Геоэкология

DOI: 10.35634/UdSU.2026.70.95.013

УДК 628.31, 504.064

Н.А. Горбунова, А.А. Федосеенко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ЭКОТОКСИКАНТОВ В ВЫБРОСАХ ЗАВОДА ПО СЖИГАНИЮ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД

Аннотация. В статье исследованы процессы трансформации тяжёлых металлов (ТМ) и образования хлорорганических соединений при термической утилизации осадков сточных вод (ОСВ). Установлено, что основная часть ТМ (медь, цинк, мышьяк, хром, свинец, ртуть, никель, кадмий и др.) мигрирует в зольные фракции, а остаточная доля поступает в атмосферный воздух с дымовыми газами — при этом её концентрация ниже гигиенических нормативов для населённых пунктов. Изучена динамика эмиссии ТМ в диапазоне температур 850–1000 °С, выявлено двукратное увеличение скорости эмиссии свинца и цинка, рост эмиссии хрома, стабильность показателей марганца, меди и никеля. Показано влияние хлоридов (NaCl, поливинилхлорида) на эмиссию металлов. Авторами также проанализировано образование полихлорированных дибензо-п-диоксинов (ПХДД, 75 представителей) и дибензофуранов (ПХДФ, 135 представителей): их концентрация зависит от содержания хлора в материале. Основные компоненты выбросов: 2,3,4,7,8-ПеХДФ (62 %), 1,2,3,4,7,8-ГкХДФ (19 %) и др. Подтверждена экологическая приемлемость термической утилизации ОСВ при использовании современных технологий газоочистки и учёте жизненного цикла процесса, что соответствует требованиям наилучших доступных технологий НДТ и законодательства РФ (ФЗ № 296 ФЗ).
Ключевые слова: осадки сточных вод; сжигание осадков сточных вод; технологии утилизации; промышленные выбросы; загрязнение атмосферного воздуха.

Для цитирования: Горбунова Н.А., Федосеенко А.А. Определение содержания экотоксикантов в выбросах завода по сжиганию осадка сточных вод // Управление техносферой: электрон. журнал, 2026. Т. 9. Вып.1. С. 193–213. DOI: 10.35634/UdSU.2026.70.95.013

Введение

Проблема очистки и утилизации сточных вод — это сложная задача, которая требует внимания с экологической, технологической и экономической точек зрения. Она связана с большим количеством жидких отходов, которые

необходимо очищать перед сбросом в водоемы. Процесс очистки также включает утилизацию осадка, образующегося на разных этапах. Это создает значительную нагрузку на инфраструктуру очистных сооружений и ведет к высоким затратам на водоподготовку [1].

Особую значимость представляет исследование процессов термической утилизации осадков сточных вод (ОСВ) [2], сопровождающихся эмиссией широкого спектра загрязняющих веществ. В ходе данного технологического процесса возможно образование и выделение различных классов поллютантов, включая полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), полихлорированные дибензо-п-диоксины (ПХДД), полихлорированные дибензофураны (ПХДФ), соединения тяжёлых металлов. Указанные вещества характеризуются высокой токсичностью и способны оказывать комплексное негативное воздействие на природные экосистемы, показатели биоразнообразия и состояние здоровья человека. Данный факт обусловливает необходимость тщательного контроля процессов термической утилизации и разработки эффективных методов очистки образующихся выбросов. Сжигание осадков сточных вод требует больших затрат энергии и может привести к выбросам токсичных веществ в атмосферу. Поэтому необходимо разрабатывать и внедрять современные системы газоочистки и фильтрации, чтобы минимизировать экологические риски и повысить эффективность утилизации [3, 4].

Комплексный подход к решению проблемы утилизации отходов, основанный на интеграции технологических, экономических, экологических и социальных факторов, способствует формированию устойчивых и эффективных управленческих решений.

Такой подход обеспечивает минимизацию негативного антропогенного воздействия на окружающую среду, рациональное использование природных ресурсов, достижение баланса между производственной эффективностью и экологической безопасностью, учёт социально-экономических интересов

общества. Реализация данного подхода позволяет создать оптимальные условия для устойчивого развития промышленных объектов при соблюдении принципов экологической ответственности и сохранения природных экосистем.

Основная часть

Загрязнение атмосферного воздуха выбросами заводов, занимающихся термической утилизацией осадков сточных вод, является одной из экологических проблем последних лет. Эта проблема вызывает беспокойство, как на национальном, так и на международном уровне, что подтверждается многочисленными международными соглашениями и конференциями. Например, ежегодные климатические саммиты ООН, такие как Конференция сторон Рамочной конвенции ООН об изменении климата (COP), регулярно обсуждают вопросы воздействия выбросов парниковых газов, тяжелых металлов, ПАУ, диоксинов и других токсичных веществ на качество воздуха [5, 6]. Многие научные исследования направлены на изучение механизмов образования и распространения этих загрязнителей, а также на разработку методов их мониторинга и контроля. Особое внимание уделяется оптимизации технологий сжигания, снижению выбросов и созданию эффективных систем фильтрации и очистки дымовых газов [7-9].

