



К вопросу о контроле атмосферного воздуха при использовании технологии сжигания осадков сточных вод. Краткий обзор

О.И. Копытенкова^{1,2}, П.А. Ганичев¹, О.Л. Маркова¹

¹ ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора, 2-я Советская ул., д. 4, г. Санкт-Петербург, 191036, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения», Московский проспект, д. 9, Санкт-Петербург, 191031, Российская Федерация

Резюме

Введение. Ежегодно в Российской Федерации на муниципальных сооружениях по очистке сточных вод образуется более 100 млн м³ осадков сточных вод. Объем осадков зависит от технологической схемы очистки, а качественный состав – от состава сточных вод, эффективности работы очистных сооружений, от вида и характера промышленности. Осадки сточных вод содержат токсичные вещества (соли тяжелых металлов, токсичную органику и др.) и различные виды представителей микрофлоры, в том числе патогенные микроорганизмы. Это представляет опасность в санитарно-эпидемиологическом и экологическом отношении.

Цель исследования: обобщить и систематизировать сведения о методе сжигания осадков сточных вод в псевдоожиженном слое, а также определить перечень специфических загрязняющих веществ в выбросах цехов сжигания осадков сточных вод, подлежащих контролю в атмосферном воздухе.

Материалы и методы. Использованы информационно-аналитические методы на основе обобщения и анализа современных научных исследований, опубликованных в реферативных базах данных Scopus, PubMed и РИНЦ за период 2001–2022 гг. Отбор статей осуществлялся по принципу наличия в них сведений об эффективных технологиях утилизации осадков сточных вод. В первоначальную выборку попало 40 статей, из них 10 статей были исключены из выборки после первичного анализа. В ходе выборки было отобрано 30 полнотекстовых материалов, удовлетворяющих вышеуказанным критериям.

Результаты. В ходе проведенного обобщения и систематизации результатов научных исследований выявлено, что сжигание на сегодня считается эффективным и универсальным методом снижения большого количества осадков сточных вод и получения энергии.

Заключение. По сравнению с другими способами термической обработки сжигание осадков сточных вод в настоящее время является перспективным с точки зрения оборудования и технологий. Однако необходимо больше уделять внимания механизму реакции горения, влиянию атмосферы на горение, оборудованию, температуре и другим факторам, влияющим на образование загрязняющих веществ, а также контролю выбросов из источника.

Ключевые слова: осадки сточных вод, технологии утилизации, сжигание осадков сточных вод, промышленные выбросы, обзор литературы.

Для цитирования: Копытенкова О.И., Ганичев П.А., Маркова О.Л. К вопросу о контроле атмосферного воздуха при использовании технологии сжигания осадков сточных вод. Краткий обзор // Здоровье населения и среда обитания. 2022. Т. 30. № 5. С. 15–22. doi: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-5-15-22>

Сведения об авторах:

Копытенкова Ольга Ивановна – д.м.н., главный научный сотрудник отдела анализа рисков здоровью населения ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора; профессор кафедры «Техносферная и экологическая безопасность» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения»; e-mail: 5726164@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8412-5457>.

✉ **Ганичев** Павел Александрович – младший научный сотрудник отделения гигиены питьевого водоснабжения отдела анализа рисков здоровью населения ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора; e-mail: ganichevpavel@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0954-8083>.

Маркова Ольга Леонидовна – к.б.н., старший научный сотрудник отдела анализа рисков здоровью населения ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора; e-mail: olleonmar@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4727-7950>.

Информация о вкладе авторов: концепция и дизайн исследования: Копытенкова О.И., Маркова О.Л.; сбор данных: Ганичев П.А.; анализ и интерпретация результатов: Копытенкова О.И., Маркова О.Л., Ганичев П.А.; подготовка рукописи: Копытенкова О.И., Маркова О.Л., Ганичев П.А. Все авторы ознакомились с результатами работы и одобрили окончательный вариант рукописи.

Соблюдение этических стандартов: данное исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

Финансирование: исследование не имело финансовой поддержки.

Конфликт интересов: авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Статья получена: 21.03.22 / Принята к публикации: 04.04.22 / Опубликовано: 31.05.22

On the Issue of Air Emissions Control for Sewage Sludge Incinerators: A Short Review

Olga I. Kopytenkova^{1,2}, Pavel A. Ganichev¹, Olga L. Markova¹

¹ North-West Public Health Research Center, 4, 2nd Sovetskaya Street, Saint Petersburg, 191036, Russian Federation

² St. Petersburg State Transport University, 9 Moscow Avenue, Saint Petersburg, 191031, Russian Federation

Summary

Introduction: More than 100 million cubic meters of sewage sludge are accumulated annually at municipal wastewater treatment facilities of the Russian Federation. Its quantity depends on sewage treatment techniques while its qualitative composition is determined by the components of wastewater, efficiency of treatment facilities, and local industries. Sewage sludge contains toxic substances (heavy metal salts, toxic organic matter, etc.) and various types of microorganisms including pathogenic bacteria, all posing hazards to human health and environment.

Objective: To summarize and systematize information about fluidized bed incineration of sewage sludge and to compile the list of pollutants emitted by incinerators and subject to control in ambient air.

Materials and methods: We used data analysis methods based on review and summarization of up-to-date research data found in Scopus, PubMed, and RSCI abstract and citation databases for 2021–2022. The article selection criterion included the presence of information about effective techniques of sewage sludge disposal. Having reviewed 40 articles, we selected 30 appropriate full-text publications on the topic.

Results: We established that incineration is considered to be an effective and universal contemporary method of reducing a large amount of sewage sludge and generating energy.

Conclusion: Compared to other techniques of thermal treatment, sewage sludge incineration is promising in terms of equipment and techniques. However, more attention shall be paid to the mechanism of incineration, equipment, temperature conditions, and other factors affecting generation of pollutants, as well as to control of air emissions from sewage sludge incinerators at wastewater treatment plants.

