Установлено, что основное связывание углекислого газа происходит в первые 6 часов при влажности 15–25% (Ж/Т=0,18–0,54). Максимальная степень карбонизации зафиксирована для летучей золы (6,67% массы), что связано с высоким содержанием реакционноспособных фаз (портландит, псевдоволластонит). Шлаки показали меньшую эффективность (3,57–4,55%), однако их стабильность и доступность делают их перспективными для технологий ускоренной карбонизации. Сравнение с природным серпентинитом (10% связывания) подтвердило конкурентоспособность техногенных материалов.

В пятой главе представлены разработанные автором технологические маршруты комплексной переработки остатков от сжигания твердых коммунальных отходов с одновременным связыванием углеродсодержащих выбросов.

В заключении представлены обобщающие теоретические выводы, подтверждающие гипотезу исследования и правомочность положений, выносимых на защиту.

По содержанию диссертация представляет собой законченный, самостоятельный научный труд, исследование весьма актуально, посвящено важной в теоретическом и практическом отношении проблеме и выполнено на достаточно высоком профессиональном уровне.

Рукопись автореферата в полной мере отражает содержание диссертации.

Вместе с тем считаю необходимым сделать некоторые **замечания по работе**:

1. Как разработанная технология будет адаптироваться к существенному сезонному варьированию химического и минерального состава образующихся остатков от сжигания ТКО, а значит и к содержанию в них минералов, способных вступать в реакцию карбонизации?

2. Из схемы на рис. 5.7 не ясно, в каком виде будут использованы остатки от сжигания ТКО в технологии ускоренной карбонизации – в естественном или после какой-то предварительной подготовки, такой как дробление, рассев на классы крупности, магнитная сепарация и т.д.

3. Почему используется термин «углеродсодержащие выбросы», ведь все исследования проведены применительно к поглощению углекислого газа?

4. Недостаточно обосновано, почему при изучении влияния давления на процесс карбонизации в п. 4.3 в камере карбонизации устанавливали давление только 1 и 2 атм., а не больше, что вероятно значительно бы интенсифицировало процесс?

5. Желательно привести более детальную схему аппаратного оформления предлагаемой технологии.

6. Для установленных экспериментально закономерностей показателей карбонизации от варьируемых параметров в п. 4.3 диссертации не приведена математическая аппроксимация полученных данных и не указан коэффициент корреляции.

Высказанные замечания не снижают общей положительной оценки выполненного научного исследования и его теоретической и практической значимости.

В заключение следует указать, что диссертация Воробьева К.А. «Обоснование технологии депонирования углеродсодержащих выбросов шлаками от сжигания твердых коммунальных отходов» является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технологические решения, имеющие существенное значение для развития страны.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.6.21 - Геоэкология (технические науки) по пп. 17 и 7; отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор – Воробьев Кирилл Александрович заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.6.21 - Геоэкология (технические науки).

Официальный оппонент:

доктор технических наук, профессор,
академик Российской экологической академии (РЭА),
профессор кафедры экологии и промышленной безопасности
ФГАОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ксенофонтов Борис Семенович
« 12 » февраля 2026 г.



ЗАВЕРЯЮ
СПЕЦИАЛИСТ ПО
ПЕРСОНАЛУ ОТДЕЛА
ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО АДМИНИСТРИ
УЧАСА
РУДНЕВА ИВ

Я, Ксенофонтов Борис Семенович, даю согласие на включение в документы и обработку персональных данных, связанных с работой диссертационного совета 24.1.096.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание степени доктора наук, созданного при Федеральном государственном бюджетном учреждении Институте проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, Москва 105005, г. Москва, Лефортовская набережная, д. 1, кафедра Э-9 тел. (499)263-68-93/ факс (499)263-67-07; e-mail: kbsflot@mail.ru

Подпись оппонента Ксенофонтова Б.С. заверяю

Список основных опубликованных научных трудов за период 2020-2025 гг.

д.т.н., профессора Ксенофонтова Бориса Семеновича

1. Интенсификация очистки газовых выбросов от углекислого газа / Б.С. Ксенофонтов // Безопасность жизнедеятельности. – 2022. – № 4(256). – С. 32-38.
2. Парниковые газы: утилизация с использованием биотехнологических установок / Б. С. Ксенофонтов. – Москва : Издательский Дом "Инфра-М", 2023. – 225 с. – (Научная мысль). – ISBN 978-5-16-018177-6. – DOI 10.12737/1915812.
3. Проблемы токсичности золошлаковых отходов /Б.С. Ксенофонтов, И.А. Буторова, А.С. Козодаев [и др.] // Экология и промышленность России. – 2017. – Т. 21, № 2. – С. 4-9. – DOI 10.18412/1816-0395-2017-2-4-9.
4. Проблема изменения климата из-за выбросов парниковых газов и возможные пути ее решения / Б. С. Ксенофонтов, Р. А. Таранов, Е. А. Козляева // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2022. – № 6. – С. 28-32. – DOI 10.37882/2223-2966.2022.06.23.
5. Разработка основ технологии извлечения ценных компонентов из зольно-шлаковых отвалов объектов тепло и электрогенерации / Б. С. Ксенофонтов, А. С. Козодаев, Р. А. Таранов [и др.] // Экология и промышленность России. – 2013. – № 8. – С. 9-12.
6. Возможности использования технологий очистки сточных вод для улавливания и утилизации углекислого газа / Б.С. Ксенофонтов // Экология промышленного производства. – 2022. – № 4(120). – С. 8-12. – DOI 10.52190/2073-2589_2022_4_8.
7. Измерение потоков метана с поверхности естественного водоема камерным методом / Б. С. Ксенофонтов, М. В. Тучин // Экология промышленного производства. – 2024. – № 3(127). – С. 14-17. – DOI 10.52190/2073-2589_2024_3_14.
8. Очистка сточных вод от микропластика с исследованием природы и свойств загрязнений / К.Р. Русанова, Б.С. Ксенофонтов, А.В. Бондаренко // Экология промышленного производства. – 2023. – № 3(123). – С. 19-27. – DOI 10.52190/2073-2589_2023_3_19.
9. Экологические основы безотходных биотехнологических производств / Б. С. Ксенофонтов. – Москва : ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2025. – 200 с. – ISBN 978-5-16-020039-2. – DOI 10.12737/2155615.
10. Разработка методики прогнозирования выбросов парниковых газов с поверхности водоемов и с территорий, подвергнувшихся затоплению / Е. А. Козляева, Б. С. Ксенофонтов, Р. А. Таранов // Сантехника. – 2023. – № 6. – С. 48-57.
11. Схемы биологических очистных сооружений сточных вод с улавливанием и утилизацией углекислого газа и метана / Б. С. Ксенофонтов // Сантехника. – 2022. – № 5. – С. 58-64.
12. Низкоуглеродные технологические схемы утилизации метана и углекислого газа / Б. С. Ксенофонтов // Сантехника. – 2024. – № 5. – С. 52-57.