Контроль выбросов загрязняющих веществ в атмосферу представляет собой систематический процесс, направленный на минимизацию антропогенного воздействия на экосистемы. В соответствии с Федеральным законом Российской Федерации «Об охране окружающей среды» от 10 января 2002 года № 7-ФЗ (в редакции от 30 декабря 2021 года), система государственного контроля в сфере охраны атмосферного воздуха представляет собой комплексную контрольно-надзорную деятельность, включающую всестороннюю оценку токсикологических характеристик загрязняющих веществ, исследование канцерогенных и мутагенных свойств химических соединений, анализ потенциала аккумуляции поллютантов в различных

компонентах окружающей среды, определение способности к трансформации с образованием более токсичных соединений. Методологической основой контрольно-надзорной деятельности выступают результаты государственного экологического мониторинга, данные социально-гигиенического надзора, валидированные методы количественного определения концентраций загрязняющих веществ. Данная система контроля обеспечивает систематическую оценку состояния атмосферного воздуха, выявление источников антропогенного воздействия, мониторинг соблюдения установленных нормативов предельно допустимых концентраций, своевременное принятие управленческих решений по минимизации негативного воздействия на окружающую среду. Реализация указанного подхода способствует обеспечению экологической безопасности атмосферного воздуха и защите окружающей среды от негативного антропогенного воздействия.

Комплексный подход к контролю выбросов, учитывающий токсикологические, экологические и методологические аспекты, важен для устойчивого развития и сохранения баланса природы. Правительство России определяет перечень загрязняющих веществ, для которых действуют государственные меры по охране окружающей среды.

Особое внимание необходимо уделить осадкам, образующимся на городских очистных сооружениях. С ростом населения и увеличением производства требуется модернизировать существующие очистные комплексы и строить новые. В ряде территориальных образований Российской Федерации наблюдается дефицит производственных мощностей, обеспечивающих эффективную очистку водных ресурсов.

В источнике [10] систематизированы и представлены в табличной форме (табл. 1) основные технологические решения по утилизации осадков сточных вод, применяемые в странах Европейского Союза и других западных

государствах. Данная информация демонстрирует спектр современных подходов к обращению с осадками в контексте международных практик.

Таблица 1.

Основные методы утилизации осадка сточных вод в странах Западной Европы и США, в % [21] Страна	Использование в сельском хозяйстве	Захоронение на свалках	Сжигание	Сброс в море
Великобритания	53	16	7	24
Австрия	20	49	31	-
Германия	25	55	15	5
Дания	45	28	18	9
Соединенные штаты Америки	25	25	35	15
Финляндия	40	41	-	19
Швейцария	50	30	20	-
Швеция	60	30	-	10
Франция	23	46	31	-

Анализ обращения с отходами показывает, что сегодня нет универсальных решений для их переработки. Это связано с технологическими, транспортными и экономическими трудностями. Однако потребность в комплексном плане переработки отходов становится все более важной и необходимой из-за быстрого увеличения объемов отходов.

В настоящее время разработано множество патентов, касающихся методов переработки осадков сточных вод. В современной практике утилизации осадков сточных вод реализуются три фундаментальных технологических подхода:

- аэробное биотермическое сбраживание;
- анаэробное биотермическое сбраживание;
- термическое обезвреживание (инсинерация).

Аэробная переработка представляет собой ключевой технологический процесс, реализуемый посредством специализированных инженерных решений, направленных на оптимизацию временных и температурных параметров

обработки. Эффективность аэробной переработки обусловлен комплексом технологических факторов:

- обеспечение адекватной аэрации и доступа кислорода;
- поддержание оптимального температурного режима;
- контроль параметров влажности обрабатываемой смеси;
- создание благоприятной физико-химической среды;
- обеспечение активности микробиоты.

Эти параметры играют критическую роль в обеспечении эффективности аэробной переработки осадков сточных вод. Однако этот метод имеет ограничения из-за недостаточной высокотемпературной обработки, что может привести к сохранению патогенных микроорганизмов. Для решения этой проблемы используются дополнительные методы обеззараживания, такие как специальные антибактериальные препараты и термически обработанный осадок с очистных сооружений [11]. Методы дезинфекции с использованием ультрафиолетового и микроволнового излучения также эффективны. Например, кавитационный генератор с производительностью 100 м³/ч разрушает микробные клетки механическим воздействием, создавая микропузырьки [11].