Keywords: sewage sludge, disposal techniques, sewage sludge incineration, industrial emissions, literature review.

For citation: Kopytenkova OI, Ganichev PA, Markova OL. On the issue of air emissions control for sewage sludge incinerators: A short review. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2022;30(5):15–22. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-5-15-22>

Author information:

Olga I. Kopytenkova, Dr. Sci. (Med.), Chief Researcher, Department of Public Health Risk Analysis, North-West Public Health Research Center; e-mail: 5726164@mail.ru; Professor of the department “Technospheric and environmental safety” of the St. Petersburg State Transport University ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8412-5457>.

✉ Pavel A. Ganichev, Junior Researcher, Subdivision of Hygiene of Drinking Water Supply, Department of Public Health Risk Analysis, North-West Public Health Research Center; e-mail: ganichevpavel@yandex.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0954-8083>.

Olga L. Markova, Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher, Department of Public Health Risk Analysis, North-West Public Health Research Center; e-mail: olleonmar@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4727-7950>.

Author contributions: study conception and design: Kopytenkova O.I., Markova O.L.; data collection: Ganichev P.A.; analysis and interpretation of the results: Kopytenkova O.I., Markova O.L., Ganichev P.A.; draft manuscript preparation: Kopytenkova O.I., Markova O.L., Ganichev P.A. All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

Compliance with ethical standards: Ethics approval was not required for this systematic review.

Funding: The authors received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Received: March 21, 2022 / Accepted: April 21, 2022 / Published: May 31, 2022

Введение. Вопросы обращения с накопленными отходами различных производств и жизнедеятельности человечества не теряют своей актуальности, а в последние десятилетия приобрели значимость глобальной экологической проблемы. К таким проблемам относятся осадки, образующиеся в ходе очистки сточных вод и представляющие основной вид отходов канализационных очистных сооружений. Ежегодно в Российской Федерации на муниципальных сооружениях по очистке сточных вод образуется более 100 млн м³ осадков при средней влажности 96 %. Объем осадков зависит от технологической схемы очистки, а качественный состав — от вида канализации, состава сточных вод, эффективности работы очистных сооружений, от вида и характера промышленности. Необходимо отметить, что осадки сточных вод содержат в своем составе токсичные вещества (соли тяжелых металлов, токсичную органику и др.) и различные представители микрофлоры, в том числе патогенные микроорганизмы. Таким образом, осадок городских очистных сооружений представляется опасным в санитарно-эпидемиологическом и экологическом отношении отходом, требующим специальной обработки с целью предотвращения загрязнения окружающей среды.

Цель исследования — обобщить и систематизировать сведения о методе сжигания осадков сточных вод в псевдоожиженном слое, а также определить перечень специфических загрязняющих веществ в выбросах цехов сжигания осадков сточных вод, подлежащих контролю в атмосферном воздухе.

Материалы и методы. Использованы информационно-аналитические методы на основе обобщения и анализа современных научных исследований, опубликованных в реферативных базах данных Scopus, PubMed и РИНЦ за период 2001–2022 гг. Электронный поиск информации осуществлялся по принципу наличия в них сведений об эффективных технологиях утилизации осадков сточных вод с использованием комбинации предположенных заголовков и ключевых слов, таких как «осадки сточных вод», «технологии утилизации», «сжигание осадков сточных вод». Критерии включения в поиск были сформированы перед просмотром статей. Статьи считались подходящими для включения, если они были

опубликованы после 2000 года и были в первую очередь посвящены сжиганию осадков сточных вод. Статьи, которые включали простое упоминание или незначительное обсуждение методов сжигания осадков сточных вод, были исключены. В первоначальную выборку попало 40 статей, из них 10 статей были исключены из выборки после первичного анализа. В результате из 40 статей было отобрано 30 статей, в которых содержались данные об эффективных технологиях утилизации осадков сточных вод.

Результаты исследования. Современные мировые тенденции по обезвреживанию и утилизации осадков сточных вод (ОСВ) в основном направлены на снижение объемов размещаемых осадков в окружающей среде. Наибольшее распространение в практике получили экономически оправданные методы, к которым можно отнести складирование и захоронение, сжигание, пиролиз, анаэробное сбраживание, компостирование, а также использование в качестве удобрения или для рекультивации нарушенных земель [1, 2].

На сегодня наиболее эффективными и универсальными методами снижения большого количества осадков сточных вод и получения энергии являются термические способы утилизации ОСВ. Сжигание осадков сточных вод по сравнению с другими термическими способами в настоящее время является перспективным с точки зрения оборудования и технологий [3–6].

Существует несколько способов сжигания осадков илов сточных вод: высокотемпературное сжигание в многоподовых и циклонных печах, пиролиз, термокаталитическое и жидкофазное окисление (метод Циммермана), технологии с применением низкотемпературной плазмы — взрывные камеры для утилизации осадков, сжигание в псевдоожиженном слое (ПОС) [7–10].

Для сжигания осадков сточных вод применяют главным образом печи с кипящим слоем, которые за последние 30–40 лет получили наибольшее распространение в мире. Их широко применяют в США, Германии, Франции, Японии и других странах [11–20].

В Российской Федерации в Санкт-Петербурге на данный момент функционирует только три завода по сжиганию осадков сточных вод в печах

с псевдоожиженным слоем (Центральная станция аэрации, Северная станция аэрации, Юго-Западные очистные сооружения). Существующая схема утилизации осадка на очистных сооружениях водоканала Санкт-Петербурга предполагает его обезвоживание и сжигание в печах с псевдоожиженным слоем.

Основные этапы процесса сжигания в псевдоожиженном слое на примере завода на Юго-Западных очистных сооружениях (ЮЗОС) [21–25] следующие.

