

**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,  
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА» (СПбГУТ)  
ФАКУЛЬТЕТ РАДИОТЕХНОЛОГИЙ СВЯЗИ (РТС)  
КАФЕДРА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ (ЭБТ)**

---

**Заявка на конкурс студенческих научных работ  
на направление «Радиотехнологии связи»**

Тема конкурсной работы:

«Малоотходная технология переработки осадка сточных вод на примере  
Юго-Западных очистных сооружений Санкт-Петербурга»

Выполнил:

студентка гр. ЭП-81

Елистратова Анастасия Романовна

Руководитель:

Манвелова Наталья Евгеньевна

Подпись\* 

«19» марта 2022 г.

Санкт-Петербург, 2022 г.

## Содержание

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1 ОСАДКИ СТОЧНЫХ ВОД .....	8
1.1 Состав осадка сточных вод, его виды и способы его образования .....	8
1.2 Технологические процессы переработки осадков .....	11
1.3 Утилизация осадков сточных вод с помощью сжигания.....	14
ГЛАВА 2 ОПИСАНИЕ МАЛООТХОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ОСВ НА ЮГО-ЗАПАДНЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ.....	20
2.1 Система очистки сточных вод на ЮЗОС .....	20
2.2 Состав и количество образующегося осадка .....	28
2.3 Система утилизации ОСВ на ЮЗОС.....	29
2.4 Эколого-экономическое обоснование эффективности существующей технологии .....	38
ГЛАВА 3 КАТАЛИТИЧЕСКОЕ СЖИГАНИЕ КАК НАИБОЛЕЕ СОВРЕМЕННЫЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЙ МЕТОД СЖИГАНИЯ ОСВ.....	42
3.1 Описание метода.....	42
3.2 Доказательства эффективности метода и примеры его внедрения. ....	46
3.3 Эколого-экономическое обоснование внедрения метода на ЮЗОС. ....	50
3.4. Результаты исследования .....	53
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	55
Список используемых источников .....	57
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 РАСЧЕТ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ОСАДКА В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ ПЕСКА .....	60
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 РАСЧЕТ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО СЖИГАНИЯ ОСАДКА .....	65

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ОСВ — осадок сточных вод

ЗСО — завод сжигания осадка

ЦОиСО ЮЗОС — Цех обработки и сжигания осадка Юшл-Западных очистных сооружений

ИК СО РАН — Институт катализа сибирского отделения Российской академии наук

БПК — биохимическое потребление кислорода

ПДК — предельно допустимые концентрации

КОС — канализационные очистные сооружения

ЮЗОС — Юго-Западные очистные сооружения

РКНО — распределительная камера первичных отстойников

ПО — первичный отстойник

ПРКА — приемный распределительный канал

УФО — ультрафиолетовая обработка

БС — бак смешения

НСВИ — насосная станция возвратного ила

КВ — камера выпуска

ПК — приемная камера

ВИ — возвратный ил

СВ — сточные воды

ЛЭМЗ — Ленинградский Электромеханический завод

ЛЖК — летучие жирные кислоты

ЗВ — загрязняющие вещества

## ВВЕДЕНИЕ

Проблема утилизации осадков сточных вод, а именно их переработки, сейчас как никогда остро стоит. До 300 тыс. м<sup>3</sup> необработанной воды в сутки может поступать на крупные очистные сооружения в городе с населением больше миллиона человек. В процессе эксплуатации таких очистных сооружений образуются неочищенные осадки сточных вод, которые наносят значительный ущерб окружающей среде без их последующей обработки и утилизации.

Осадки сточных вод (ОСВ) - твердая фракция органических и минеральных веществ, образующихся на очистных сооружениях; являются основным отходом процесса очистки стоков, который необходимо утилизировать. Объемы ОСВ в России исчисляются более чем двумя миллионами тонн ОСВ в год в расчете на сухое вещество. Актуальность моей выпускной квалификационной работы состоит в том, что наиболее часто применяемым методом утилизации ОСВ является использование их органической части как низкокалорийного топлива при высоко температурном сжигании в печах с псевдоожиженным слоем инертного материала (песка), либо в многоподовых печах с подачей природного газа. Однако, применение этих технологий сопровождается вторичным загрязнением окружающей среды токсичными продуктами высокотемпературного сгорания осадков. В связи с этим, предлагается актуальный низкотемпературный способ сжигания ОСВ в псевдоожиженном слое катализаторов, отличающийся высокой эффективностью и экологической целесообразностью.

Исследованием технологии сжигания иловых осадков в слое катализаторов сейчас занимаются не очень обширно, основные статьи и разработки относятся к Институту катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, а первые исследования датируются лишь 2010 годом, так что разработанность и изученность темы относительно небольшая.

Задачей настоящего исследования явилось определение возможности использования более экономически и экологически целесообразной технологии сжигания илового осадка сточных вод в псевдоожиженном слое катализатора, чем применяемая на ЮЗОС в настоящее время технология сжигания осадка в псевдоожиженном слое инертного материала.

Объект исследования - инновационные технологии переработки осадков сточных вод, их экологические и экономические аспекты. Предмет исследования - технология переработки ОСВ на ЮЗОС.

Цель моей выпускной квалификационной работы - исследовать экологические и экономические аспекты существующей технологии обработки осадков на ЮЗОС, их эффективность и обосновать целесообразность сжигания ОСВ в псевдоожиженном слое катализаторов.

Задачи исследования:

- Проанализировать основные технологические процессы переработки, состав и способ образования ОСВ;
- Выявить наиболее эффективные и актуальные технологии;
- Описать и оценить принципиальную схему очистки сточных вод на ЮЗОС;
- Описать и оценить технологию переработки ОСВ на ЮЗОС и технологию сжигания ОСВ в псевдоожиженном слое катализатора;

- Выполнить экономическое и экологическое обоснование технологий сжигания ОСВ;
- Сравнить технологию переработки ОСВ на ЮЗОС и технологию сжигания ОСВ в псевдоожиженном слое катализатора;
- Сделать вывод по использованию наиболее эффективной технологии.

Следует ожидать, что технология сжигания илового осадка сточных вод в псевдоожиженном слое катализатора окажется более экономически и экологически целесообразной, чем сжигание осадка в псевдоожиженном слое песка. При доказательстве гипотезы для ЮЗОС будет предложен переход на более эффективную технологию сжигания ОСВ.

В своей работе я использовала общие и частные методы исследования. Используемые теоретические методы - анализ и конкретизация, а практические - сравнение и измерение.

Теоретическая значимость работы: проведение анализа и оценка эколого-экономических преимуществ различных способов сжигания осадков сточных вод, в том числе, в присутствии катализаторов.

Практическая значимость работы: результаты работы могут быть использованы при проведении практических занятий в учебном процессе обучения по специальности 05.03.06- Экология и природопользование по дисциплинам: «Охрана окружающей среды», «Промышленная экология», «Природоохранные технологии», а также для внедрения на очистных сооружениях.

Базой моего исследования было ГУП Водоканал Санкт-Петербурга, а именно - Юго-Западные очистные сооружения. Сроки исследования: 12.03.22 - 23.05.22.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка используемых источников.

Первая глава моей ВКР “Осадки сточных вод” изучает основные вопросы образования осадка сточных вод и технологий его переработки и выделяет наиболее эффективные технологии.

Вторая глава ВКР “Описание малоотходной технологии утилизации ОСВ на Юго-Западных очистных сооружениях” изучает технологии очистки сточных вод и переработки ОСВ на ЮЗОС и выделяет эколого-экономическое обоснование технологии переработки ОСВ.

Третья глава ВКР “Каталитическое сжигание как наиболее современный и экологически безопасный метод сжигания ОСВ” изучает технологию сжигания ОСВ в псевдоожиженном слое катализатора и приводит сравнение с технологией сжигания ОСВ в псевдоожиженном слое песка и эколого-экономическое обоснование внедрения метода на ЮЗОС.

При проведении исследования была использована учебная и учебно-методическая литература, статьи из научно-практических изданий, Интернет-ресурсы сайтов. Например, активно использовались исследования А. Д. Симонова, О. В. Чуба, Н. А. Языкова, В. Н. Пармона в области каталитического сжигания; О. Н. Рублевской, С. В. Петрова, Г. А. Панковой в области различных специальных исследований ГУП Водоканал Санкт-Петербурга; и других авторов.

Апробация результатов работы: ежегодная конференция АПИНО-2022, Конкурс студенческих работ, Студенческая Весна.

## ГЛАВА 1 ОСАДКИ СТОЧНЫХ ВОД

### 1.1 Состав осадка сточных вод, его виды и способы его образования

На очистных сооружениях основная часть загрязняющих веществ, содержащихся в сточных водах в относительно разбавленной форме, задерживается во время очистки, концентрируется и образует осадок.

Осадок сточных вод представляет собой водную суспензию минеральных и органических веществ различного состава и происхождения, выделяющуюся из сточных вод при их механической, биологической или физико-химической очистке (реагентной) с объемной концентрацией полидисперсной твердой фазы от 0,5 до 10%. Осадок относится к классу трудноусвояемых полидисперсных суспензий. Как и во всех суспензиях, влага в осадке сточных вод находится в химических, физико-химических и физико-механических связях с твердыми частицами, а также в свободной форме [1].

По химическому составу осадки делятся на [2]:

- 1) минеральные (песок, частицы глины, масла, кислоты, щелочи, соли и т.д.);
- 2) органические – с содержанием золы менее 10% (бытовые отходы, фекалии, растительные масла, нефтепродукты, растительные волокна и т.д.);
- 3) смеси органических и минеральных веществ, содержание золы колеблется от 10 до 60%.

В зависимости от технологической схемы очистки сточных вод можно выделить несколько видов осадков:

- осадок (отходы) из решеток;
- осадок (песок) из песколовок;
- осадок первичных отстойников;
- активный ил вторичных отстойников после биологической очистки в аэротенках;
- биологическая пленка вторичных отстойников после биофильтров;
- осадок первичных отстойников с коагулянтами или флокулянтами;
- активный ил с коагулянтами или флокулянтами;
- смеси осадков и ила.

В зависимости от условий образования и характеристик разделения различают первичное и вторичное осаждение.

К первичным относятся грубые примеси, которые находятся в твердой фазе и выделяются из воды методами механической очистки: процеживанием, осаждением, фильтрацией, флотацией, осаждением в центробежном поле. Вторичное осаждение включает примеси, которые первоначально находятся в виде коллоидов, молекул и ионов в воде, но образуют твердую фазу в процессах биологической или физико-химической очистки воды или первичной обработки осадков.

Механический состав осадков из первичных отстойников сильно неоднороден. Размер отдельных частиц варьируется от 10 мм и более до частиц коллоидной и молекулярной дисперсии.

Активный ил, задерживаемый вторичными отстойниками после аэротенков, представляет биоценоз микроорганизмов и простейших. Структура активного ила представляет хлопьевидную массу бурого цвета. В свежем виде он почти не имеет запаха или пахнет землей, но, загнивая,

издает специфический гнилостный запах. По механическому составу активный ил относится к тонким суспензиям, состоящим на 98 % по массе из частиц размером меньше 1 мм. Отличается высокой влажностью — 99,2-99,7 %. Этот осадок легко взмучивается и довольно быстро оседает при отстаивании [3].