Альтернативный способ переработки осадка сточных вод — анаэробная биоэнергетическая ферментация. В этом процессе ключевую роль играют метаногенные бактерии, которые работают без доступа кислорода [12]. Процесс брожения происходит в герметичных биореакторах из бетона или стали, в результате чего образуется биогаз. Эта технология стала популярной в Европе с 1911 года, когда в Бирмингеме запустили первую установку для переработки осадка сточных вод. В России биогазовые технологии также активно используются, например, на Люберецких очистных сооружениях в Москве. Исследования показали, что анаэробная переработка органических отходов — эффективный метод. В России нормативные документы, регулирующие требования к биореакторам, появились в 2010 году. Технологии производства биореакторов постоянно совершенствуются, что позволяет

создавать новые модели оборудования. В европейских странах широкое распространение получили анаэробные биореакторы, что обусловлено менее строгими экологическими нормативами по сравнению с российскими стандартами. В частности, предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в биогазе значительно превышают нормативные показатели, установленные в Российской Федерации [1]. Следует учитывать, что эффективность функционирования анаэробных систем может существенно снижаться при присутствии в обрабатываемых отходах соединений тяжёлых металлов и биоцидных веществ, оказывающих ингибирующее воздействие на активность метаногенных бактерий.

Альтернативным технологическим решением является термическая утилизация осадков сточных вод посредством сжигания. Данный метод характеризуется высокой экономической эффективностью, поскольку позволяет минимизировать временные, трудовые и финансовые затраты, связанные с управлением отходами. [13]. Учитывая эпидемиологические риски, связанные с фекальными отходами, метод имеет большой потенциал для развития.

С 1996 года в Санкт-Петербурге активно внедряется и совершенствуется технология сжигания осадков сточных вод в установках, работающих по принципу псевдоожиженного слоя и пиролиза. В результате термической утилизации происходит образование зольного остатка, формирующегося при высокотемпературном (850°C) сжигании обезвоженного осадка сточных вод. Исходным материалом служит смесь первичного ила и концентрированного активного ила, подвергаемая термообработке в специализированных инсинераторах.

В Санкт-Петербурге функционируют три предприятия, реализующие данную технологию термической утилизации: Центральная станция аэрации (ЦСА), Северная станция аэрации (ССА), Юго-Западные очистные сооружения (ЮЗОС). Применение указанного метода позволяет достичь существенного

сокращения объёма исходных отходов — более чем в 10 раз относительно исходного объёма осадка сточных вод. Метод не только уменьшает количество транспорта, снижает площадь новых полигонов и сокращает выбросы, но и создает новые задачи, связанные с выбросами продуктов сгорания и утилизацией золы. Указанные промышленные объекты реализуют полномасштабную утилизацию совокупного объёма осадков сточных вод, которые образуются в ходе функционирования городской системы канализационно-очистных сооружений. Предприятия осуществляют полный цикл переработки образующихся отходов, обеспечивая экологическую безопасность городской инфраструктуры.

Материалы и методы

В основу исследования легли статьи, обзоры и аналитические материалы из авторитетных международных и российских баз данных. Эти источники служат основой для проведения комплексных испытаний и анализа.

Химический мониторинг и аналитическое исследование промышленных атмосферных выбросов были выполнены квалифицированными специалистами химико-аналитического центра «Арбитраж» Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева» [3]. В процессе исследования применялся комплекс современных аналитических методик, обеспечивающих высокую степень точности и достоверности при определении качественного и количественного состава основных атмосферных загрязнителей. Методологическая база исследований позволила получить репрезентативные данные о составе промышленных выбросов.

Современные методы анализа позволяют не только точно идентифицировать химические компоненты выбросов, но и количественно оценить их концентрацию, что является крайне важно для разработки эффективных мер по снижению загрязнения окружающей среды. Благодаря

внедрению современных аналитических технологий, обеспечивающих высокую надёжность и достоверность получаемых данных при проведении экологического мониторинга, становится возможным эффективное решение природоохранных задач, включая своевременное выявление антропогенных воздействий и разработку научно обоснованных мер по обеспечению экологической безопасности окружающей среды.

Результаты

Согласно данным научно-аналитических исследований, в процессе термической утилизации осадков сточных вод (ОСВ) происходит значительная трансформация тяжёлых металлов, при которой преобладающая часть данных элементов мигрирует в зольные фракции, тогда как остаточная доля поступает в атмосферный воздух вместе с дымовыми газами. При этом содержание тяжёлых металлов в сточных водах, формирующихся на очистных сооружениях, достигает 2% от общей массы сухого вещества, что требует особого внимания при организации процессов очистки и утилизации данных отходов. В составе ОСВ идентифицированы следующие элементы [14]: медь, цинк, мышьяк хром, свинец, хром, ртуть, никель и кадмий.

В газообразных выбросах также присутствуют летучие соединения тяжёлых металлов, включая ртуть, кадмий и свинец [15]. Однако их концентрация в дымовых газах после процесса сжигания оказывается настолько незначительной, что современные аналитические методы не позволяют их детектировать.

Процесс формирования аэрозольных частиц, содержащих металлоорганические соединения, представляет собой результат комплексных физико-химических взаимодействий между различными элементами в ходе термического воздействия. Кинетика и динамика данного процесса определяются следующими ключевыми факторами [16]:

- температурный режим термического воздействия;

- продолжительность нахождения материала в камере сжигания;

- исходный химический состав обрабатываемых осадков.