1-й этап — система подачи осадка. Система подачи осадка состоит из нескольких шнеков, которые осуществляют транспортировку осадка, поступающего с конвейера ЮЗОС на вертикальный конвейер осадка. С вертикального конвейера осадок подается на конвейер поперечной подачи осадка, который закреплен за обеими технологическими линиями сжигания. Данный конвейер оснащен двумя двигателями и двумя шнеками, которые могут производить транспортировку осадка в обоих направлениях. Обычно, когда в работе находятся обе технологические линии сжигания, один шнек конвейера подает осадок в бункер осадка линии сжигания 1, а другой — в бункер осадка линии сжигания 2. Далее осадок попадает в устройство подачи осадка, оснащенное регулируемыми скребками быстрого вращения, которые подают осадок в печь сжигания и распределяют его по псевдоожиженному слою.

2-й этап — печи сжигания осадка. Каждая печь состоит из 3 вертикальных секций: нижней секции — камеры флюидизации воздуха, секции псевдоожиженного слоя и верхней секции реактора. В секции псевдоожиженного слоя песчаная подушка поддерживается в состоянии кипения за счет подачи сжатого воздуха через решетку с соплами. Печь сжигания имеет внешний стальной корпус с обмуровкой из кремнеземного огнеупорного кирпича. Корпус печи сжигания имеет необходимые смотровые отверстия для проведения осмотра и технического обслуживания. Температура сжигания составляет 800–900 °С, содержание кислорода в мокрых дымовых газах составляет 4 %, время удержания дымовых газов позволяет минимизировать образование окислов азота.

Воздух для сжигания подается в печь при помощи воздуходувки, при этом используется воздух от вентиляционных систем прилегающего здания обезвоживания и самого здания завода сжигания осадков. Печь оборудована водяными инжекторами, используемыми для регулирования температуры сжигания. Для поддержания стабильной работы печи воздух для сжигания подвергается предварительному нагреву в двух последовательных воздухоподогревателях: сначала паром до 1460 °С, а затем дымовыми газами до 510–520 °С в первом канале котла-утилизатора.

В камере флюидизации воздуха расположена газовая форсунка, используемая для запуска процесса сжигания. Мощность форсунки позволяет поднять температуру печи из холодного состояния либо с другой температуры (ниже рабочей) до температуры, достаточной для безопасной подачи природного газа напрямую в псевдоожиженный слой песка. Каждая печь оснащена 10 вспомогательными инжекторами для подачи природного газа в псевдоожиженный слой для запуска печи

и поддержания достаточного режима в диапазоне 850–870 °С в верхней секции печи.

Камера флюидизации воздуха отделена от камеры сжигания решеткой с соплами, которая представляет из себя горизонтальный керамический под с достаточным количеством сопел для пропуска максимального расхода предварительно нагретого воздуха, необходимого для ожигения песчаной подушки. Сопла выполнены из высококачественного чугуна.

Псевдоожиженный слой состоит из кварцевого песка, обладающего достаточным сопротивлением перепадам температур и истиранию в кипящем слое, поэтому требуется минимальное его количество для дозгрузки при нормальных условиях эксплуатации.

Конструкция печи позволяет выгружать песок из печи как полностью, так и частично. Печи полностью автоматизированы и автоматически отключаются при значительных отклонениях от основных параметров. Осуществляется непрерывный замер, регулирование и учет основных параметров печи, что позволяет надежно эксплуатировать ее круглосуточно.

Для снижения выбросов SO₂ и добавки щелочных реагентов в мокром скруббере предусмотрена одна общая система хранения и подачи извести в обе печи. Количество извести, подаваемое в печь, регулируется оператором в зависимости от качества очистки дымовых газов.

3-й этап — котел-утилизатор. Для утилизации избыточного тепла, выделяющегося при сжигании осадков, предусмотрен котел-утилизатор с тремя отсеками и естественной циркуляцией. Первый отсек состоит из трубных лент и пучков и предназначен для быстрого первичного охлаждения дымовых газов, при этом предварительно нагревается воздух и образуется пар. Во втором отсеке находится испаритель и часть пучков экономайзера. В третьем отсеке находится оставшаяся часть экономайзера. Конструкция котла-утилизатора позволяет вырабатывать пар с давлением 66 бар и температурой 450 °С, который используется в турбогенераторе для производства электроэнергии. Подогретая питательная вода котла подается в паровой барабан, а для поддержания постоянной температуры пара перед подачей на турбину он поступает в охладитель перегретого пара, расположенный с внешней стороны котла-утилизатора, при этом температура дымовых газов на выходе из котла-утилизатора составляет приблизительно 195–210 °С, что обеспечивает максимальную утилизацию тепла. Котел-утилизатор работает в полностью автоматизированном режиме. Производится непрерывный замер, контроль и учет основных рабочих параметров котла. Предохранительные клапаны обеспечивают механическую защиту котла от слишком высокого давления.

4-й этап — электрофильтр, система золоудаления. Первый этап очистки дымовых газов состоит из удаления летучей золы на выходе из котла-утилизатора при помощи электрофильтра, который состоит из металлического каркаса, внутри которого находятся металлические электроды, на которые подается электронапряжение. Частицы золы и пыли, попадая в электростатическое поле, оседают на осадительных электродах и по мере накопления стряхиваются в бункеры молоточковыми механизмами. Летучая зола и пыль собираются

двумя контейнерами для золы и подаются через лопастный затвор в специальный бункер для золы. Транспортировка летучей золы и пыли производится сжатым воздухом по трубопроводу в соответствующий бункер хранения золы. Для выгрузки золы установлена комбинированная двойная система разгрузки. Эта система позволяет вести выгрузку сухой и влажной золы. Одновременная работа системы в сухом и влажном режимах выгрузки невозможна. Увлажнение золы производится технической водой в увлажнительном конвейере.