*Кек* – осадок после механического обезвоживания или подсушенный на иловых площадках.

Осадки также содержат канцерогенные и токсичные вещества, соли тяжелых металлов, синтетические поверхностно-активные вещества и т.д., содержание которых определяется наличием примесей промышленных сточных вод в бытовых сточных водах, а также бактериологическим загрязнением живыми микроорганизмами (бактериями, водорослями, простейшими) и паразитами (например, личинками и яйцами гельминтов).

В активном иле, помимо аэробных бактерий, составляющих основную массу, присутствуют дрожжевые и плесневые грибы, простейшие; из патогенных бактерий - возбудители желудочно-кишечных и других заболеваний. Поэтому осадки опасны с гигиенической и эпидемиологической точки зрения и требуют обезвреживания.

В зависимости от места происхождения, внешнего вида и консистенции осадки делятся на четыре класса токсичности и по степени опасности [5]: чрезвычайно опасные, особо опасные, умеренно опасные, с низким уровнем риска.

Эта классификация химических веществ по опасности проводится на основе их ПДК в почве в соответствии с рассчитанным индексом токсичности.

Основная часть сухого вещества осадка из первичных отстойников (в среднем 60–75%) и активного ила (в среднем 70–75%) составляют органические вещества. Органическая часть активного ила в основном состоит из веществ белкового происхождения (до 50%) при содержании жиров и углеводов, соответственно, до 30–10%. В сыром осадке из первичных отстойников белков примерно в 2 раза меньше, а углеводов в 2,5–3 раза больше, чем в активном иле [6]. Органическая часть осадков быстро загнивает, выделяя неприятный запах, при этом увеличивается количество коллоидных и мелкодисперсных частиц, вследствие чего снижается водоотдача осадков.

Сухое вещество осадка из первичных отстойников имеет следующий элементарный состав, % по массе: углерод – 35,4–87,8%; водород – 4,5–8,7%; сера – 0,2–0,7%; азот – 1,8–8%; кислород – 7,6–31,4%. Сухое вещество активного ила содержит: 44–75,8% углерода; 5,6–8,2% водорода; 0,9–2,7% серы; 3,3–9,8% азота; 12,5–43,2% кислорода [6].

## 1.2 Технологические процессы переработки осадков

Осадки, образующиеся в процессе очистки сточных вод (песок из песколовок, осадок первичных отстойников, избыточный активный ил и др.), должны подвергаться обработке с целью обезвоживания, стабилизации, снижения запаха, обеззараживания, улучшения физико-механических свойств, обеспечивающих возможность их экологически безопасной утилизации или размещения (хранения или захоронения) в окружающей среде [5].

Современная технологическая схема в обработки осадков включает следующие процессы: уплотнение (сгущение), стабилизация органической

части осадков, кондиционирование, обезвоживание, утилизация ценных продуктов, ликвидация.

Основные процессы, применяемые для обработки сточных вод, представлены на рис. 1.



Рис. 1. Технологические процессы обработки осадков сточных вод

*Уплотнение* осадка сточных вод является основным этапом его переработки и предназначено для уменьшения объема. Наиболее распространенными являются методы гравитационного и флотационного уплотнения. Гравитационное уплотнение осуществляется в отстойниках-уплотнителях; флотационное - в установках напорной флотации.

Центробежное уплотнение осадков также используется в гидроциклонах, центрифугах и сепараторах. Вибрационное уплотнение перспективно, осуществляется путем фильтрации осадка сточных вод через фильтрующие выпрямители или с использованием вибрационных устройств, погруженных в осадок [1].

Стабилизация осадков используется для разрушения биологически разлагаемой части органического вещества, что предотвращает загнивание осадков при длительном хранении на открытом воздухе (сушка на иловых площадках, использование в качестве сельскохозяйственных удобрений и т. п.).

Для стабилизации осадков промышленных сточных вод применяют в основном аэробную стабилизацию - длительное аэрирование осадков в сооружениях типа аэротенков, в результате чего происходит распад основной части биологически разлагаемых веществ, подверженных гниению [7].

Кондиционирование осадков проводят для разрушения коллоидной структуры осадка органического происхождения и увеличения их водоотдачи при обезвоживании. В промышленности применяют в основном реагентный метод кондиционирования с помощью хлорного железа и извести. Стоимость такой обработки составляет до 40% стоимости всех затрат при обработке осадка, поэтому ведется разработка и внедрение более экономичных методов кондиционирования: тепловой обработки, замораживания и электрокоагуляции [7].

Обезвоживание осадков сточных вод предназначено для получения шлама с объемной концентрацией полидисперсной твердой фазы до 80 %. До недавнего времени обезвоживание осуществлялось в основном сушкой осадков на иловых площадках. Однако низкая эффективность такого

процесса, дефицит земельных участков в промышленных районах и загрязнение воздушной среды обусловили разработку и применение более эффективных методов обезвоживания: вакуум-фильтрование на фильтр-прессах, центрифугирование и вибрационное фильтрование. Термической сушкой обезвоживают осадки, содержащие сильно токсичные вещества, которые перед ликвидацией и утилизацией необходимо обеззараживать. Широкое внедрение процессов термической сушки ограничивается высокой стоимостью процесса очистки [8].

*Ликвидация* осадка сточных вод применяется в тех случаях, когда его утилизация невозможна или экономически нецелесообразна.

Выбор рациональной технологической схемы переработки осадка является сложной инженерной, экономической и экологической задачей, но в любом случае, эффективная технологическая схема основана на сочетании различных методов обработки осадков, поскольку зависят от многих факторов: свойств осадков, их количества, климатических условий, доступности земельных ресурсов и т.д.

### 1.3 Утилизация осадков сточных вод с помощью сжигания

Для полной ликвидации органических компонентов осадков их сжигают. Метод сжигания применим в тех случаях, когда невозможна или экономически нецелесообразна утилизация осадка. В последние годы метод сжигания находит все большее применение для ликвидации производственных шламов ряда предприятий химической, нефтеперерабатывающей, цементной, угольной отраслей промышленности и осадков городских очистных станций. При сжигании происходит полное окисление органических веществ осадков и образование стерильного

остатка - золы, которая может быть использована в качестве присадочного материала при подготовке осадка к обезвоживанию. Это позволяет снизить расход химических реагентов.

В качестве топочных устройств для сжигания осадков в основном применяют многоподовые печи и печи с кипящим слоем инертного носителя.

Многоподовая печь представляет собой камеру с цилиндрической стальной оболочкой диаметром 3—7 м и высотой 5—15 м, футерованную огнеупорными материалами и имеющую от 5 до 12 горизонтальных огнеупорных подов. Последние имеют чередующиеся отверстия для загрузки и выгрузки движущегося сверху обезвоженного осадка. Дымовые газы движутся навстречу потоку осадка. По оси печи расположен полый вал, вращающийся с частотой 0,5—3,5 мин. К валу над каждым подом прикреплены по две радиальные мешалки, с помощью которых осадок передвигается к периферическим отверстиям, а через них попадает на лежащие ниже поды. Вал и отводы охлаждаются воздухом, подаваемым воздуходувкой. Воздух, нагретый топочными газами, поступает в зону горения печи. На верхних подах испаряется основная часть влаги, на средних при температуре 800—900°С осадки сгорают, а в нижней части печи происходит охлаждение образующейся золы. На рисунке 2 представлена схема многоподовой печи:

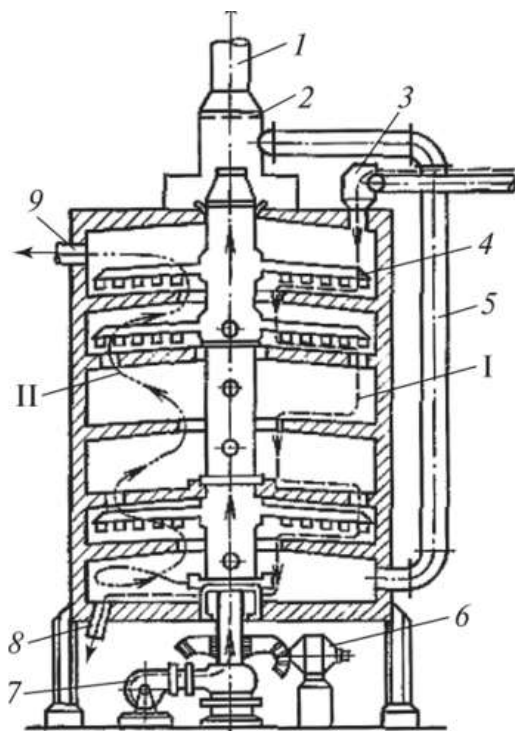


Рис. 2. Схема многоподовой печи для сжигания осадков сточных вод: 1 — вывод охлаждающего воздуха; 2 — заслонка; 3 — ввод сжигаемого осадка; 4 — скребковая мешалка; 5 — рециркуляционная труба; 6 — привод мешалки; 7 — воздушодувка подачи охлаждающего воздуха; 8 — выход золы; 9 — выход отработанных газов; I — сжигаемый осадок; II — газы

Многоподовые печи имеют ряд недостатков. В частности, для изготовления полого вала и скребковых мешалок, подвергающихся воздействию высоких температур и коррозионной среды, требуются дорогостоящие жаростойкие чугуны [9].

В 60-х годах для сжигания осадков начали применять печи с псевдоожиженным слоем инертного носителя. Процесс сжигания осадков в условиях псевдоожиженного слоя значительно эффективнее, чем в стационарном слое. Образование псевдоожиженного слоя достигается применением дутья, интенсивность которого превышает предел устойчивости плотного слоя. Все частицы в псевдоожиженном слое интенсивно перемешиваются, двигаясь колебательно вверх и вниз. В качестве инертного материала применяют песок с размером фракций 1—5

мм или фторопласт. Высота кипящего слоя составляет 0,5—1,5 м. Обработываемый материал, попадая в инертный слой, смешивается с ним, налипает на его частицы и удерживается до высыхания и частичного сгорания. Окончательное дожигание осадка и выделившихся газов производится в верхней части печи. Образовавшаяся зола состоит из пылевидных частиц размером 1—150 мкм и легко выносится из печи потоком отходящих газов. Их теплота используется для подогрева воздуха, подаваемого в печь, до температуры около 500° С, для чего после печи устанавливают теплообменник. Отходящие газы окончательно очищают от пыли в циклоне и мокром скруббере. Зола удаляется (обычно гидравлическим способом) в золоотвал при очистной станции [10]. На рисунке 3 представлена схема печи с псевдоожиженным слоем инертного материала:

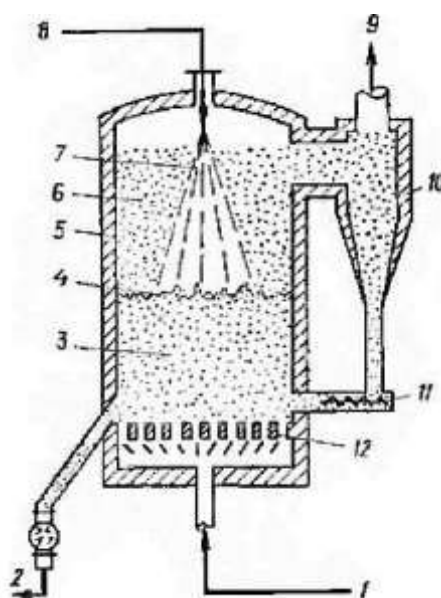


Рис. 3. Схема печи с псевдоожиженным слоем: 1 - воздух для псевдоожижения; 2 - твердый продукт; 3 - слой инертного носителя (песок) в твердой фазе; 4 - граница псевдоожиженного слоя; 5 - корпус; 6 - унос золы; 7 - поток загружаемых отходов; 9 - отходящие газы; 10 - сепаратор; 11 - возврат пыли; 12 - решетка

Недостатками метода сжигания осадков в кипящем слое являются: неравномерность распределения и времени пребывания в псевдоожиженном слое обрабатываемых твердых частиц, возможность их слипания и спекания; необходимость установки мощных пылеулавливающих устройств на выходе газов из псевдоожиженного слоя, особенно при сложном гранулометрическом составе твердых частиц, и др. Производительность печей с кипящим слоем ограничена из-за трудности равномерной передачи и распределения осадка по слою [11].