При этом интенсивность эмиссии металлосодержащих соединений демонстрирует прямую корреляцию как с температурным режимом процесса, так и с физико-химическими характеристиками присутствующих тяжёлых металлов, что необходимо учитывать при проектировании систем газоочистки и контроля выбросов. Экспериментальные данные демонстрируют различную динамику летучести отдельных элементов при повышении температуры в диапазоне от 850 до 1000 °C: наблюдается двукратное увеличение скорости эмиссии свинца и цинка [17]; отмечается рост эмиссии хрома с 65,7% до 74,9%; сохраняется стабильность показателей марганца, меди и никеля при температурных колебаниях.

Исследования [18] в температурном интервале 500–1100 °C выявили, что кадмий демонстрирует более высокую летучесть по сравнению со свинцом, медью, цинком и марганцем. Полученные экспериментальные данные демонстрируют полную корреляцию с результатами предшествующих фундаментальных исследований, направленных на изучение термодинамических закономерностей и механизмов миграции тяжёлых металлов в процессе термического разложения различных категорий отходов. Это подтверждает достоверность установленной зависимости между температурными параметрами процесса и характеристиками переноса металлов, что имеет существенное значение для разработки эффективных технологий утилизации и минимизации негативного воздействия на окружающую среду [12].

Проведённые экспериментальные исследования демонстрируют существенное влияние хлорорганических соединений и хлоридов на эмиссию тяжёлых металлов в газовую фазу посредством модификации их распределения в процессе термодеструкции. В рамках лабораторных экспериментов [19] было осуществлено детальное изучение воздействия хлоридных соединений

на миграцию представителей группы тяжёлых металлов (свинец, цинк, хром, медь, марганец, никель) при инсинерации осадков сточных вод. Результаты показали, что неорганический хлорид (NaCl) влияет на эмиссию металлов следующим образом: Pb > Zn > Cr > Cu > Mn > Ni. Органические хлориды (поливинилхлорид) сильнее влияют на выброс Pb, Cu и Mn, чем на Zn, Cr и Ni.

Исследования, проведенные специалистами химико-аналитического центра «Арбитраж» ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» [3], выявили летучие формы тяжелых металлов, такие как ртуть (Hg) и свинец (Pb), в выбросах. Их концентрации были низкими: ртуть <0,0003-0,009 мг/м³, свинец <0,001-0,005 мг/м³. Другие тяжелые металлы и неметаллы (кадмий (Cd), ванадий (V), марганец (Mn), кобальт (Co), мышьяк (As), медь (Cu), кремний (Si)) не определялись в промышленных выбросах. Во всех пробах атмосферного воздуха возле заводов по сжиганию осадков сточных вод концентрации тяжелых металлов были ниже гигиенических нормативов для населенных пунктов.

Согласно результатам комплексных исследований [3, 17, 20], в процессе термической утилизации промышленных и бытовых отходов происходит формирование полихлорированных ароматических соединений, включающих:

- 75 представителей полихлорированных дибензо-п-диоксинов (ПХДД);
- 135 представителей полихлорированных дибензофуранов (ПХДФ).

Количественные показатели эмиссии данных соединений находятся в прямой зависимости от содержания хлора в утилизируемом материале. В ходе термического разложения происходит химическое взаимодействие между хлором, кислородом и углеродными структурами, что приводит к образованию различных хлорорганических соединений, в том числе диоксинов. Данный процесс представляет собой сложный механизм трансформации исходных веществ с образованием новых химических соединений, требующих особого внимания при организации систем очистки газообразных выбросов. [21].

В ходе исследования специалисты химико-аналитического центра «Арбитраж» ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» [3] осуществлён комплексный анализ выбросов полихлорированных дибензо-п-диоксинов (ПХДД) и полихлорированных дибензофуранов (ПХДФ). Объектом исследования выступили три производственных предприятия, при этом особое внимание было уделено исследованию 17 основных гомологичных мономеров. Результаты полевых исследований продемонстрировали, что совокупная концентрация анализируемых соединений на двух производственных объектах не превышает 0,5 пг I-TEQ/м³, а на заводе с большей мощностью выбросы составляют от <1 до 1,9 пг I-TEQ/м³.

Анализ показал, что основными компонентами выбросов ПХДД и ПХДФ являются:

- 2,3,4,7,8-ПеХДФ (62%);
- 1,2,3,4,7,8-ГкХДФ (19%);
- 2,3,7,8-ТХДФ (11,9%);
- 1,2,3,4,8-ПеХДФ (7%).

Таким образом, исследование подтверждает наличие диоксинов и фуранов в выбросах при сжигании отходов, а также позволяет определить их количественное содержание и состав.