5-й этап — теплообменник дымовых газов. После электрофилтра дымовые газы проходят через теплообменник дымовых газов, в котором происходит охлаждение их перед тем, как они попадают в систему противоточных скрубберов. Теплообменник дымовых газов расположен перед первой колонной скруббера. Температура горячих дымовых газов, поступающих с электрофилтра, составляет 180–205 °С. На скрубберах дымовые газы охлаждаются, но затем они снова нагреваются с 80 °С до минимум 120 °С. Подогрев охлажденных насыщенных дымовых газов способствует увеличению вертикальной скорости газов в трубе и лучшему их рассеиванию в атмосфере, а также препятствует конденсации пара на выходе из трубы в атмосферу, при этом паровое облако над трубой не образуется.

6-й этап — система мокрой газоочистки на скрубберах. После теплообменника дымовые газы проходят мокрую очистку в системе скрубберов, состоящей из 2 ступеней: первая ступень — колонна кислой промывки, вторая — колонна щелочной промывки газов. В качестве подпиточной воды в системе скрубберов используется умягченная вода. В колонне кислой промывки постоянно происходит орошение газов водой, при этом pH воды находится на уровне от 1 до 3, циркуляция воды осуществляется насосами, уровень pH контролируется приборами. При достижении pH отработанной орошающей жидкости значения 1,0 фиксированное количество ее сбрасывается в накопитель. За счет интенсивного взаимодействия орошающей жидкости и дымовых газов происходит удаление газов, образующих кислоты, в частности HCl и ртути в ионной форме. На

второй ступени происходит удаление SO₂ при pH 5–8 за счет регулируемого дозирования раствора.

Дымовые газы на выходе из печи оцениваются по температуре, содержанию пыли, наличию газообразных загрязняющих веществ. Проводимая очистка дымовых газов предназначена для изменения этих характеристик в соответствии с положениями Европейской Директивы 2000/76/ЕС. Поэтому выбранная газоочистка призвана охладить дымовые газы в целях предохранения последующего оборудования, удалить летучие золы, снизить содержание загрязняющих веществ, уловить кислотные газы и летучие металлы, сократить содержание диоксинов и фуранов.

В настоящее время одним из основных препятствий для широкого использования технологии сжигания осадка сточных вод является обеспокоенность общественности возможными выбросами вредных веществ. Результаты проведенных экспериментальных работ показывают, что содержание летучих соединений в ОСВ выше, чем в других видах топлива, и это одна из основных причин, почему процесс сжигания ОСВ отличается от процесса сжигания других видов топлива. Возражения касаются главным образом возможной эмиссии высокоопасных экотоксикантов — диоксинов и загрязнения ими окружающей среды [26–30].

Обсуждение. В настоящее время ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» выполняет научно-исследовательскую работу по оценке рисков для здоровья населения от эксплуатации заводов (цехов) по сжиганию осадков сточных вод.

В ходе выполненного анализа руководства по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ¹ был выбран и обоснован перечень загрязнителей, подлежащих идентификации в соответствии с теорией горения, который включает:

- диоксины и фураны (вещества 1-го и 2-го класса опасности) — загрязнители атмосферного воздуха, образующиеся при сжигании ОСВ, вызывающие значительное беспокойство гражданского общества;
- соединения, обладающие канцерогенным эффектом: ПАУ (в том числе бенз(а)пирен), диоксины, формальдегид;

Таблица. Перечень загрязняющих веществ, подлежащих исследованию в трубе и атмосферном воздухе

Table. List of pollutants released from sewage sludge incinerators to be tested in the stack and ambient air

№	Наименование веществ / Pollutants	Регистрационный номер CAS / CAS registration number	ПДКм.р./ПДКс.с./ПДКс.г. / MPC maximum single concentration/MPC average daily concentration/MPC average annual concentration	Международное агентство по изучению рака (МАИР)/фактор канцерогенного потенциала (SFI) / IARC/SFI
1	2	3	4	5
1	диВанадий пентоксид (пыль) (Ванадия пятиокись) / Vanadium pentoxide (dust)	1314-62-1	–/0.002/0.00007	–
2	Кадмий оксид (в пересчете на кадмий) / Cadmium oxide (expressed as cadmium)	1306-19-0	–/0.0003/	–
3	Марганец и его соединения (в пересчете на марганца (IV) оксид) / Manganese and its compounds (expressed as manganese dioxide)	–	0.01/0.001/0.00005	–
4	Никель и его соединения / Nickel and its compounds	7440-02-0	–/0.001/0.00005 К	2В/0,84
5	Свинец и его неорг. соединения (в пересчете на свинец) / Lead and its inorganic compounds (expressed as lead)	7439-92-1	0.001/0.0003/0.00015	2а/0.047
6	Ртуть соединения (в пересчете на ртуть) / Mercury compounds (expressed as mercury)	7439-97-6	–/0.0003/	–

¹ Руководство ЕМЕП/ЕАОС по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ 2019 — 5.C.1.b.i, 5.C.1.b.ii, 5.C.1.b.iv Сжигание промышленных отходов, включая опасные отходы и осадки сточных вод.