Основную проблему при сжигании осадков сточных вод, также как и при сжигании твердых коммунальных отходов, представляют дымовые газы, которые содержат золу-унос, соединения тяжелых металлов (Hg, Cd, Pb и др.), кислотные газы (HCl, SO<sub>2</sub>). Для их очистки используют многоступенчатую систему, включающую следующие принципиальные стадии:

- очистка от пыли в электрофилтре (задерживается 92-99% золы-уноса и частиц тяжелых металлов);
- охлаждение газа и улавливание кислотных примесей (HCl, SO<sub>2</sub>) и остатка золы-уноса в скруббере Вентури;
- промывка газов щелочным раствором в промывной колонне с улавливанием сернистого ангидрида (оксиды азота при сжигании практически не образуются вследствие низкой температуры этого процесса).

Такая схема газоочистки в целом удовлетворяет европейским стандартам в отношении выбросов загрязняющих веществ, а сама технология предусматривает использование вторичных ресурсов, образующихся при сгорании осадка. Например, золу применяют в

качестве строительного материала для изготовления кирпича. Пар котлов-утилизаторов полностью обеспечивает производственные и бытовые помещения отоплением и горячим водоснабжением, коммерчески используется котельной для снабжения внешних потребителей [12].

Наиболее эффективным и современным методом сжигания осадка является каталитическое сжигание. В отличие от методов высокотемпературного сжигания описанных выше, каталитическое сжигание является низкотемпературным методом и позволяет избежать вторичного загрязнения окружающей среды продуктами высокотемпературного горения ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ , бензапирен). Процесс происходит в псевдоожиженном слое катализатора, и при влажности осадков менее 75% процесс может быть выполнен без дополнительных затрат на топливо и уменьшить размеры устройства более чем в 15 раз [13].

В качестве катализаторов обычно используются соединения драгоценных металлов, нанесенные на керамическую основу, или оксиды переходных металлов (оксиды ванадия, хрома, марганца, железа, кобальта, никеля или меди и др. [14]).

## ГЛАВА 2 ОПИСАНИЕ МАЛООТХОДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ УТИЛИЗАЦИИ ОСВ НА ЮГО-ЗАПАДНЫХ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

## 2.1 Система очистки сточных вод на ЮЗОС

Территория ЮЗОС располагается в Красносельском районе в зоне, ограниченной:

- на севере и востоке железнодорожными магистралями Балтийской ж.д. (парком Сосновая поляна и проспектом Народного Ополчения),
- на юге - Волхонским шоссе,
- на западе поселком Володарский,
- на востоке Таллинским шоссе.

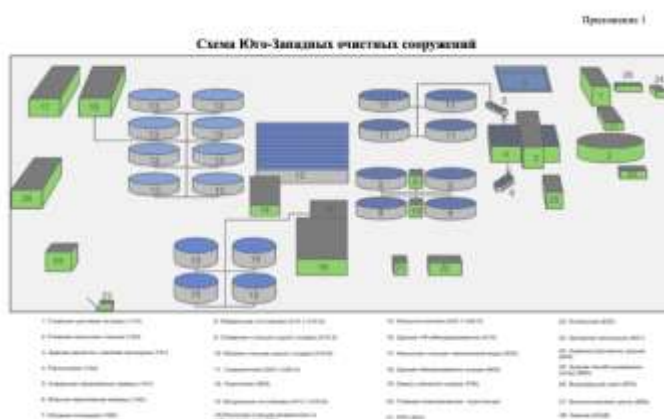


Рис. 5, 6. Схема и карта расположения ЮЗОС

ЮЗОС введены в эксплуатацию в сентябре 2005 г., производительность 330 тыс. м<sup>3</sup>/сут.

Бассейном канализования (территория, откуда поступают сточные воды по коллектору на очистные сооружения) является юго-западная часть города Санкт-Петербурга, которая включает г. Красное Село, пос. Горелово, пос. Стрельна, пос. Володарский, нежилых зон Кировского завода и завода ЛЭМЗ, жилых районов Урицка, Сосновой поляны, Ульянки, Дачное, части Петродворцового, Кировского и Красносельского районов.

Границы бассейнов канализования ЮЗОС представлены на рисунке 7:

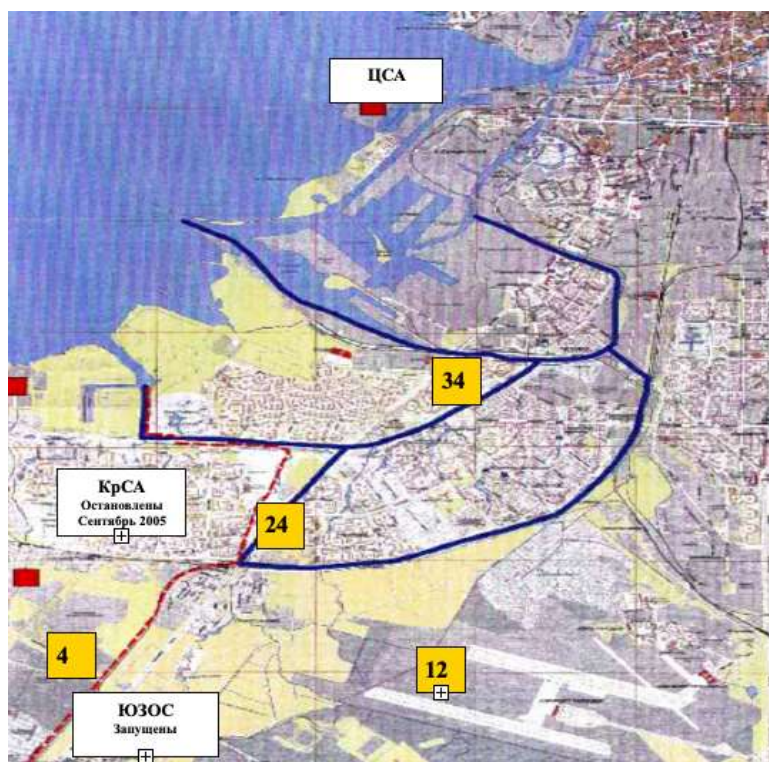


Рис.7. Границы бассейнов канализования ЮЗОС.

Отведение очищенных сточных вод с ЮЗОС осуществляется в Невскую губу к оголовку защитных дамб Морского канала по двум

ниткам трубопровода диаметром 2 м и длиной 9,2 км из них: 4,3 км сухопутная часть выпуска и 4,9 км морская часть. Для лучшего смешения сточных вод с водой водоема предусмотрены рассеивающие оголовки.

Этапы, использующиеся при очистке сточных вод на Юго-Западных очистных сооружениях: механическая, биологическая, химическая очистка, очистка ультрафиолетом.

Грязная вода поступает со всего Юго-Запада города на ЮЗОС по коллектору к главной насосной станции в колодец, где расположены грубые решетки с прозорами для защиты насосов. Далее стоки из главной насосной станции насосами подаются по напорным трубопроводам в приемную камеру. Процесс используется для прохождения последующей очистки под действием силы тяжести. Очищенный органический крупный мусор, изображенный на рис. 8, сжигается на заводе, построенном в 2007, с использованием печей с кипящим слоем кварца.



Рис. 8. Крупный органический осадок

Далее сточные воды поступают на аэрируемые песколовки (рис. 9), которые служат для извлечения из сточных вод тяжелых минеральных частиц (в основном песка) крупностью менее 0.2 мм, затрудняющих дальнейшую обработку воды и осадка. Принцип работы песколовок заключается в том, что под влиянием силы тяжести частицы, чей удельный вес больше веса воды, по мере их движения вместе со сточными водами выпадают в виде осадка. Как правило, песколовки оборудованы механизмом для перемещения осадка в бункер, а также гидроэлеваторами и насосами для удаления осадка из песколовки и транспортировки к месту обезвоживания.



Рис. 9. Аэрируемые песколовки

Для отмывки оседающего в песколовках осадка от органических загрязнений с помощью подаваемого через установленные вдоль боковой стенки аэраторы воздуха создается поступательно-вращательное движение жидкости. Количество находящихся в работе секций песколовки

определяется в зависимости от скорости потока жидкости, максимальное количество – 8 штук [17].

Пройдя очистку в песколовках, сточные воды поступают в распределительную камеру первичных отстойников (РКПО) (рис. 10), где через щитовые затворы распределяются на четыре первичных отстойника. Первичные отстойники (ПО) оборудованы скребковыми механизмами для сгребания осажденного осадка к приямкам. ПО рассчитаны на время пребывания сточных вод 3 часа при проектном расходе. Основные отличия первичных отстойников от вторичных: у последних нет устройств для сбора и удаления жировых и других плавающих веществ (ЛЖК), а также, как правило, применяется разная система откачки осадка (илососы во вторичных отстойниках).



Рис. 10. Первичный отстойник

Следующий этап очистки сточных вод на ЮЗОС – аэротенк, изображенный на рис. 11 и 12, представляющий из себя систему активного биологического очищения сточных вод, выполненную в форме

прямоугольного резервуара с рядом дополнительных элементов. В процессе очистки через емкость пропускаются сточные воды, перемешанные с активным илом и насыщаемые кислородом. Очистка стоков происходит в шести двухкоридорных аэротенках. Технологический процесс представляет собой переработку активного ила для удаления фосфора, азота и органических веществ (БПК). Для поддержания иловой смеси во взвешенном состоянии и для ее перемешивания, в приемном распределительном канале аэротенков (ПРКА) установлены четыре непрерывно функционирующих мешалки, управляемые вручную.



Рис. 11,12. Аэротенк

Аэротенки разделены на анаэробную, аноксидную, переходную аноксидно/оксидную и оксидную зоны. Процесс биологического удаления фосфора требует чередования аэробных и анаэробных условий. В оксидной зоне аммонийный азот окисляется в нитрат, в аноксидной зоне нитраты восстанавливаются до газообразного азота. Аноксидно/оксидная зона в штатных условиях работает как аноксидная.