Сжигание осадков сточных вод (ОСВ) оказывает влияние на выбросы парниковых газов, что определяется технологией сжигания, составом осадка и методами контроля выбросов [22, 23]. При сжигании ОСВ происходит окисление органического углерода до углекислого газа (CO_2) [22]; согласно руководящим принципам МГЭИК, углерод в осадке сточных вод считается на 100 % биогенным, т.е. происходящим из органического вещества, поглощённого растениями в процессе фотосинтеза, — следовательно, его высвобождение при сжигании не увеличивает общее количество углерода в глобальном углеродном цикле [23]. Однако использование ископаемого топлива в качестве вспомогательного (для розжига печи или поддержания

температуры) приводит к дополнительным выбросам CO_2 [22, 23]. Помимо CO_2, при сжигании ОСВ могут выделяться метан (CH_4) и закись азота (N_2O) в случае неполного горения или утечек [24], хотя при правильно организованном процессе (достаточное количество кислорода и высокая температура) их образование минимизируется. Ключевые факторы влияния включают: технологию сжигания (сжигание в печах с псевдоожиженным слоем, совместное сжигание в угольных котлах или цементных печах) [22], где температура сжигания (обычно ≥ 850 °C) влияет на полноту сгорания и состав выбросов [22]; состав осадка (влажность требует дополнительной энергии на испарение воды, увеличивая энергозатраты и выбросы при использовании ископаемых источников энергии) [22]; системы очистки выбросов (электрофильтры, мокрые очистки), снижающие выбросы вредных веществ [23]. Сжигание ОСВ может рассматриваться как способ рекуперации энергии: полученная энергия способна заменить ископаемое топливо в других секторах, снижая общие выбросы парниковых газов [22] — однако для достижения эффекта необходим учёт всего жизненного цикла процесса. В России выбросы парниковых газов регулируются Федеральным законом от 02.07.2021 № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов» [3]. Для минимизации негативного воздействия критически важны: современные технологии сжигания с высокой температурой и достаточным количеством кислорода; системы газоочистки; учёт жизненного цикла процесса; замена ископаемого топлива в сопутствующих процессах.

Выводы

Результаты исследования подтверждают, что термическая утилизация ОСВ при соблюдении технологических параметров (температура ≥ 850 °C, достаточное количество кислород, эффективная газоочистка) оказывает ограниченное воздействие на экологию и здоровье населения. Концентрации тяжёлых металлов и ПХДД/ПХДФ в выбросах от сжигания осадков сточных вод не превышают гигиенических нормативов. Летучесть металлов зависит

от температуры и присутствия хлоридов (NaCl, ПВХ), причём Cd демонстрирует повышенную летучесть относительно Pb, Cu, Zn, Mn. Образование хлорорганических соединений коррелирует с содержанием хлора в осадке. Выбросы CO_2 частично биогенны, а эмиссия CH_4 и N_2O минимизируется при соблюдении оптимальных условий сжигания. Применение современных технологий снижает экологический риск и соответствует требованиям наилучших доступных технологий (НДТ), что подтверждает приемлемость метода утилизации осадка сточных вод при надлежащем контроле выбросов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Collivignarelli, M., Abb_a, A., Frattarola, A., Carnevale Miino, M., Padovani, S., Katsoyiannis, I., Torretta, V., 2019c. Legislation for the reuse of biosolids on agricultural land in Europe: Overview. *Sustainability* 11(21) 6015. https://doi.org/10.3390/su11216015.
2. Zhang, J., Sun, G., Liu, J., Evrendilek, F., Buyukada, M., 2020. Co-combustion of textile dyeing sludge with cattle manure: assessment of thermal behavior, gaseous products, and ash characteristics. *J. Clean. Prod.* 253. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119950, 119950.
3. Влияние выбросов в атмосферный воздух завода по сжиганию осадков сточных вод / С.А. Горбанёв, О.И. Копытенкова, П.А. Ганичев, Г.Б. Еремин, И.В. Алексеева, Р.Л. Джамбулов, О.Л. Маркова, Е.В. Зарицкая, Д.С. Исаев, О.К. Суворова, А.А. Федосеенко, Мироненко О.В. *Гигиена окружающей среды*. 2022. Т. 101. № 11. С. 1307 – 1314.
4. Cheng, M., Wu, L., Huang, Y., Luo, Y., Christie, P., 2014. Total concentrations of heavy metals and occurrence of antibiotics in sewage sludges from cities throughout China. *J. Soils Sediments* 14 (6), 1123e1135. https://doi.org/10.1007/s11368-014-0850-3.
5. Ogada, T., Werther, J., 1996. Combustion characteristics of wet sludge in a fluidized bed Release and combustion of the volatiles. *Fuel* 75 (5), 617e626. https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)00280-4.
6. Sanger, M., Werther, J., Ogada, T., 2001. NO_x and N_2O emission characteristics from fluidised bed combustion of semi-dried municipal sewage sludge. *Fuel* 80 (2), 167e177. https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00093-4.