1	2	3	4	5
7	Хром (IV) (в пересчете на хрома (VI) оксид) / Chromium (IV) (expressed as chromium trioxide)	18540-29-9; 1333-82-0	/0.0015/0.000008	1/42
8	Кобальт оксид (в пересчете на кобальт) / Cobalt oxide (expressed as cobalt)	1307-96-6	–/0.001/	–
9	Мышьяк, неорганические соединения (в пересчете на мышьяк) / Arsenic and its inorganic compounds (expressed as arsenic)	7440-38-2	–/0.0003/0.000015 К	1/15
10	Алканы C12–C19 (в пересчете на C) / Alkanes C12–C19 (expressed as C)	–	1/–	–/0.035
11	ПАУ / Polycyclic aromatic hydrocarbons Бенз(а)пирен (3,4-Бензпирен (16 компонентов) / Benzo[a]pyrene (3,4-benzpyrene (16 components):	56-55-3	–/0.000001/0.000001 К	2А/0.31 (1/3,9 после актуализации 2012 г. / updated in 2012)
	Нафталин / Naphthalene	91-20-3	0.007/–/0.003	–
	Аценафтилен / Acenaphthylene	–	–	–
	Аценафтен, (1,2-дигидроаценафталин; периэтиленнафталин) / Acenaphthene, (1,2-dihydroacenaphthalene; periethylenenaphthalene)	83-32-9	ОБУВ / Indicative safe exposure level 0,07	
	Флуорен / Fluorene	–	–	–
	Фенантрен / Phenantrene	85-01-8	ОБУВ / Indicative safe exposure level 0,01	
	Антрацен / Anthracene	120-12-7	ОБУВ / Indicative safe exposure level 0,01	
	Флуорантен / Fluoranthene	–	–	–
	Пирен / Pyrene	129-00-0	–	
	1,2-бенз(а)нтрацен / 1,2-Benz(a)anthracene	56-55-3	–	2А/0.31
	Хризен / Chrysene	218-01-9	–	3/0.0031
	Бенз(б)флуорантен / Benzo(b)fluoranthene	205-99-2	–	2В/0.39
	Бенз(к)флуорантен / Benzo(k) fluoranthene	207-08-9	–	2В/0.031
	Дибенз(а, h)антрацен / Dibenzo(a, h)anthracene	53-70-3	–	2а/3.1
	Индено(1,2,3-с, d)пирен / Indeno(1,2,3-с, d)pyrene	193-39-5	–	2в/0.31
	Бенз(г, h, i)перилен / Benzo(g, h, i)perylene	–	–	–
	Сумма ПАУ / Total PAH	–	–	–
	Бенз(j)флуорантен / Benzo(j)fluoranthene	205-82-3	–	3В/0,39
12	Гидроксibenзол (Фенол) / Hydroxybenzene (Phenol)	108-95-2	0.01/0.006/0.003	
13	Формальдегид / Formaldehyde	50-00-0	0.05/0.01/0.003	2А/0.046 (1/0,046 после актуализации 2012 г. / updated in 2012)
14	Пыль неорганическая: 70–20 % SiO ₂ / Inorganic suspended particulate matter: 70–20 % SiO ₂	–	–/0.3/0.1	–
15	Взвешенные частицы PM ₁₀ / Particulate matter, PM ₁₀	–	0.3/0.06(г)/0.04 / 0.3/0.06(г)/0.04	–
16	Взвешенные частицы PM _{2,5} / Particulate matter, PM _{2,5}	–	0,16/0,035(г)/0,025 / 0.16/0.035(г)/0.025	–
17	Диоксины (полихлорированные дибензо-п-диоксины и дибензофураны) в пересчете на 2,3,7,8-тетрахлордибензо-1,4-диоксин) 25 компонентов / Dioxins (polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans) (expressed as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-1,4-dioxin) 25 components	1746-01-6	–/0.5нг/м ³ / К / – / 0.5 pg/m ³ /К	–
	2,3,7,8-ТХДД / 2,3,7,8-TCDD	1746-01-6	–/0,5 нг/м ³ / –/0.5 pg/m ³ /	1/150000
	1,2,3,7,8-ПeХДД / 1,2,3,7,8-PeCDD	40321-76-4	–	B2/80000
	1,2,3,4,7,8-ГкХДД / 1,2,3,4,7,8-GcCDD	39227-28-6	–	B2/16000
	1,2,3,6,7,8-ГкХДД / 1,2,3,6,7,8-GcCDD	57653-85-7	–	B2/16000
	1,2,3,7,8,9-ГкХДД / 1,2,3,7,8,9-GcCDD	19408-74-3	–	B2/4550
	1,2,3,4,6,7,8-ГпХДД / 1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	35822-46-9	–	B2/1600
	ОХДД / OHDD	3268-87-9	–	3/130
	2,3,7,8-ТХДФ / 2,3,7,8-TCDF	51207-31-9	–	B2/16000
	1,2,3,4,8-ПeХДФ+ 1,2,3,7,8-ПeХДФ / 1,2,3,4,8-PeHDF+ 1,2,3,7,8-PeCDF	109719-77-9	–	B2/8000
	2,3,4,7,8-ПeХДФ / 2,3,4,7,8-PeCDF	57117-41-6	–	B2/80000
	1,2,3,4,7,8-ГкХДФ / 1,2,3,4,7,8-GcCDF	70648-26-9	–	B2/16000
	1,2,3,6,7,8-ГкХДФ / 1,2,3,6,7,8-GcCDF	57653-85-7	–	B2/16000
	2,3,4,6,7,8-ГкХДФ / 2,3,4,6,7,8-GcCDF	60851-34-5	–	B2/16000

Продолжение таблицы / Table continued

1	2	3	4	5
	1,2,3,7,8,9-ГкХДФ / 1,2,3,7,8,9-GcCDF	72918-21-9	—	B2/16000
	1,2,3,4,6,7,8-ГпХДФ / 1,2,3,4,6,7,8-GpCDF	67562-39-4	—	B2/1600
	1,2,3,4,7,8,9-ГпХДФ / 1,2,3,4,7,8,9-GpCDF	55673-89-7	—	B2/1300
	ОХДФ / OHDF	—	—	—
	Суммарная концентрация / Total concentration	—	—	—
	Прочие ТХДД / Other TCDD	—	—	—
	Прочие ПеХДД / Other PeHDD	—	—	—
	Прочие ГкХДД / Other GcHDD	—	—	—
	Прочие ГпХДД / Other GpCDD	—	—	—
	Прочие ТХДФ / Other TCDF	—	—	—
	Прочие ПеХДФ / Other PeCDF	—	—	—
	Прочие ГкХДФ / Other GcHDF	—	—	—
	Прочие ГпХДФ / Other GpCDF	—	—	—

— соединения тяжелых металлов (для обеспечения в дальнейшем возможности оценки эффекта однонаправленного действия на отдаленные последствия для здоровья населения);

— легколетучие компоненты, образующиеся при сгорании осадка;

— взвешенные частицы PM_{10} , $PM_{2.5}$ — для оценки аэрозольной фракции выбросов.