В анаэробной зоне происходит размножение потребляющих фосфор бактерий и быстрое накопление биологически разлагаемых органических веществ. Энергия, получаемая от расщепления полифосфатных молекул, приводит к выделению фосфора [18].

Аноксидная и аноксидно/оксидной зоны способствуют биологическому удалению азота, которое достигается в системе предварительной денитрификации, где поступающие стоки служат источником биологически разлагаемой органической массы. Денитрифицирующие бактерии преобразуют нитраты в азот, который в виде газа выделяется в атмосферу.

В оксидных зонах накапливающие фосфор микроорганизмы потребляют поступающую быстро биоразлагаемую органическую массу и летучие жирные кислоты в качестве источника углерода и энергии. Одновременно происходит потребление фосфора для возобновления в них запасов полифосфатов. Данные организмы усваивают весь фосфор, высвободивший в анаэробных зонах, и дополнительно фосфат, который присутствует в поступающем стоке. При этом обеспечивается удаление чистого фосфора в процессе изъятия избыточного ила.

Действующая схема глубокого удаления фосфора с чередованием анаэробно-аэробных условий способствует накоплению фосфора в активном иле. Бактерии активного ила обладают свойством при стрессовых условиях (чередование анаэробно/аэробных зон) удалять из сточных вод большее количество фосфатов – до 10% по сухому веществу. Удаленные в биомассу фосфаты должны быть выведены из системы с избыточным активным илом [17].

При длительном контакте уплотненного биологического ила и сырого осадка в баках смешения осадка происходит высвобождение фосфатов [18].

Финальным этапом перед подачей очищенной сточной воды в Финский залив является непрерывная ультрафиолетовая обработка (УФО), состоящая из двенадцати установок (рис. 13,14). После УФО очищенный и обеззараженный сток двумя трубопроводами и системе рассеивающих выпусков по двум лоткам Вентури поступают в камеру выпуска (КВ), откуда далее поступает в морской канал Финского залива. Общая протяженность выпуска 9,2 км из них: 4,3 км сухопутная часть выпуска и 4,9 км морская часть. Потребляемая электрическая мощность примерно 300 кВт.



Рис. 13,14. Ультрафиолетовая обработка воды

## 2.2 Состав и количество образующегося осадка

На заводе сжигания осадка (ЗСО) ежедневно утилизируется 34 тонны сухого осадка плюс 1,1 тонна шламов. Общее количество утилизируемого осадка - 12800 тонн [19].

В таблице 1 описан состав кека за 2017 год, рассчитанный ЗАО “Центр исследования и контроля воды”:

ТАБЛИЦА 1. Состав кека за 2017 г.

Алюминий, мг/кг	13000 +- 3000
Ванадий, мг/кг	13 +- 3
Железо, мг/кг	17000 +- 5000
Кадмий, мг/кг	3,4 +- 1,7
Кобальт, мг/кг	3,8 +- 1,5
Марганец, мг/кг	270 +- 80
Медь, мг/кг	170 +- 30
Мышьяк, мг/кг	2,9 +- 1,5
Никель, мг/кг	16 +- 6
Ртуть, мг/кг	0,59 +- 0,19
Свинец, мг/кг	26 +- 7
Хром, мг/кг	31 +- 6
Цинк, мг/кг	610 +- 120

По результатам анализа есть превышения ПДК практически по всем показателям, что позволяет нам лишь утилизировать осадок.

### 2.3 Система утилизации ОСВ на ЮЗОС

Цех обработки и сжигания осадка Юго-Западных очистных сооружений был построен в 2007 г. Он изображен на рис. 15.

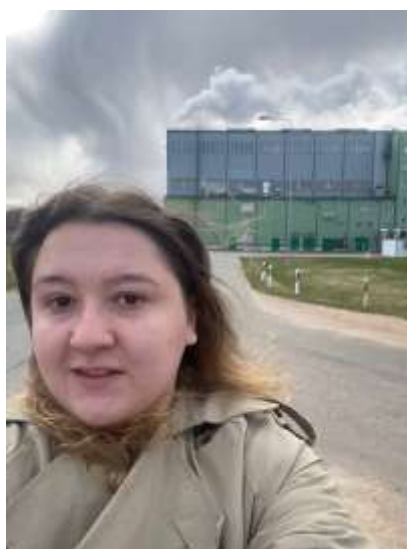


Рис. 15. ЦОиСО

Сжигание осадков сточных вод лежит в основе технологического процесса ЦОиСО ЮЗОС и предназначено для полной утилизации продуктов очистки сточных вод, исключения использования земельных территорий для депонирования осадков, получения золы, являющейся ценным сырьём в производстве строительных материалов.

Процесс сжигания включает в себя сжигание обезвоженного осадка, отходов от решеток, очистку дымовых газов и производство пара для

производства тепловой и электрической энергии. В результате сжигания образуется увлажнённая зола и очищенные дымовые газы.

Основным технологическим оборудованием ЦОиСО ЮЗОС являются [19]: печи с псевдоожиженным слоем, котлы-утилизаторы, система очистки дымовых газов, включающая электрофилтры и двухступенчатую промывку, генератор – номинальная мощность 3200 кВт.

Автором технологии и технического проекта является фирма «BAMAG ГМБХ» (Германия). В составе ЦОиСО представлено оборудование как европейских, так и Российских производителей.

Максимальная проектная производительность ЦОиСО – 68т св/сут. плюс 2,2т с.в./сут. отходов от решетки.

Номинальная производительность одной печи – 34 т с.в./сут. плюс 1,1т св/сут отходов от решеток.

Технологически можно разбить производство на следующие стадии [20]:

1. Транспортировка обезвоженного осадка
2. Сжигание обезвоженного осадка
3. Рекуперация энергии
4. Обработка дымовых газов
5. Складирование и выгрузка золы
6. Обработка сбросных вод
7. Хранение и дозирование химреагентов
8. Производство сжатого воздуха
9. Производство электроэнергии

Сначала обезвоженный осадок с помощью шнеков транспортируется в конвейер осадка, а далее, с помощью лопасти, сбрасывается в печь, где распределяется по псевдоожиженному слою.

Осадок сжигается параллельно в двух печах с псевдоожиженным слоем стационарного типа (рис. 16).



Рис. 16. Печь для сжигания осадка

Сжигаемый осадок подается на слой песка, который приводится в состояние псевдоожижения потоком подогретого воздуха. Горение осадка осуществляется за счет воздуха псевдоожижения слоя песка. Расход воздуха подбирается в зависимости от количества сжигаемого осадка. Схема печи представлена на рисунке 17:

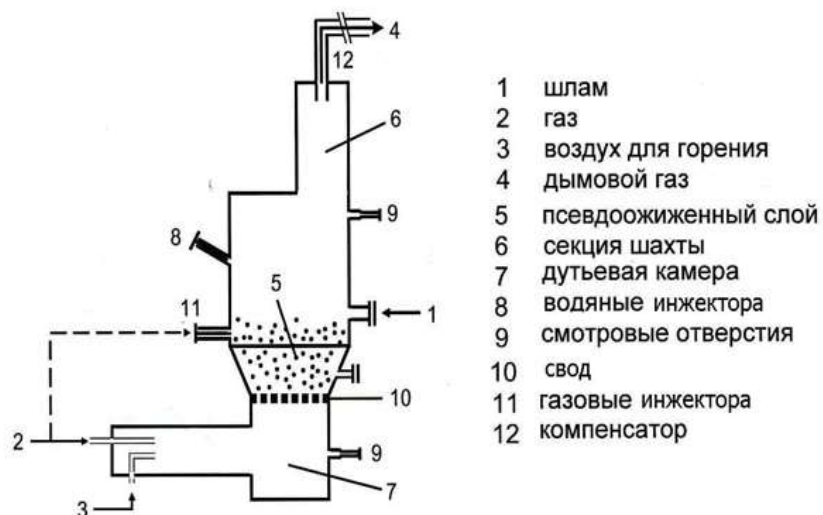


Рис.17. Печь с псевдоожиженным слоем на ЗСО

Под действием теплоты и механических воздействий слоя, горючие вещества дробятся и переходят в газообразное состояние, в то время как минеральные частицы превращаются в инертные золы, очень мелкие и находящиеся во взвешенном состоянии. Горение газов при наличии кислорода происходит в реакторе, где определенное время нахождения и избыточное количество воздуха обеспечивают их полное окисление. Смесь газов и золы, образовавшихся в результате горения, удаляется под куполом печи. На рис.18 изображен отработанный инертный материал - песок:



Рис. 18. Отработанный песок

Печь имеет следующие преимущества:

1. Отсутствие механических подвижных частей в корпусе печи обеспечивает ее высокую надежность и долгий срок службы.
2. Благодаря высокой термической инерции, которая объясняется наличием слоя песка, печь допускает изменения по качеству осадка, а также непостоянный режим работы.
3. Установка надежных датчиков, связанных с тепловым резервом слоя песка, упрощает эксплуатацию, контроль, и работа большей частью осуществляются автоматически.

Далее дымовые газы от печи поступают через трубчатый канал с огнеупорной футеровкой во впускное отверстие котла-утилизатора. Котел-утилизатор будет охлаждать дымовые газы до температуры (170-210°C), которая пригодна для обработки нисходящего дымового газа. Восстановленное тепло будет использоваться для производства перегретого пара с давлением 66 бар (а) и температурой 450°C, чтобы эксплуатировать турбину-генератор для производства электроэнергии.

Котел-утилизатор работает полностью в автоматизированном режиме. Производится непрерывный замер, контроль и учет основных рабочих параметров котла [19].

После дымовые газы поступают на трехступенчатую систему газоочистки.

Каждая линия обработки дымовых газов включает в себя электростатический фильтр, улавливающий мелкие минеральные частицы (золу и пыль), и двухступенчатую систему мокрой газоочистки, где из них удаляются тяжелые металлы и кислотные газы. Очищенные дымовые газы выбрасываются дымососом в дымовую трубу (рис. 19).



Рис. 19. Дымосос и дымовая труба изнутри

Первая ступень обработки дымового газа состоит из электростатического фильтра для удаления летучей золы из дымового газа, покидающего котел утилизатор. Электростатический фильтр имеет три поля для достижения концентрации сухой пыли не более  $10 \text{ мг/Нм}^3$  в

дымовом газе. Временное исчезновение одного из электрических полей не повлияет на остальной процесс обработки дымового газа кроме возникновения повышенной нагрузки пыли [20].

После электрофилтра дымовые газы проходят через теплообменник дымовых газов, в котором происходит охлаждение их перед тем, как они попадают в систему скрубберов.

После того, как дымовые газы прошли теплообменник дым/дым, они поступают на обработку в систему мокрых скрубберов, представленных на рис. 20. Система мокрых скрубберов состоит из двух ступеней, первая кислая ступень и вторая нейтральная ступень в виде скруббера уплотнительной колонны. Между двумя ступенями скруббера и после 2-ой ступени скруббера устанавливаются каплеуловители.



Рис. 20. Мокрый скруббер

Система скрубберов непрерывно удаляет последнюю порцию пыли, тяжелых металлов, кислых газов из дымовых газов, в полном соответствии со стандартами России и Европейского союза по выбросам в атмосферу.