7. Zhu, J., Yao, Y., Lu, Q., Gao, M., Ouyang, Z., 2015. Experimental investigation of gasification and incineration characteristics of dried sewage sludge in a circulating fluidized bed. *Fuel* 150, 441e447. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.02.031.
8. Qin, L., Han, J., Chen, W., 2017. Simultaneous removal of SO2 and PAHs by adding calcium-based additives during sewage sludge incineration in a fluidized bed incinerator. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 19 (3), 1061e1068. https://doi.org/10.1007/s10163-017-0592-6.
9. Lee, K.T., Mohamed, A.R., Bhatia, S., Chu, K.H., 2005. Removal of sulfur dioxide by fly ash/CaO/CaSO4 sorbents. *Chem. Eng. J.* 114 (1e3), 171e177. https://doi.org/10.1016/j.cej.2005.08.020.
10. Kanunnikov O.V., Eroshchenko S.V., Kiseleva S.P., Zozulya P.V. Analysis of the problems and methods of processing fecal waste of railway transport. *Russian journal of resources, conservation and recycling.* 2020; 7(4). DOI: 10.15862/15ECOR420.
11. Yang, K., Zhu, Y., Shan, R., Shao, Y., Tian, C., 2017. Heavy metals in sludge during anaerobic sanitary landfill: speciation transformation and phytotoxicity. *J. Environ. Manag.* 189, 58-66. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.019.
12. Dai, X., Duan, N., Dong, B., Dai, L., 2013. High-solids anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in comparison with mono digestions: stability and performance. *Waste Manag.* 33 (2), 308e316.https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.018.
13. A. Fedoseenko, E. Komarova Comparative characteristics of the emissions control during the operation of passenger trains. *E3S Web of Conferences: International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) "Actual problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution", Rostov-on-Don, Russia*, 05–07 april 2023 y. Vol. 383. – Rostov-on-Don, Russia: EDP Sciences, 2023, pp. 02006. – DOI 10.1051/e3sconf/202338302006.
14. Li, B., Wang, F., Chi, Y., Yan, J., 2014. Study on optimal energy efficiency of a sludge drying-incineration combined system. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 16 (4), 684 – 692. https://doi.org/10.1007/s10163-014-0293-3.
15. Van de Velden, M., Dewil, R., Baeyens, J., Josson, L., Lanssens, P., 2008. The distribution of heavy metals during fluidized bed combustion of sludge (FBSC). *J. Hazard Mater.* 151 (1), 96e102. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.056.
16. Marani, D., Braguglia, C.M., Mininni, G., Maccioni, F., 2003. Behaviour of Cd, Cr, Mn,Ni, Pb, and Zn in sewage sludge incineration by fluidised bed furnace. *Waste Manag.* 24 (2), 193e198. https://doi.org/10.1016/S0956-053X(03)00127-2.

17. Zhang, G., Hai, J., Ren, M., Zhang, S., Cheng, J., Yang, Z., 2013. Emission, mass balance, and distribution characteristics of PCDD/Fs and heavy metals during cocombustion of sewage sludge and coal in power plants. *Environ. Sci. Technol.* 47 (4), 2123e2130. https://doi.org/10.1021/es304127k.
18. Hu, Y., Wang, J., Deng, K., 2014. Characterization on heavy metals transferring into flue gas during sewage sludge combustion. *Energy Procedia* 61, 2867e2870. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.325.
19. Liu, J., Fu, J., Ning, X., Sun, S., Wang, Y., Xie, W., Huang, S., Zhong, S., 2015. An experimental and thermodynamic equilibrium investigation of the Pb, Zn, Cr, Cu, Mn and Ni partitioning during sewage sludge incineration. *J. Environ. Sci. (China)* 35, 43e54. https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.01.027.
20. Chen, T., Gu, Y., Yan, J., Li, X., Lu, S., Dai, H., Cen, K., 2008. Polychlorinated dibenzo-pdioxins and dibenzofurans in flue gas emissions from municipal solid waste incinerators in China. *J. Zhejiang, Univ-SC. A.* 9 (9), 1296e1303. https://doi.org/10.1631/jzus.A0720144.
21. Karaca, C., Sozen, S., Orhon, D., Okutan, H., 2018. High temperature pyrolysis of sewage sludge as a sustainable process for energy recovery. *Waste Manag.* 78,217e226. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.034.
22. Yu S, Deng S, Zhou A, Wang X and Tan H (2023) Life cycle assessment of energy consumption and GHG emission for sewage sludge treatment and disposal: a review. Front. Energy Res. 11:1123972. doi: 10.3389/fenrg.2023.1123972
23. Янин Е. П. Утилизация осадков сточных вод: проблемы и перспективы // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. 2005. № 6. С. 25–32.
24. Приходько Л.Н., Гриненко С.В., Белякова. Е.В. Эмиссия газов в воздушный бассейн из канализационных очистных станций // С О К.ru. 2022. № 11. стр. 26 – 27.