Сформирован рабочий вариант перечня загрязняющих веществ, включающий 17 групп соединений (диоксины представлены 16 веществами, ПАУ — 25 веществами). Список веществ уточнен в соответствии с их токсикологическими и гигиеническими характеристиками, включает информацию: CAS — химического соединения, МАИР — классификацию международного агентства по изучению рака, значения ПДК, а также факторы канцерогенного потенциала (в соответствии с Руководством по оценке риска) (таблица).

Кроме того, необходимо проведение исследований на территории жилой застройки, т. к. диоксины могут отсутствовать в трубе в горячей газо-воздушной смеси, но потом синтезироваться в атмосфере из компонентов выбросов. С другой стороны, источником и средой для образования может стать что-то помимо сжигания илов. В перечень для определения в контрольной точке нужно включить сероводород и/или меркаптаны.

Выводы. В ходе проведенного обобщения и систематизации результатов научных исследований выявлено, что сжигание на сегодняшний день считается эффективным и универсальным методом снижения большого количества осадков сточных вод и получения энергии. По сравнению с другими способами термической обработки сжигание осадков сточных вод в настоящее время является перспективным с точки зрения оборудования и технологий. Однако необходимо больше внимания уделять механизму реакции горения, влиянию атмосферы на горение, оборудованию, температуре и другим факторам, влияющим на образование загрязняющих веществ, а также контролю выбросов из источника.

Список литературы

1. Рублевская О.Н. Опыт ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» по внедрению технологий утилизации осадка сточных вод // Современные тенденции в развитии водоснабжения и водоотведения: Материалы международной конференции, посвященной 145-летию УП «Минскводоканал»: в 2 частях, Минск,

13–14 февраля 2019 года. Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2019. С. 70–75.

2. Зарицкая Е.В., Ганичев П.А., Михеева А.Ю., Маркова О.Л., Еремин Г.Б., Мясников И.О. К вопросу о контроле летучих загрязняющих соединений, формирующих запах, при деятельности канализационных очистных сооружений // Здоровье населения и среда обитания. 2020. № 10 (331). С. 52–55. doi: 10.35627/2219-5238/2020-331-10-52-55
3. Маркова О.Л., Ганичев П.А., Зарицкая Е.В., Копытенкова О.И., Еремин Г.Б. О выборе приоритетных веществ для оценки выбросов заводов по сжиганию осадков сточных вод // Анализ риска здоровью — 2022. Фундаментальные и прикладные аспекты обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения. Совместно с международной встречей по окружающей среде и здоровью RISE-2022: материалы XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием: в 2 т. / под ред. проф. А.Ю. Поповой, акад. РАН Н.В. Зайцевой. Пермь: изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. 2022. Т. 1. С. 352–357.
4. Sanger M, Werther J, Ogada T. NO_x and N_2O emission characteristics from fluidised bed combustion of semi-dried municipal sewage sludge. *Fuel*. 2001;80(2):167–177. doi: 10.1016/S0016-2361(00)00093-4
5. Копытенкова О.И., Еремин Г.Б., Можухина Н.А., Маркова О.Л., Ганичев П.А. К вопросу сжигания осадков сточных вод // Актуальные вопросы гигиены: сборник научных трудов VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 27 февраля 2021 года. Санкт-Петербург: Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова. 2021. С. 167–171.
6. Маркова О.Л., Зарицкая Е.В., Еремин Г.Б. К вопросу дезодорации осадков сточных вод. Здоровье — основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. 2020. Т. 15. № 1. С. 393–401.
7. Brisolara KF, Qi Y, Baldassari M, Bourgeois C. Bio-solids and sludge management. *Water Environ Res*. 2017;89(10):1245–1267. doi: 10.2175/106143017X15023776270287
8. Кноер П., Бюхлер М., Пуассон А., Чепурнов А.В. Низкотемпературная двухступенчатая сушка осадка сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 4. С. 7а–11.
9. Хорева П.В., Бернадинер И.М. Эмиссия вредных веществ при сжигании осадков сточных вод // Энергосбережение — теория и практика: труды Девятой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов, Москва, 05–12 октября 2018 года. Москва: Издательский дом МЭИ, 2018. С. 135–138.
10. Yao H, Naruse I. Control of trace metal emissions by sorbents during sewage sludge combustion. *Proc*