Первый скруббер эксплуатируется при величине pH от 1 до 3 и гасит горячие дымовые газы до точки насыщения путем впрыскивания очищающего раствора. Очищающий раствор постоянно приводится в циркуляцию гасящими насосами.

Определенное количество отработанного очищающего раствора, так называемая кислая промывочная вода от обеих линий, постоянно выводится в измерительный бак, относящийся к установке по обработке сбросных вод [19].

В интенсивном контакте между очищающим раствором и дымовыми газами, выводится в ионной форме главным образом HCl, HF и ртуть. Гашение, главным образом, происходит в оборудовании, состоящем из промывочного кольца и уровней разбрызгивания для охлаждения и насыщения горячего дымового газа.

В нейтральной второй ступени удаляется SO<sub>2</sub> при значении pH от 5 до 7. Измерительная система pH устанавливается, чтобы привести раствор к необходимому уровню pH путем контролируемого дозирования раствора (42%) каустической соды (NaOH) полученного из системы дозирования каустической соды.

Образовавшаяся в процессе сжигания летучая зола и пыль будут собираться посредством двух конвейеров золы и подаваться лопастным затвором золы в предназначенный сосуд золы. Все из них изолированы и имеют электрический обогрев. При обработке партиями летучая зола и пыль транспортируются пневматически посредством приборного воздуха в соответствующий бункер золы [20].

Для разрежения летучей золы в бункере устанавливается система пневматической экстракции. Вентиляция бункера золы будет обеспечиваться самоочищающимся пылеулавливающим фильтром, так называемым фильтром бункера золы.

Сбросная вода от систем мокрой очистки обеих линий очистки дымового газа подается в установку очистки сбросной воды для нейтрализации, а также для удаления тяжелых металлов и взвешенных твердых веществ до значений концентрации ниже определенных пределов.

Общая конструкция установки обработки сбросных вод состоит из следующих узлов обработки:

- Предварительная обработка кислой сбросной воды
- Хранение и выравнивание потоков поступающей сбросной воды
- Охлаждение сбросной воды
- Нейтрализация, осаждение и флокуляция
- Сгущение осадка/ очистка воды
- Осушение осадка

Весь перегретый пар, так называемый пар высокого давления, от двух котлов утилизаторов с помощью электрогенератора перерабатывается в электрическую энергию и используется для нужд ЮЗОС.

А пар экстракции, так называемый пар среднего давления, используется в нескольких целях, включая [19]:

- Производство горячей воды для центральной системы отопления ЮЗОС.
- Температурный контроль бака питательной воды для бойлера.

- Предварительное нагревание воздуха для сжигания в подогревателях пара (один на каждую линию).

Оставшийся пар преобразуется в расширяющийся пар и используется в качестве технической воды ЮЗОС.

## 2.4 Эколого-экономическое обоснование эффективности существующей технологии

Для обоснования экологической эффективности используемой технологии, мы должны рассмотреть данный критерий в двух основных аспектах:

- опасность используемых и (или) образующихся в технологических процессах веществ для атмосферы, почвы, водных систем, человека, других живых организмов и экосистем в целом;
- характер негативного воздействия и удельные (на единицу обезвреженных отходов) значения эмиссий вредных веществ (в составе выбросов/сбросов/отходов).

В первом случае устанавливаются все виды эмиссии вредных веществ (в составе выбросов/сбросов/отходов) и их объемы (масса). При оценке опасности используемых и (или) образующихся в ходе технологических процессов вредных веществ устанавливаются так называемые маркерные загрязняющие вещества, выделяющиеся в атмосферу, поступающие в водные объекты, в промежуточные продукты и твердые отходы. По степени воздействия на организм вредные вещества подразделяются на четыре класса опасности: 1й — вещества чрезвычайно

опасные; 2й — вещества высокоопасные; 3й — вещества умеренно опасные; 4й — вещества малоопасные [21].

Характер негативного воздействия и удельные значения эмиссий (в составе выбросов/сбросов/отходов) оцениваются на основании следующих показателей:

а) для выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух:

1) характеристика источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферу;

2) перечень загрязняющих веществ, содержащихся в выбросах в атмосферу;

3) объем и (или) масса выбросов загрязняющих веществ до очистки в расчете на тонну переработанного сырья (обезвреженных отходов);

4) наличие очистных сооружений;

5) метод очистки, повторного использования;

6) объем и (или) масса выбросов загрязняющих веществ после очистки в расчете на тонну переработанного сырья;

7) информация о соблюдении установленных нормативов ПДВ [22];

Источником выбросов загрязняющих веществ в атмосферу является дымовая труба ЗСО, выпускающая очищенные дымовые газы.

В составе выбросов в атмосферу выделяется пыль, оксид углерода, гидрохлорид, фтористый водород, диоксид серы, тяжелые металлы и тд.

Расчет представлен в Приложении 1.

При сравнении двух полученных коэффициентов до и после газоочистки, очевидно, что газоочистные устройства, используемые на ЗСО ЮЗОС экологически эффективны и обоснованы. Также, концентрации ЗВ после очистки не превышает Гарантированные значения (Директива 2000/76/ЕС от 04.12.2000 г.), что означает соблюдение ПДВ.

Анализ экономической эффективности заключается в оценке затрат на внедрение и эксплуатацию технологии и выгоды от ее внедрения путем применения метода анализа затрат и выгод. Если внедрение различных технологий дает положительные результаты, то технологией с самой высокой результативностью считается та, которая дает наилучшее соотношение «цена/качество». Недостаток данного вида анализа заключается в необходимости обработки большого количества данных, причем некоторые выгоды сложно представить в денежной форме. Альтернативой методу анализа затрат и выгод, как указано в Рекомендациях [23], может служить анализ эффективности затрат, используемый для определения того, какие мероприятия являются наиболее предпочтительными для достижения определенной экологической цели при самой низкой стоимости.

Экономическую эффективность технологии рекомендуется определять следующим образом [23]:

$$\text{Экономическая эффективность} = \frac{\text{Годовые затраты, руб/Сокращение эмиссий, т/год}}{\text{Сокращение эмиссий, т/год}}$$

Для проведения оценки предлагаемой к внедрению технологии рекомендуется определить структуру затрат с выделением капитальных затрат (на строительство сооружений, приобретение и монтаж оборудования) и эксплуатационных. В эксплуатационных затратах

необходимо выделить затраты на техническое обслуживание и ремонт, энергоносители, материалы и услуги, затраты на оплату труда.

На диаграмме 1 представлена структура основных затрат строительства ЗСО:

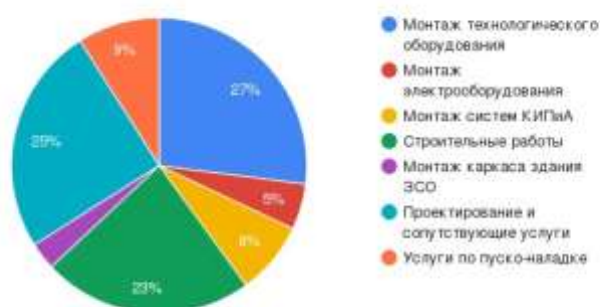


Диаграмма 1 - Структура основных затрат строительства ЗСО

Расчет представлен в Приложении 1.

Получившееся условное значение далее будет сравниваться с таким же значением, рассчитанным для другой технологии сжигания. Чем меньше будет получившееся значение, тем экономически эффективнее будет использование технологии.

## ГЛАВА 3 КАТАЛИТИЧЕСКОЕ СЖИГАНИЕ КАК НАИБОЛЕЕ СОВРЕМЕННЫЙ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЙ МЕТОД СЖИГАНИЯ ОСВ

### 3.1 Описание метода

Метод сжигания органических примесей применяется в тех случаях, когда возвращение примесей в производство невозможно или нецелесообразно. В последнее время получило развитие каталитическое сжигание. Если термическое сжигание применяется главным образом при высокой концентрации примесей и значительном содержании в газах кислорода при температуре 800—1100 °С, то при каталитическом методе окисления температура не превышает 250—300 °С. Каталитическая очистка в 2—3 раза дешевле высокотемпературного сжигания при высокой эффективности процесса [23].

Наиболее эффективным методом сжигания осадка является каталитический, в котором окисление органических веществ осуществляется на поверхности катализатора при относительно низкой температуре. При этом обеспечивается максимальная конверсия сжигаемого вещества в продукты полного окисления и снижается образование оксидов азота. Отличие каталитического сжигания от других типов горения заключается в том, сгорание осадка происходит без образования или при минимальном вкладе открытого пламени [24].

На поверхности катализатора происходит химическое взаимодействие компонентов осадка с поверхностным кислородом с последующей регенерацией восстановленной поверхности кислородом газовой фазы. Активность катализатора в процессе полного окисления в

значительной степени определяется энергией связи кислорода поверхности. По сравнению с традиционными способами сжигания наличие катализатора позволяет смягчить требования к термохимическим свойствам конструкционных материалов аппаратов, уменьшить потери тепла через стенки, упростить управление процессом, а также исключить протекание вторичных эндотермических процессов с образованием токсичных веществ. Использование катализатора снижает взрывоопасность и повышает энергонапряженность процессов. Это значительно уменьшает габариты и металлоемкость конструкций [25].

Для поддержания любого процесса горения необходимо соответствующее количество кислорода. При обычном сжигании необходимое количество кислорода на 10—15% больше стехиометрического, тогда как в процессах каталитического сжигания требуется только стехиометрическое количество, из-за чего отпадает необходимость в дополнительном подогреве [26].

На рис. 21 изображена схема установки каталитического сжигания газов. Перед подачей в реактор 1 газы очищаются от пыли в циклоне 2, проходят через теплообменник 3 и подогреватель 4, выходя в атмосферу через дымосос 5. Благодаря наличию теплообменников удастся использовать тепло очищенных газов из контактного аппарата для подогрева поступающих газов, что снижает расход энергии и обеспечивает непрерывность процесса [23].

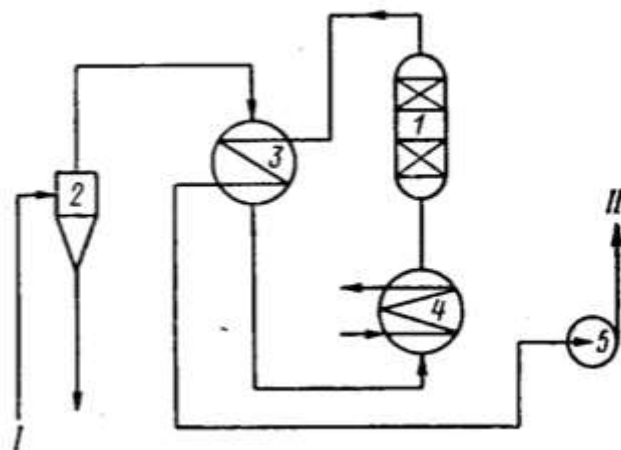


Рис. 21. Схема установки каталитического сжигания: 1-реактор, 2-циклон, 3-теплообменник, 4-подогреватель, 5-дымосос.