Поступила в редакцию: 08.09.2025

Сведения об авторах

Горбунова Наталья Александровна
аспирант, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. Россия.
E-mail: tkachevanata@gmail.com

Федосеенко Анастасия Алексеевна
кандидат химических наук, доцент кафедры «Техносферная и экологическая безопасность», Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», 190031, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9. Россия.
E-mail: aa.fedoseenko@mail.ru

N.A. Gorbunova, A.A. Fedoseenko

DETERMINATION OF THE CONTENT OF ECOTOXICANTS IN EMISSIONS FROM A SEWAGE SLUDGE INCINERATION PLANT

Annotation. The article investigates the processes of transformation of heavy metals and the formation of organochlorine compounds during the thermal utilization of sewage sludge. It has been established that the main part of heavy metals (copper, zinc, arsenic, chromium, lead, mercury, nickel, cadmium, etc.) migrates into ash fractions, and the residual part enters the atmospheric air with flue gases – while its concentration is below hygienic standards for populated areas. The dynamics of heavy metal emission in the temperature range of 850–1000 °C has been studied; a twofold increase in the emission rate of lead and zinc, an increase in chromium emission, and stability of the indicators for manganese, copper, and nickel were revealed. The influence of chlorides (NaCl, polyvinyl chloride) on metal emissions is shown. The authors also analyzed the formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDDs, 75 representatives) and dibenzofurans (PCDFs, 135 representatives): their concentration depends on the chlorine content in the material. The main components of emissions are: 2,3,4,7,8 PeCDF (62 %), 1,2,3,4,7,8 HxCDF (19 %), and others. The environmental acceptability of thermal utilization of sewage sludge has been confirmed when using modern gas treatment technologies and considering the life cycle of the process, which meets the requirements of the best available techniques and the legislation of the Russian Federation (Federal Law No. 296-FZ).
***Keywords*:** sewage sludge; sewage sludge incineration; utilization technologies; industrial emissions; atmospheric air pollution.

For citation: Gorbunova N.A., Fedoseenko A.A. [Determination of the ecotoxicants in emissions from a sewage sludge incineration plant]. *Upravlenie tekhnosferoi*, 2026, vol. 9, issue 1, pp. 193–213. DOI: 10.35634/UdSU.2026.70.95.013. (In Russ.).

REFERENCES

1. Collivignarelli, M., Abb_a, A., Frattarola, A., Carnevale Miino, M., Padovani, S., Katsoyiannis, I., Torretta, V., 2019c. Legislation for the reuse of biosolids on agricultural land in Europe: Overview. *Sustainability* 11(21) 6015. https://doi.org/10.3390/su11216015.
2. Zhang, J., Sun, G., Liu, J., Evrendilek, F., Buyukada, M., 2020. Co-combustion of textile dyeing sludge with cattle manure: assessment of thermal behavior, gaseous products, and ash characteristics. *J. Clean. Prod.* 253 https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119950, 119950.
3. Gorbanyov S.A., Kopytenkova O.I., Ganichev P.A., Eremin G.B., Alekseeva I.V., Dzhambulov R.L., Markova O.L., Zaritskaya E.V., Isaev D.S., Suvorova O.K., Fedoseenko A.A., Mironenko O.V. Vliyanie vybrosov v atmosfernyj vozdukh zavoda po szhiganiyu osadkov stochnyh vod. *Gigiena okruzhayushchej sredy.* 2022. T. 101. № 11. S. 1307-1314.

4. Cheng, M., Wu, L., Huang, Y., Luo, Y., Christie, P., 2014. Total concentrations of heavy metals and occurrence of antibiotics in sewage sludges from cities throughout China. *J. Soils Sediments* 14 (6), 1123e1135. https://doi.org/10.1007/s11368-014-0850-3.
5. Ogada, T., Werther, J., 1996. Combustion characteristics of wet sludge in a fluidized bed Release and combustion of the volatiles. *Fuel* 75 (5), 617e626. https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)00280-4.
6. Sanger, M., Werther, J., Ogada, T., 2001. NOx and N2O emission characteristics from fluidised bed combustion of semi-dried municipal sewage sludge. *Fuel* 80 (2), 167e177. https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00093-4.
7. Zhu, J., Yao, Y., Lu, Q., Gao, M., Ouyang, Z., 2015. Experimental investigation of gasification and incineration characteristics of dried sewage sludge in a circulating fluidized bed. *Fuel* 150, 441e447. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.02.031.
8. Qin, L., Han, J., Chen, W., 2017. Simultaneous removal of SO2 and PAHs by adding calcium-based additives during sewage sludge incineration in a fluidized bed incinerator. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 19 (3), 1061e1068. https://doi.org/10.1007/s10163-017-0592-6.
9. Lee, K.T., Mohamed, A.R., Bhatia, S., Chu, K.H., 2005. Removal of sulfur dioxide by fly ash/CaO/CaSO4 sorbents. *Chem. Eng. J.* 114 (1e3), 171e177. https://doi.org/10.1016/j.cej.2005.08.020.
10. Kanunnikov O.V., Eroshchenko S.V., Kiseleva S.P., Zozulya P.V. Analysis of the problems and methods of processing fecal waste of railway transport. *Russian journal of resources, conservation and recycling.* 2020; 7(4). DOI: 10.15862/15ECOR420.
11. Yang, K., Zhu, Y., Shan, R., Shao, Y., Tian, C., 2017. Heavy metals in sludge during anaerobic sanitary landfill: speciation transformation and phytotoxicity. *J. Environ. Manag.* 189, 58-66. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.12.019.
12. Dai, X., Duan, N., Dong, B., Dai, L., 2013. High-solids anaerobic co-digestion of sewage sludge and food waste in comparison with mono digestions: stability and performance. *Waste Manag.* 33 (2), 308e316.https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.018.
13. Fedoseenko A., Komarova E.Comparative characteristics of the emissions control during the operation of passenger trains. *E3S Web of Conferences: International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) "Actual problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution"*, Rostov-on-Don, Russia, 05–07 april 2023 y. Vol. 383. – Rostov-on-Don, Russia: EDP Sciences, 2023, pp. 02006. – DOI 10.1051/e3sconf/202338302006.