- Combust Inst.* 2005;30(2):3009–3016. doi: 10.1016/j.proci.2004.07.047
11. Phua Z, Giannis A, Dong ZL, Lisak G, Ng WJ. Characteristics of incineration ash for sustainable treatment and reutilization. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2019;26(17):16974–16997. doi: 10.1007/s11356-019-05217-8
 12. Yu S, Zhang H, Lü F, Shao L, He P. Flow analysis of major and trace elements in residues from large-scale sewage sludge incineration. *J Environ Sci (China).* 2021;102:99–109. doi: 10.1016/j.jes.2020.09.023
 13. Ma P, Rosen C. Land application of sewage sludge incinerator ash for phosphorus recovery: A review. *Chemosphere.* 2021;274:129609. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129609
 14. Steele JC, Meng XZ, Venkatesan AK, Halden RU. Comparative meta-analysis of organic contaminants in sewage sludge from the United States and China. *Sci Total Environ.* 2022;821:153423. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153423
 15. Zhu Y, Zhai Y, Li S, et al. Thermal treatment of sewage sludge: A comparative review of the conversion principle, recovery methods and bioavailability – predicting of phosphorus. *Chemosphere.* 2022;291(Pt 3):133053. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133053
 16. Grobelak A, Grosser A, Kacprzak M, Kamizela T. Sewage sludge processing and management in small and medium-sized municipal wastewater treatment plant – new technical solution. *J Environ Manage.* 2019;234:90–96. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.12.111
 17. Reuna S, Väisänen A. To incinerate or not? – Effects of incineration on the concentrations of heavy metals and leaching efficiency of post-precipitated sewage sludge (RAVITA™). *Waste Manag.* 2020;118:241–246. doi: 10.1016/j.wasman.2020.08.022
 18. Schnell M, Horst T, Quicker P. Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review. *J Environ Manage.* 2020;263:110367. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110367
 19. Mayer F, Bhandari R, Gäch SA. Life cycle assessment of prospective sewage sludge treatment paths in Germany. *J Environ Manage.* 2021;290:112557. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112557
 20. Fujitani Y, Sato K, Tanabe K, et al. Volatility distribution of organic compounds in sewage incineration emissions. *Environ Sci Technol.* 2020;54(22):14235–14245. doi: 10.1021/acs.est.0c04534
 21. Васильев Б.В., Рублевская О.Н., Леонов Л.В. Обработка и утилизация осадков сточных вод в Санкт-Петербурге // Вода и экология: проблемы и решения. 2012. № 4 (52). С. 64–73.
 22. Рублевская О.Н., Пробирский М.Д. Реконструкция завода сжигания осадков на Центральной станции аэрации Санкт-Петербурга // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 1. С. 52–57.
 23. Рублевская О.Н., Краснопоев А.Л. Опыт внедрения современных технологий и методов обработки осадка сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2011. № 4. С. 65–69.
 24. Рублевская О.Н., Васильев Б.В., Протасовский Е.М., Петров С.В. Обработка и утилизация осадков сточных вод на очистных сооружениях Санкт-Петербурга: опыт и перспективы // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 10. С. 47–51.
 25. Панкова Г.А., Петров С.В. Опыт эксплуатации заводов по сжиганию осадков сточных вод в ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга» // Водоснабжение и санитарная техника. 2015. № 7. С. 65–71.
 26. Chen T, Gu Y, Yan J, et al. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in flue gas emissions from municipal solid waste incinerators in China. *J Zhejiang Univ Sci.* 2008;9:1296–1303. doi: 10.1631/jzus.A0720144
 27. Gao H, Ni Y, Zhang H, et al. Stack gas emissions of PCDD/Fs from hospital waste incinerators in China. *Chemosphere.* 2009;77(5):634–639. doi: 10.1016/j.chemosphere.2009.08.017
 28. Karaca C, Sözen S, Orhon D, Okutan H. High temperature pyrolysis of sewage sludge as a sustainable process for energy recovery. *Waste Manag.* 2018;78:217–226. doi: 10.1016/j.wasman.2018.05.034
 29. Åmand LE, Kassman H. Decreased PCDD/F formation when co-firing a waste fuel and biomass in a CFB boiler by addition of sulphates or municipal sewage sludge. *Waste Manag.* 2013;33(8):1729–1739. doi: 10.1016/j.wasman.2013.03.022
 30. Lu SY, Yan JH, Li XD, Ni MJ, Cen KF. Laboratory-scale study of the suppression of PCDD/F emission during coal and MSW co-incineration. *J Environ Sci (China).* 2007;19(6):762–767. doi: 10.1016/s1001-0742(07)60127-2

References

1. Rublevskaya ON. [Experience of the State Unitary Enterprise “Vodokanal of St. Petersburg” in introducing sewage sludge disposal techniques.] In: *Modern Trends in the Development of Water Supply and Sanitation: Proceedings of the International Conference Dedicated to the 145th Anniversary of UE „Minskvodokanal”, Minsk, February 13–14, 2019 (in 2 pts)*. Minsk: Belarusian State Technological University Publ.; 2019:70–75. (In Russ.)
2. Zaritskaya EV, Ganichev PA, Mikheeva AYU, Markova OL, Yeregin GB, Myasnikov IO. On the issue of monitoring odor-generating volatile pollutants during sewage treatment plant operation. *Zdorov’e Naseleniya i Sreda Obitaniya.* 2020;(10(331)):52–55. (In Russ.) doi: 10.35627/2219-5238/2020-331-10-52-55
3. Markova OL, Ganichev PA, Zaritskaya EV, Kopytenkova OI, Yeregin GB. [On the choice of priority substances for assessing emissions from sewage sludge incinerators.] In: *Health Risk Analysis – 2022: Fundamental and Applied Aspects of Ensuring Sanitary and Epidemiological Welfare of the Population: Proceedings of the Twelfth All-Russian Scientific and Practical Conference with the International Meeting on Environment and Health RISE-2022, Perm, May 18 – 20, 2022 (in 2 vol.)*. Popova AYU, Zaitseva NV, eds. Perm: Perm National Research Polytechnic University Publ.; 2022;1:352–357. (In Russ.)
4. Sanger M, Werther J, Ogada T. NO_x and N₂O emission characteristics from fluidised bed combustion of semi-dried municipal sewage sludge. *Fuel.* 2001;80(2):167–177. doi: 10.1016/S0016-2361(00)00093-4
5. Kopytenkova OI, Eremin GB, Mozzhukhina NA, Markova OL, Ganichev PA. [On the issue of sewage sludge incineration.] In: *Topical Issues of Hygiene: Proceedings of the Sixth All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation, St. Petersburg, February 27, 2021*. St. Petersburg: North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov Publ.; 2021:167–171. (In Russ.)
6. Markova OL, Zaritskaya EV, Yeregin GB. On the issue of waste water sediment deodorization. *Zdorov’e – Osnova Chelovecheskogo Potentsiala: Problemy i Puti Ikh Resheniya.* 2020;15(1):393–401. (In Russ.)
7. Brisolara KF, Qi Y, Baldassari M, Bourgeois C. Biosolids and sludge management. *Water Environ Res.* 2017;89(10):1245–1267. doi: 10.2175/106143017X15023776270287
8. Knoer P, Buechler M, Poisson A, Chepurnov AV. Low-temperature two-stage wastewater sludge drying. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika.* 2012;(4):7a–11. (In Russ.)
9. Khoreva PV, Bernadiner IM. [Emission of harmful substances during sewage sludge incineration.] In: *Energy Conservation – Theory and Practice: Proceedings of the Ninth International School – Seminar of Young Scientists and Specialists, Moscow, October 5–12, 2018*. Moscow: MEI Publ.; 2018:135–138. (In Russ.)
10. Yao H, Naruse I. Control of trace metal emissions by sorbents during sewage sludge combustion. *Proc Combust Inst.* 2005;30(2):3009–3016. doi: 10.1016/j.proci.2004.07.047
11. Phua Z, Giannis A, Dong ZL, Lisak G, Ng WJ. Characteristics of incineration ash for sustainable treatment and reutilization. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2019;26(17):16974–16997. doi: 10.1007/s11356-019-05217-8