Для предотвращения выгорания катализатора (платина или рений) максимальную температуру процесса каталитического сжигания ограничивают  $815^{\circ}\text{C}$ . Каталитическое сжигание применяют для отходящих газов, содержание углеводородов в которых на 25% ниже минимального взрывоопасного предела. Если теплота сгорания газов достаточна для достижения температур, приводящих к выгоранию катализатора, их разбавляют атмосферным воздухом. Однако обычно отходящий газ содержит значительно меньше горючих материалов, чем требуется для поддержания устойчивого горения, и поэтому его предварительно нагревают до температуры проведения каталитической реакции [27].

Использование катализаторов из благородных металлов довольно затратно в производстве, однако, российские ученые из Института катализа им. Борескова создали две серии железо-алюминиевых и медь-железо-алюминиевых нанокompозитных катализаторов с различным соотношением оксидов железа, меди и алюминия, доказавших свою эффективность в ряде испытаний.

Также одним из недостатков технологии является определенный список требований, которым должен соответствовать катализатор:

- постоянная высокая каталитическая активность,
- селективность,
- механическая прочность,
- термостойкость,
- устойчивостью к действию каталитических ядов,
- большая длительность работы,
- легкая регенерируемость,
- необходимые гидродинамические характеристики,
- невысокая стоимость.

Активность определяется скоростью реакции, отнесенной к единице объема или массы катализатора и зависит от его хим. состава. Формирование свойств катализатора происходит во время его приготовления и во время эксплуатации, поэтому метод приготовления катализатора должен учитывать возможность образования активных центров в условиях катализа. Во многих случаях активность промышленных катализаторов увеличивают добавлением промоторов (сокатализаторов).

Селективность изменяется из-за изменения электронных свойств и окружения активных центров катализатора (эффект лиганда). В реакциях сложных органических молекул большое значение имеет преимущественное образование продукта, близкого по своей форме и размерам к размерам микропор катализатора.

В сложных многостадийных реакциях применяют многофазные многокомпонентные катализаторы, селективность которых выше благодаря тому, что каждая стадия сложной реакции ускоряется своим

компонентом катализатора. Селективность катализатора зависит также от его пористости, размера зерен и характера их укладки.

Термостойкость катализаторов важна для первых по ходу реагента слоев катализаторов в экзотермических реакциях, когда выделение тепла может вызвать рекристаллизацию и дезактивацию катализаторов. Для предотвращения рекристаллизации катализаторы наносят на термостойкие носители.

Устойчивость катализатора к действию ядов каталитических определяется спецификой их взаимодействия с катализатором. Металлические катализаторы отравляются соединениями кислорода ( $H_2O$ ,  $CO$ ), серы ( $H_2S$ ,  $CS_2$  и др.), N, P, As и другими веществами, образующими более прочную химическую связь с катализатором, чем реагирующие вещества [28].

### 3.2 Доказательства эффективности метода и примеры его внедрения.

Метод каталитического сжигания осадков сточных вод уже как несколько лет демонстрируется в качестве перспективной технологии. На 2016 год на базе технологии ИК СО РАН построены и эксплуатируются пять котельных разной мощности: две в Кемеровской области (1 и 3 Гкал/час), одна в Алтайском крае (3 Гкал/час) и одна в Амурской области (6 Гкал/час). Они используют уголь и выгодно отличаются меньшим потреблением электроэнергии, расходом сырья и, соответственно, себестоимостью производимого тепла по сравнению с традиционными слоевыми котельными [29]. На 2020 год в Омске ГК «Росводоканал» запустил в промышленную эксплуатацию каталитическую установку сжигания осадка сточных вод, разработанную все тем же ИК СО РАН [30].

Данная технология позволяет не только не складировать осадок на иловых полях, но еще и ликвидировать его без ущерба для окружающей среды.

Исследование эффективности метода каталитического сжигания осадка сточных вод проводилось на предприятии "Горводоканала" в Новосибирске. Сжигание илового осадка производилось на установке, показанной на рисунке 10. Осадок после первичного и вторичного осаждения обезвоживался до 70-80% и складировался на иловых полях. По данным технического анализа сухой осадок содержит 62,5% минеральных веществ (Fe, Si, Zn) и 37,5% органической части (S, Cl, P).

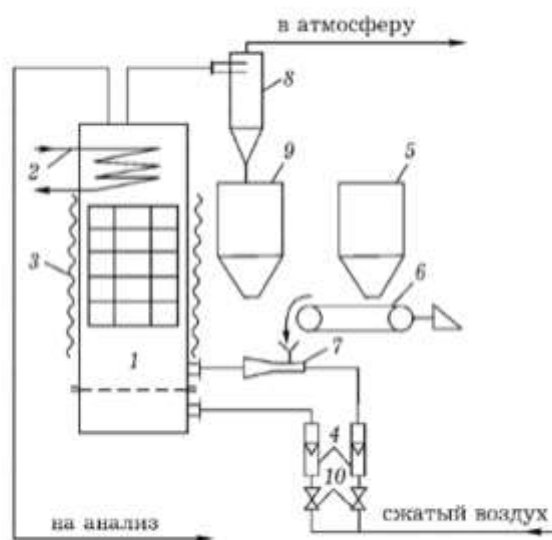


Рис. 10. Схема стендовой установки по каталитическому сжиганию твердых отходов: 1 - реактор, 2 - теплообменник, 3 - внешний электронагреватель, 4 - ротаметры, 5 - бункер для твердого топлива или отходов, 6 - транспортер, 7 - эжектор, 8 - циклон, 9 - емкость для сбора зольных остатков, 10 - регулировочные вентили.

На рисунке 11 представлена зависимость степени выгорания органической части осадка от температуры в псевдоожиженном слое катализатора: при температуре 500°C степень выгорания составила 94%, а

при температуре  $700^{\circ}$  - 98,2%. При температуре процесса  $700^{\circ}$  хроматографический анализ показал отсутствие продуктов неполного сгорания: CO и  $\text{CH}_4$ .

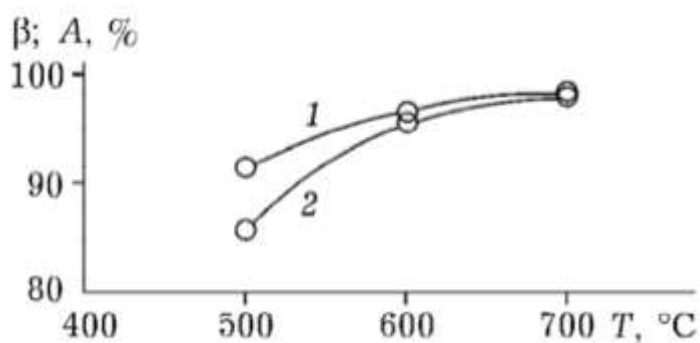


Рис. 11. Зависимость степени выгорания осадка  $\beta$  и его зольности A (1) от температуры процесса

При горении осадка часть органической части связывается с минеральной, а остальное в виде HCl,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  выделяется в газовую фазу. При температуре процесса  $700^{\circ}$  на выходе из реактора концентрация составила: HCl – 50 мг/м<sup>3</sup>,  $\text{SO}_x$  – 130,9 мг/м<sup>3</sup>,  $\text{P}_2\text{O}_5$  - 0,22 мг/м<sup>3</sup>. Степень связывания составила: HCl – 77,2%,  $\text{SO}_x$  – 93,3%,  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 99,98%. Для ртути степень связывания составила 45%, а концентрация 0,45 мг/м<sup>3</sup>.

В таблице 4 представлены данные ПДВ при сжигании 1т/ч сухого илового осадка при  $700^{\circ}$ . Реальный выброс с дымовыми газами существенно ниже ПДВ.

ТАБЛИЦА 4. ПДВ и концентрации веществ в дымовых газах при температуре процесса 700°

Параметр	Hg	HCL	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CO	NO <sub>x</sub>
ПДВ, г/с	$2,33 \cdot 10^{-3}$	1,49	7,46	0,37	7,46	0,63
РВ, г/с	$1,08 \cdot 10^{-3}$	0,14	0,36	$0,5 \cdot 10^{-3}$	-	0,30

Примечания: 1. ПДВ - предельно допустимый выброс при высоте выброса 15 м и при температуре отходящих газов 120°С для установки производительностью 1 т/ч по сухому осадку; 2. РВ - реальный выброс, рассчитанный для установки производительностью 1 т/ч по сухому осадку на основе экспериментальных данных.

Теплотворная способность (Q) исследуемого осадка составляет 112 ккал/кг. Из-за низкой Q необходимо вводить дополнительное топливо для сжигания при 700°С. На рисунке 12 показана зависимость количества дополнительной теплоты от влажности осадка. При этом, при сжигании в псевдоожиженном слое катализатора с температурой дымовых газов равной 700°С, процесс будет проходить без введения дополнительного топлива [13].

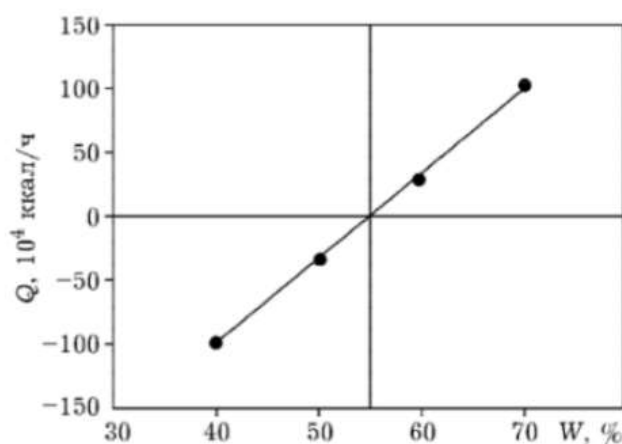


Рис. 12. Зависимость количества дополнительной теплоты (Q) от влажности осадка (W)

Таким образом, удаление осадка сточных вод сегодня может быть осуществлено в полном объеме с использованием метода каталитического

сжигания в псевдоожиженном слое катализатора, который является наиболее современным и экологически чистым методом сжигания, поскольку процессы сжигания могут проходить в автотермическом режиме, без введения дополнительного топлива и без затрат на дополнительную очистку отходящих дымовых газов.

### 3.3 Эколого-экономическое обоснование внедрения метода на ЮЗОС.

Для обоснования экологической эффективности используемой технологии, мы должны рассмотреть данный критерий в двух основных аспектах:

- опасность используемых и (или) образующихся в технологических процессах веществ для атмосферы, почвы, водных систем, человека, других живых организмов и экосистем в целом;
- характер негативного воздействия и удельные (на единицу обезвреженных отходов) значения эмиссий вредных веществ (в составе выбросов/сбросов/отходов).

В первом случае устанавливаются все виды эмиссии вредных веществ (в составе выбросов/сбросов/отходов) и их объемы (масса). При оценке опасности используемых и (или) образующихся в ходе технологических процессов вредных веществ устанавливаются так называемые маркерные загрязняющие вещества, выделяющиеся в атмосферу, поступающие в водные объекты, в промежуточные продукты и твердые отходы. По степени воздействия на организм вредные вещества подразделяются на четыре класса опасности: 1й — вещества чрезвычайно

опасные; 2й — вещества высокоопасные; 3й — вещества умеренно опасные; 4й — вещества малоопасные [21].

