

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт химии и энергетики

(наименование института полностью)

Кафедра «Химическая технология и ресурсосбережение»

(наименование кафедры полностью)

18.03.02 Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии,
нефтехимии и биотехнологии

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Рациональное природопользование, рециклинг и утилизация отходов

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему: «Специфика очистки сточных вод в арктическо-умеренной зоне».

Обучающаяся

Э. Э. Амергалиева

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Кандидат химических наук, доцент

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

С. А. Соков

Тольятти 2025

Аннотация

Выпускную квалификационную работу выполнила: Э.Э. Амергалиева

Тема работы: «Специфика очистки сточных вод в арктическо-умеренной зоне».

Научный руководитель: преподаватель кафедры «Химическая технология и ресурсосбережение» С.А. Соков

Выпускная квалификационная работа содержит 68 с., 10 таблиц, 14 рисунков, 45 литературных источников.

Ключевые слова: сточные воды, методы очистки сточных вод, вечная мерзлота, озон, ультрафиолетовое облучение, фито-системы, высшие растения.

Объектом исследования являются сточные воды очистных сооружений г. Снежногорска Мурманской области, расположенного в арктическо-умеренной зоне.

Выпускная квалификационная работа состоит из трех основных разделов, содержания, введения, заключения и списка используемых источников. Работа посвящена проектированию очистных сооружений в г. Снежногорске. Дана оценка существующей системе очистки канализационных вод и ее эффективности.

Abstract

The graduate qualification work was carried out by: E.E. Amergalieva

Theme of work: “Specificity of wastewater treatment in the Arctic - temperate zone”.

Supervisor: teacher of the department of “Chemical Technology and Resource Saving” S. A. Sokov

The graduate qualification work contains 68 p., 10 tables, 14 figures, 45 literary sources.

Key words: wastewater, methods of wastewater treatment, permafrost, ozone, ultraviolet irradiation, phyto-systems, higher plants.

The object of the study is wastewater treatment facilities of Snezhnogorsk, Murmansk region, located in the Arctic - temperate zone.

The graduate qualification work consists of three main sections, content, introduction, conclusion and a list of sources used. The work is devoted to the design of sewage treatment facilities in Snezhnogorsk. The existing system of sewage water treatment and its efficiency is evaluated.

Содержание

Перечень обозначений и сокращений.....	5
Введение.....	6
1 Теоретическая часть.....	9
1.1 Климатические особенности в арктическо-умеренной зоне.....	9
1.2 Отечественный опыт очистки сточных вод в Арктике.....	14
1.3 Анализ основных технологических процессов очистки сточных вод и их аппаратурное оформление.....	15
1.4 Недостатки традиционных технологий водоподготовки в арктическо - умеренной зоне.....	19
2 Анализ процессов обеззараживания сточных вод.....	22
2.1 Физико–химические методы очистки сточных вод.....	22
2.1.1 Механические методы.....	24
2.1.2 Метод УФ обеззараживания.....	27
2.1.3 Ультразвуковой метод.....	28
2.2 Химические методы очистки сточных вод.....	29
2.2.1 Метод хлорирования.....	29
2.2.2 Метод озонирования.....	30
2.3 Комбинированный метод обеззараживания	35
2.4 Применение фито-систем для очистки сточных вод	37
3 Разработка технологической схемы СВ в условиях климата арктическо- умеренной зоны.....	49
3.1 Расчет фито-очистных сооружений.....	52
3.2 Технико-экономическое обоснование применения ФОС.....	58
Заключение.....	61
Список используемых источников.....	63