12. Yu S, Zhang H, Lü F, Shao L, He P. Flow analysis of major and trace elements in residues from large-scale sewage sludge incineration. *J Environ Sci (China)*. 2021;102:99-109. doi: 10.1016/j.jes.2020.09.023
13. Ma P, Rosen C. Land application of sewage sludge incinerator ash for phosphorus recovery: A review. *Chemosphere*. 2021;274:129609. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129609
14. Steele JC, Meng XZ, Venkatesan AK, Halden RU. Comparative meta-analysis of organic contaminants in sewage sludge from the United States and China. *Sci Total Environ*. 2022;821:153423. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153423
15. Zhu Y, Zhai Y, Li S, *et al*. Thermal treatment of sewage sludge: A comparative review of the conversion principle, recovery methods and bioavailability – predicting of phosphorus. *Chemosphere*. 2022;291(Pt 3):133053. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133053
16. Grobelak A, Grosser A, Kacprzak M, Kamizela T. Sewage sludge processing and management in small and medium-sized municipal wastewater treatment plant – new technical solution. *J Environ Manage*. 2019;234:90-96. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.12.111
17. Reuna S, Väisänen A. To incinerate or not? – Effects of incineration on the concentrations of heavy metals and leaching efficiency of post-precipitated sewage sludge (RAVITA™). *Waste Manag*. 2020;118:241-246. doi: 10.1016/j.wasman.2020.08.022
18. Schnell M, Horst T, Quicker P. Thermal treatment of sewage sludge in Germany: A review. *J Environ Manage*. 2020;263:110367. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.110367
19. Mayer F, Bhandari R, Gäth SA. Life cycle assessment of prospective sewage sludge treatment paths in Germany. *J Environ Manage*. 2021;290:112557. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112557
20. Fujitani Y, Sato K, Tanabe K, *et al*. Volatility distribution of organic compounds in sewage incineration emissions. *Environ Sci Technol*. 2020;54(22):14235-14245. doi: 10.1021/acs.est.0c04534
21. Vasiliev BV, Rublevskaia ON, Leonov LV. [Treatment and utilization of sewage sludge in St. Petersburg.] *Voda i Ekologiya: Problemy i Resheniya*. 2012;(4(52)):64-73. (In Russ.)
22. Rublevskaia ON, Probirskii MD. Reconstruction of the sludge incineration plant at the Central wastewater treatment facilities in St. Petersburg. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*. 2017;(1):52-57. (In Russ.)
23. Rublevskaya ON, Krasnopeev AL. Experience in introduction of up-to-date technologies and methods of wastewater sludge treatment. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*. 2011;(4):65-69. (In Russ.)
24. Rublevskaia ON, Vasil'ev BV, Protasovskii EM, Petrov SV. Wastewater sludge processing and utilization at the wastewater treatment facilities of Saint-Petersburg: Best practices and prospects. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*. 2018;(10):47-51. (In Russ.)
25. Pankova GA, Petrov SV. The experience of operating wastewater sludge incineration plants at SUE „Vodokanal of St. Petersburg”. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaya Tekhnika*. 2015;(7):65-71. (In Russ.)
26. Chen T, Gu Y, Yan J, *et al*. Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in flue gas emissions from municipal solid waste incinerators in China. *J Zhejiang Univ Sci*. 2008;9:1296-1303. doi: 10.1631/jzus.A0720144
27. Gao H, Ni Y, Zhang H, *et al*. Stack gas emissions of PCDD/Fs from hospital waste incinerators in China. *Chemosphere*. 2009;77(5):634-639. doi: 10.1016/j.chemosphere.2009.08.017
28. Karaca C, Sözen S, Orhon D, Okutan H. High temperature pyrolysis of sewage sludge as a sustainable process for energy recovery. *Waste Manag*. 2018;78:217-226. doi: 10.1016/j.wasman.2018.05.034
29. Åmand LE, Kassman H. Decreased PCDD/F formation when co-firing a waste fuel and biomass in a CFB boiler by addition of sulphates or municipal sewage sludge. *Waste Manag*. 2013;33(8):1729-1739. doi: 10.1016/j.wasman.2013.03.022
30. Lu SY, Yan JH, Li XD, Ni MJ, Cen KF. Laboratory-scale study of the suppression of PCDD/F emission during coal and MSW co-incineration. *J Environ Sci (China)*. 2007;19(6):762-767. doi: 10.1016/S1001-0742(07)60127-2