Особое внимание следует обратить на данные о соблюдении нормативов качества атмосферного воздуха после рассеивания выбросов, особенно веществ 1го и 2го классов опасности, а также на состав отходов обезвреживания (остаточных продуктов переработки отходов), образующихся в ходе технологических процессов, и на состав выбросов в атмосферу.

При оценке выбросов в атмосферу необходимо учитывать следующие параметры:

- характер последствий воздействия — долгосрочные необратимые воздействия рекомендуется рассматривать как наносящие больший вред окружающей среде, чем обратимые краткосрочные последствия;

- загрязняющие вещества, характеризующиеся высокой стойкостью, биоаккумуляцией, токсическими и канцерогенными эффектами, рекомендуется рассматривать как приоритетные в связи с возможностью их переноса на дальние расстояния (в том числе трансграничным переносом).

Характер негативного воздействия и удельные значения эмиссий (в составе выбросов/сбросов/отходов) оцениваются на основании следующих показателей:

а) для выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух:

- 1) характеристика источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферу;

- 2) перечень загрязняющих веществ, содержащихся в выбросах в атмосферу;

3) объем и (или) масса выбросов загрязняющих веществ до очистки в расчете на тонну переработанного сырья (обезвреженных отходов);

4) наличие очистных сооружений;

5) метод очистки, повторного использования;

6) объем и (или) масса выбросов загрязняющих веществ после очистки в расчете на тонну переработанного сырья;

7) информация о соблюдении установленных нормативов ПДВ [22];

Все исходные данные для расчета будут браться из исследования на Новосибирском Горводоканале. Газоочистка, как для метода сжигания в псевдоожиженном слое с песком, для каталитического сжигания не требуется, поэтому приведен расчет уже для отходящих газов.

Расчет представлен в Приложении 2.

Анализ экономической эффективности заключается в оценке затрат на внедрение и эксплуатацию технологии и выгоды от ее внедрения путем применения метода анализа затрат и выгод. Если внедрение различных технологий дает положительные результаты, то технологией с самой высокой результативностью считается та, которая дает наилучшее соотношение «цена/качество». Недостаток данного вида анализа заключается в необходимости обработки большого количества данных, причем некоторые выгоды сложно представить в денежной форме. Альтернативой методу анализа затрат и выгод, как указано в Рекомендациях [23], может служить анализ эффективности затрат, используемый для определения того, какие мероприятия являются

наиболее предпочтительными для достижения определенной экологической цели при самой низкой стоимости.

Экономическую эффективность технологии рекомендуется определять следующим образом [23]:

$$\text{Экономическая эффективность} = \frac{\text{Годовые затраты, руб/Сокращение эмиссий, т/год}}{\text{Сокращение эмиссий, т/год}}$$

Для проведения оценки предлагаемой к внедрению технологии рекомендуется определить структуру затрат с выделением капитальных затрат (на строительство сооружений, приобретение и монтаж оборудования) и эксплуатационных. В эксплуатационных затратах необходимо выделить затраты на техническое обслуживание и ремонт, энергоносители, материалы и услуги, затраты на оплату труда.

Расчет представлен в Приложении 2.

### 3.4. Результаты исследования

Коэффициенты экологической эффективности получились 0,003 и 0,004 у первой и второй технологий соответственно. Показатель лучше у технологии сжигания, применяемой сейчас на ЮЗОС, однако, следует учесть, что сравниваемый показатель лучше лишь благодаря дорогостоящей многоступенчатой газоочистке. При осуществлении сжигания ОСВ в слое катализатора газоочистка не применяется, так как удовлетворяет требованиям ПДВ. Тогда, если сравнивать коэффициенты экологической эффективности до газоочистки, то получится 0,03 против 0,004, что делает каталитическое сжигание более экологически эффективным методом.

Экономическая эффективность также выше у технологии каталитического сжигания, так как более дешева в постройке, эксплуатации и позволяет предотвратить попадания в атмосферу большего объема эмиссии в год, так как в процессе не образуется продуктов неполного сгорания.

Сравнивая полученные данные из проведенных расчетов, можно сделать вывод об экологической и экономической эффективности технологии сжигания ОСВ в псевдоожиженном слое катализатора, в частности в условиях внедрения технологии на ЮЗОС г. Санкт-Петербурга. Так как 90% комплектующих технологии производится в России, что позволит уменьшить и капитальные, и эксплуатационные затраты. В то время как технологические составляющие технологии на ЮЗОС на 90% иностранные.

Большое количество качественного оборудования и грамотный инженерный проект внедрения технологии помогут осуществить переход на новую технологию сжигания с наименьшими финансовыми потерями, а также улучшить качество дымовых газов и как следствие уменьшить вредное воздействия на местность.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Утилизация осадка сточных вод - очень важный этап в процессе очистки стоков. Необезвреженный осадок может содержать соли тяжелых металлов, патогенно опасные организмы и интенсивно гниющую органику. Депонирование осадка на иловых полях, использующееся как основной метод борьбы с ОСВ во многих городах России, является наименее эффективным и прогрессивным решением из-за ограниченности земельных ресурсов, а также интенсивного гниения органических компонентов осадка.

Метод сжигания ОСВ - наиболее эффективный метод утилизации осадка. Во время горения вся органическая часть сгорает, а минеральная превращается в обезвреженный отход - золу. Существуют разные виды сжигания осадка: в многоподовых печах, в печах с псевдоожиженным слоем инертного материала (песка), каталитическое сжигание. Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки, однако, наиболее перспективный и экологически чистый метод - сжигание в псевдоожиженном слое катализатора. Засчет окисления на поверхности катализатора, процесс горения происходит без открытого пламени, при относительно небольших температурах ( $500-700^{\circ}\text{C}$ ), что позволяет протекать процессу без образования продуктов неполного сгорания. Также каталитическое сжигание может проходить в автотермическом режиме без ввода дополнительного топлива, не требует больших габаритов установок и большой металлоемкости.

В результате проведенного исследования мною был изучен и проанализирован основной состав осадка сточных вод, способы его образования и методы переработки; на базе описания и сравнения нескольких технологий сжигания осадка предположительно выявлена

самая эффективная - технология каталитического сжигания; описан и проиллюстрирован технологический процесс очистки сточных вод и утилизации осадка на ЮЗОС г. Санкт-Петербурга; сделано эколого-экономическое обоснование существующей на ЮЗОС технологии сжигания ОСВ и технологии каталитического сжигания; математически доказано экологическое и экономическое преимущество технологии каталитического сжигания осадка.

Гипотеза, сформулированная в начале ВКР, доказана. Для ЮЗОС предложен переход на более эффективную технологию сжигания ОСВ. Даны контакты для связи с Институтом катализа СО РАН им. Борескова для разработки индивидуального проекта внедрения новой технологии сжигания осадка. В последующей магистерской деятельности исследования будут продолжаться и углубляться.

## Список используемых источников

1. Хисамеева Л.Р., Селюгин А.С., Абитов Р.Н., Бусарев А.В., Урмитова Н.С. Обработка осадков городских сточных вод: учебное пособие / Л.Р. Хисамеева, А.С. Селюгин, Р.Н. Абитов, А.В. Бусарев, Н.С. Урмитова. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2016. – 105 с.
2. Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод: учебник для вузов / Ю.В. Воронов, С.В. Яковлев. – М.: Изд-во АСВ, 2008. – 704 с.
3. Евилевич А. З. Осадки сточных вод. Издательство литературы по строительству. Ленинград — Москва, 1965.
4. СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. – Введ. 01.01.2013. – М.: Минрегион России, 2012. – 97 с.
5. Алексеев В.И. Проектирование сооружений переработки и утилизации осадков сточных вод с использованием элементов компьютерных информационных технологий: учебное пособие / В.И. Алексеев, Т.Е. Винокуров, Е.А. Пугачев. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 176 с.
6. Канализация населенных мест и промышленных предприятий: Справочник проектировщика / под ред. В.Н. Самохина. – М.: Стройиздат, 1981. – 629 с.
7. Белов С.В., Барбинов Ф.А., Козьяков А.Ф., Павлихин Г.П. Охрана окружающей среды, Москва: 'Высшая школа', 1983 - с.264
8. Ветошкин А.Г. Теоретические основы защиты окружающей среды: Учебное пособие. - Пенза: Изд-во ПГАСА, 2002. - 290 с.
9. Доскина, Э. П. Обработка и утилизация осадков городских сточных вод: учебник / Э. П. Доскина, А. В. Москвичева, Е. В. Москвичева,

- А. А. Геращенко; М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. техн. ун-т. — Волгоград: ВолгГТУ, 2018. — 184, [2] с.
10. Кипящего слоя печь // Новый политехнический словарь / А. Ю. Ишлинский. — Москва: Большая Российская энциклопедия, 2000. — С. 218.
  11. Янин Е.П. Сжигание осадков городских сточных вод (проблемы и способы) // Ресурсосберегающие технологии, 2006, No 24, с. 3–29.
  12. Васильева А.В., Харламова М.Д. Современные способы переработки осадков сточных вод и перспективы их использования в России // Sciences of Europe. 2016. №9. С. 27-33.
  13. Симонов А. Д., Чуб О. В., Языков Н. А. Каталитическое сжигание осадков сточных вод коммунального хозяйства // Химия в интересах устойчивого развития 2010. N 18. С. 749-753.
  14. Каталитическое окисление [Электронный ресурс] // URL: <https://condorchem.com/ru/каталитическое-окисление/> (дата обращения 14.01.2022).
  15. Информация, полученная в ходе прохождения преддипломной практики, а также предоставленная старшим мастером участка обеспечения производства ЮЗОС Санкт-Петербурга Петровой Натальей Петровной.
  16. Регламент очистки сточных вод и обработки осадка ЮЗОС.
  17. Информация, полученная в ходе прохождения преддипломной практики, а также предоставленная технологом завода сжигания осадка ЮЗОС Санкт-Петербурга Михайловой Ольгой Сергеевной.
  18. Регламент цеха обработки и сжигания осадка ЮЗОС.
  19. Ключников В. Ю. О сжигании отходов. Научно-практический журнал «Экология Производства» № 2, 2012 г.