14. Li B., Wang F., Chi. Y., Yan, J., 2014. Study on optimal energy efficiency of a sludge drying-incineration combined system. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 16 (4), 684-692. https://doi.org/10.1007/s10163-014-0293-3.
15. Van de Velden, M., Dewil, R., Baeyens, J., Josson, L., Lanssens, P., 2008. The distribution of heavy metals during fluidized bed combustion of sludge (FBSC). *J. Hazard Mater.* 151 (1), 96e102. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.056.
16. Marani, D., Braguglia, C.M., Mininni, G., Maccioni, F., 2003. Behaviour of Cd, Cr, Mn,Ni, Pb, and Zn in sewage sludge incineration by fluidised bed furnace. *Waste Manag.* 24 (2), 193e198. https://doi.org/10.1016/S0956-053X(03)00127-2.
17. Zhang, G., Hai, J., Ren, M., Zhang, S., Cheng, J., Yang, Z., 2013. Emission, mass balance, and distribution characteristics of PCDD/Fs and heavy metals during cocombustion of sewage sludge and coal in power plants. *Environ. Sci. Technol.* 47 (4), 2123e2130. https://doi.org/10.1021/es304127k.
18. Hu, Y., Wang, J., Deng, K., 2014. Characterization on heavy metals transferring into flue gas during sewage sludge combustion. *Energy Procedia* 61, 2867e2870. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.325.
19. Liu, J., Fu, J., Ning, X., Sun, S., Wang, Y., Xie, W., Huang, S., Zhong, S., 2015. An experimental and thermodynamic equilibrium investigation of the Pb, Zn, Cr, Cu, Mn and Ni partitioning during sewage sludge incineration. *J. Environ. Sci. (China)* 35, 43e54. https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.01.027.
20. Chen, T., Gu, Y., Yan, J., Li, X., Lu, S., Dai, H., Cen, K., 2008. Polychlorinated dibenzo-pdioxins and dibenzofurans in flue gas emissions from municipal solid waste incinerators in China. *J. Zhejiang, Univ-SC. A.* 9 (9), 1296e1303. https://doi.org/10.1631/jzus.A0720144.
21. Karaca, C., Sozen, S., Orhon, D., Okutan, H., 2018. High temperature pyrolysis of sewage sludge as a sustainable process for energy recovery. *Waste Manag.* 78,217e226. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.05.034.
22. Yu S, Deng S, Zhou A, Wang X and Tan H (2023) Life cycle assessment of energy consumption and GHG emission for sewage sludge treatment and disposal: a review. Front. Energy Res. 11:1123972. doi: 10.3389/fenrg.2023.1123972
23. Yanin E. P. Utilizatsiya osadkov stochnykh vod: problemy i perspektivy [Utilization of sewage sludge: problems and prospects]. *Nauchnye i tekhnicheskie aspekty okhrany okruzhayushchei sredy*. [*Scientific and technical aspects of environmental protection*]. 2005, no. 6, pp. 25–32.

24. Prikhod'ko L.N., Grinenko S.V., Belyakova. E.V. Ehmissiya gazov v vozdushnyi bassein iz kanalizatsionnykh ochistnykh stantsii [Emission of gases into the air basin from sewage treatment plants]. *C O K.ru*. 2022, no. 11, pp. 26 – 27.

Received: 08.09.2025

About the Authors

Gorbunova Natalia Aleksandrovna
postgraduate student, Emperor Alexander I St.Petersburg State Transport University, 190031, St. Petersburg, Moskovsky ave., 9. Russia.
E-mail: tkachevanata@gmail.com

Fedoseenko Anastasia Alekseevna
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Technological and Ecological Safety, Emperor Alexander I St.Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky Ave., Saint Petersburg, 190031, Russia.
E-mail: aa.fedoseenko@mail.ru