20. ТОО ИТС 9-2015 "Обезвреживание отходов термическим способом (сжигание отходов)"
21. ГОСТ Р 54097—2010. Ресурсосбережение. Наилучшие доступные технологии. Методология идентификации.
22. Савруков Н.Т., Закиров Ш. М. Организация производства: конспект лекций. - СПб. - Изд-во "Лань", 2002 г. , С. 183.
23. Страус В., Промышленная очистка газов: Пер. с англ. - М., Химия, 1981 г., 182 С.
24. Боресков Г. К. Гетерогенный катализ. — М.: Наука, 1986.
25. Пармон В. Н., Симонов А. Д., Садыков В. А. Каталитическое сжигание: достижения и проблемы // Физика горения и взрыва, 2015, т. 51, №2, С. 5-13.
26. Справочник нефтехимика. В двух томах. Т. 1 / Под ред. С.К. Огородникова - Л.: Химия, 1978. - 358 С.
27. Кафаров В.В. Принципы создания безотходных химических производств. - М.: Химия, 1982. 143 С.
28. Катализаторы [Электронный ресурс] // URL: <https://neftegaz.ru/tech-library/pererabotka-nefti-i-gaza/147532-katalizatory/> (дата обращения: 22.03.22)
29. РАН [Электронный ресурс] // URL: <http://www.ras.ru/digest/showdnews.aspx?id=3d297d0f-94e8-43bc-aae6-b825db336c9d&print=1> (дата обращения: 22.03.22)
30. УК Росводоканал [Электронный ресурс] // URL: [https://www.akm.ru/press/rosvodokanal\\_zapustil\\_v\\_omske\\_kataliticheskuyu\\_ustanovku\\_szhiganiya\\_osadka/](https://www.akm.ru/press/rosvodokanal_zapustil_v_omske_kataliticheskuyu_ustanovku_szhiganiya_osadka/) (дата обращения: 22.03.22)
31. Симонов А. Д. , Языков Н. А. , Дубинин Ю. В. Каталитический теплогенератор. Патент на полезную модель. RU 195265 U1

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1 РАСЧЕТ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ ОСАДКА В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ ПЕСКА

По результатам исследования по определению массы загрязняющих веществ до газоочистки вышло следующее:

- 1) Объем вышедшего газа за время отбора проб (20 минут) составил 4762,8 м<sup>3</sup>
- 2) Концентрации ЗВ (макс) составили:
  - Сера диоксид - 700 мг/м<sup>3</sup>
  - Фтористые газообразные соединения - 0,54 мг/м<sup>3</sup>
  - Взвешенные частицы пыли - 360 мг/м<sup>3</sup>
  - Алюминий - 0,71 мг/м<sup>3</sup>
  - Ванадий (в пересчете на ванадия пентоксид) - 0,0015 мг/м<sup>3</sup>
  - Железо - 0,75 мг/м<sup>3</sup>
  - Кальций оксид - 1,0 мг/м<sup>3</sup>
  - Кадмий оксид - 0,0013 мг/м<sup>3</sup>
  - Магний оксид - 0,36 мг/м<sup>3</sup>
  - Марганец оксид - 0,016 мг/м<sup>3</sup>
  - Медь - 0,0061 мг/м<sup>3</sup>
  - Никель (в пересчете на оксид) - <0,0005 мг/м<sup>3</sup>
  - Свинец - 0,0012 мг/м<sup>3</sup>
  - Ртуть - <0,00017 мг/м<sup>3</sup>
  - Хром (в пересчете на хрома 6 оксид) - 0,0020 мг/м<sup>3</sup>
  - Цинк - 0,027 мг/м<sup>3</sup>
  - Барий - 0,012 мг/м<sup>3</sup>
  - Кобальт оксид - 0,00038 мг/м<sup>3</sup>
  - Сурьма - <0,001 мг/м<sup>3</sup>

- Мышьяк -  $<0,0005 \text{ мг/м}^3$
- 3) Зная объем вышедшего газа и концентрации ЗВ, можно рассчитать массу ЗВ:
- Сера диоксид - 3333,96 г
  - Фтористые газообразные соединения - 2,57 г
  - Взвешенные частицы пыли - 1714,608 г
  - Алюминий - 3,38 г
  - Ванадий (в пересчете на ванадия пентокись) - 0,007 г
  - Железо - 3,5721 г
  - Кальций оксид - 4,76 г
  - Кадмий оксид - 0,0062 г
  - Магний оксид - 1,715 г
  - Марганец оксид - 0,008 г
  - Медь - 0,029 г
  - Никель (в пересчете на оксид) -  $<0,002 \text{ г}$
  - Свинец - 0,0057 г
  - Ртуть -  $<0,0008 \text{ г}$
  - Хром (в пересчете на хрома 6 оксид) - 0,0095 г
  - Цинк - 0,129 г
  - Барий - 0,057 г
  - Кобальт оксид - 0,0018 г
  - Сурьма -  $<0,004 \text{ г}$
  - Мышьяк -  $<0,002 \text{ г}$
- 4) Следовательно, общая масса загрязняющих веществ равна 5064,8271 г или 5,65 кг.

- 5) Зная количество образующейся золы (обезвреженный осадок) в месяц (примерно 400 т), можем рассчитать ее количество, образующееся за время нашего исследования - 185,12 кг.
- 6) Тогда отношение массы загрязняющих веществ до очистки к количеству обезвреженного отхода будет равно  $5,65/185,12 = 0,03$ .

Концентрации загрязняющих веществ в дымовых газах по результатам контроля соблюдения нормативов предельно-допустимых выбросов, выполненные ЗАО «ЦИКВ» для ЗСО приведены в таблице 2:

ТАБЛИЦА 2. Концентрации ЗВ в дымовых газах

Наименование показателей	Ед. изм.	Гарантированные значения (Директива 2000/76/ЕС от 04.12.2000 г.)	Фактическое значение
Пыль	мг/Нм <sup>3</sup>	≤10	8,6
Углерода оксид СО	мг/Нм <sup>3</sup>	≤50	≤1
Гидрохлорид НСl	мг/Нм <sup>3</sup>	≤10	<0,25
Фтористый водород HF	мг/Нм <sup>3</sup>	≤1	0,06
Серы диоксид SO <sub>2</sub>	мг/Нм <sup>3</sup>	≤50	42
Кадмий и таллий Cd+Tl	мг/Нм <sup>3</sup>	≤0,05	0,002
Ртуть Hg	мг/Нм <sup>3</sup>	≤0,05	<0,0003
Сумма металлов Sb+Pb+Cr+Mn+Ni+As+V +Cu+Co	мг/Нм <sup>3</sup>	≤0,5	0,19
Оксиды азота NO+NO <sub>2</sub>	мг/Нм <sup>3</sup>	≤200	63,1
Диоксины (в пересчете на 2,3,7,8- тетрахлордibenзо- 1,4-диоксин)	мг/Нм <sup>3</sup>	≤1,0E-7	1,96E-10

- 1) Таким же образом, как и с веществами до газоочистки, рассчитаем их массу:
- Взвешенные частицы - 40,96 г
  - Серы диоксид - 200 г
  - Оксид углерода - <4,76 г

- Гидрохлорид - <1,19 г
  - Фтористый водород - 0,29 г
  - Кадмий и таллий - 0,001 г
  - Ртуть - <0,0014 г
  - Сумма металлов Sb+Pb+Cr+Mn+Ni+As+V+Cu+Co – 0,904 г
  - Оксиды азота NO+NO<sub>2</sub> – 300 г
  - Диоксины (в пересчете на 2,3,7,8-тетрахлордибензо-1,4-диоксин) - 9Е-8 г
- 2) Общая масса ЗВ после очистки равна 0,548 кг

Следовательно отношение массы ЗВ после очистки к массе обезвреженных отходов (золе) =  $0,548/185,12 = 0,003$

Общая стоимость капитальных затрат на строительство ЗСО составила € 29831000, что по курсу 2007 г. равно 1073916000 руб.

Эксплуатационные затраты на ЗСО состоят из затрат на ремонт оборудования, закупку реагентов и их транспортировку и фонд оплаты труда.

Обычно затраты на ремонт оборудования ежегодно достигают 17—26% его первоначальной стоимости [24], и если взять средние 22%, то это составит 236261520 руб/год без учета инфляции.

Актуальные цены на реагенты, используемые в процессе сжигания осадка, представлены в таблице 3:

ТАБЛИЦА 3. Актуальные цены на реагенты

Реагент	Цена, руб./т
NaOH 42%	44000
NaCl	29000
Аминаты ПК-2	4160000
Песок кварцевый	56000
CaCO <sub>3</sub>	14000

Расход реагентов:

- NaOH – 87,6 т/год (3854400 руб/год)
- NaCl – 18,25 т/год (529350 руб/год)
- ПК-2 – 1,095 т/год (4555200 руб/год)
- Песок кварцевый - 2,847 т/год (159432 руб/год)
- CaCO<sub>3</sub> – 113,15 т/год (15841100 руб/год)

Суммарные затраты на реагенты в год - 24939482 руб/год. Затраты на транспортировку примем равными 15% от стоимости реагентов - 3740922 руб/год.

Фонд оплаты труда на 53 сотрудника ЗСО ежегодно составляет около 24000000 руб.

Итого общие годовые затраты ЗСО равны 264963924 руб/год. Ежегодно используемая технология сжигания помогает предотвратить попадание в атмосферу вместе с отходящими газами 134 т ЗВ. Тогда экономическая эффективность технологии равна:

Экономическая эффективность = Годовые затраты, руб/Сокращение эмиссий, т/год = 264963924 руб/134 т/год = 1977342

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2 РАСЧЕТ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО СЖИГАНИЯ ОСАДКА

1. По данным реальных выбросов из таблицы 4 рассчитывается количество загрязняющих веществ, вышедших за время отбора пробы (20 минут):

- Hg – 1,296 г.
- HCl – 168 г.
- SO<sub>3</sub> – 432 г.
- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0,6 г.
- NO<sub>x</sub> – 360 г.

2. Тогда общая масса загрязняющих веществ составит 0,961 кг.

3. Так как зольность исследуемого осадка составляла 62,5%, а за 20 минут исследования образуется 333 кг осадка по сухому веществу, то количество обезвреженного осадка будет равно 208,125 кг.

4. Следовательно, отношение массы ЗВ к обезвреженному осадку =  $0,961 \text{ кг} / 208,125 \text{ кг} = 0,004$

По данным УК Водоканал в г. Омск [30], капитальное строительство одного завода сжигания осадка с установкой каталитического сжигание обойдется в 400000000 рублей. С учетом потребности на ЮЗОС более производительной установки, к сумме добавится 50%, итого: 600000000 рублей.

Эксплуатационные затраты состоят из затрат на ремонт оборудования, закупку катализаторов, транспортировку катализаторов и обезвреженных отходов и фонд оплаты труда.

Так как оборудование менее дорогостоящее и более износостойкое, чем использующееся сейчас, то процент на ремонтные затраты составит минимальные 17% и будет равняться 102000000 рублей.

Цена на алюмомеднохромовый катализатор ИК-12-70  $\text{Cr}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$  (хромит меди на оксиде алюминия) составляет 500000 рублей/тонна.

Для перфорированных труб диаметром 30 мм с размером перфорационных отверстий 1-1,5 мм, расположенных в реакторе, загрузка катализатором составит 9,2 л.

При имеющемся количестве поступающих осадков расход катализатора будет составлять 1 т/год [31].

Тогда цена на закупку катализатора в год составит 450000 рублей.

Затраты на транспортировку примем равными 15% от стоимости - 67500 руб/год.

Фонд оплаты труда на 53 сотрудника ЗСО ежегодно составляет около 24000000 руб.

Итого годовые затраты на обслуживание технологии равны 126517500 руб. Ежегодно такая технология сжигания поможет предотвратить попадание в атмосферу вместе с отходящими газами 148 т ЗВ. Тогда экономическая эффективность технологии равна:

Экономическая эффективность = Годовые затраты, руб/Сокращение эмиссий, т/год =  $126517500 \text{ руб}/148 \text{ т/год} = 854847$