Перечень обозначений и сокращений

БПК – биологическая потребность в кислороде

ГСВ - городские сточные воды

БПК₅ - биологическое потребление кислорода за 5 суток

ЗВ - загрязняющее вещество

ЗСО - зона санитарной охраны источников питьевого водоснабжения

ИАИ - избыточный активный ил

ИТС – информационно-технический справочник

КОС – канализационные очистные сооружения

НДТ - наилучшие доступные технологии

ОС - окружающая (природная) среда

ОСВ - осадки сточных вод

ОВС - озono-воздушная смесь

ПАВ - поверхностно-активные вещества

ПДВ - предельно-допустимый выброс

ПДСВ – предельное допустимое содержание веществ

СанПиН - санитарные правила и нормы

СВ – сточные воды

СВО - сухое вещество осадка

СОСВ – станция очистки сточных вод

УФО – ультрафиолетовое облучение

ФОС – фито-очистные сооружения

ХПК – химическая потребность в кислороде

Введение

Оценка состояния водных ресурсов и их использования становится все более важной с точки зрения экологических и социально-экономических аспектов.

Большая часть территории Российской Федерации расположена в арктическом и субарктическом климате, что накладывает определённые требования на проектирование, строительство и эксплуатацию систем водоотведения. Вопрос очистки сточных вод в этих регионах становится всё более актуальным с каждым годом.

«Сброс недостаточно очищенных сточных вод загрязняет водные ресурсы, что ведёт к негативным последствиям для здоровья людей, снижению биоразнообразия и другим проблемам. По данным Федерального агентства водных ресурсов России, только 10-11% сточных вод в стране очищаются в соответствии с установленными нормами, около 72% сбрасываются в водоёмы без достаточной очистки, а 17% остаются совершенно неочищенными. Инфраструктура многих очистных сооружений устарела, применяемые технологии очистки не всегда соответствуют современным требованиям (особенно в малых и средних населённых пунктах), а некоторые регионы вообще не имеют очистных станций» [26].

Развитие Арктики связано с использованием природных ресурсов. Однако хозяйственная деятельность часто проводится без учета особенностей работы природных систем, специфических требований по охране окружающей среды и научно обоснованных норм для региона. Основными факторами, влияющими на проблемы водоснабжения на Севере, являются «вечная мерзлота», жесткие климатические условия и продолжительная зима. Ключевыми факторами, определяющими основные проблемы водоснабжения на Севере, являются «вечная мерзлота», суровый климат и длительный зимний период [8], [11], [18].

«В «Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» [24] намечены инвестиционные проекты по разведке и добыче полезных ископаемых, направленные на социально-экономическое развитие страны. В этой связи важное значение имеет развитие методов регулирования природопользования при промышленном освоении Арктики» [24]. Создание механизмов адаптации различных секторов экономики в Арктике связывают с доступностью водных ресурсов.

«Значительные исследования ведутся сегодня по разработкам аффективных физико-химических методов очистки сточных вод, которые более просты и надежны в эксплуатации в северном климате» [8], [18], [33], [32]. «В качестве основных окислительных технологий можно выделить: озонирование плюс пероксид водорода (возможно в присутствии катализатора); процесс Фентона; электрохимические методы окисления (электрокоагуляция, электрофлотация); озонирование плюс ультрафиолетовое излучение и др» [14], [7].

«На сегодняшний день большая часть малых населенных пунктов в этих регионах либо не оборудованы канализационными очистными сооружениями, либо действующие станции биологической очистки работают неудовлетворительно. Для очистки бытовых стоков малых и средних поселений, а также ливневых и сельскохозяйственных сточных вод предлагается технология фито-очистных систем (ФОС) – поверхностных или подземных водотоков искусственного происхождения, засаженных высшей водной растительностью (англ. – «constructed wetlands»)» [26]. «Эта технология была разработана в середине XX века и в настоящее время активно используется по всему миру – существуют десятки тысяч подобных систем в Европе, Америке, Азии, Африке, Австралии и других странах» [35], [38].

«В России фито-очистные системы пока не получили широкого признания, хотя процессы самоочищения, лежащие в их основе, являются

предметом интереса российских учёных уже многие десятилетия, на что указывают многочисленные научные публикации» [26], [37]-[44].

Проблеме очистки сточных вод в Арктике уделено недостаточно внимания в силу недавнего ее возникновения. С увеличением населения и развитием промышленности в арктических регионах возрастет нагрузка на системы водоотведения, что потребует модернизации существующих очистных сооружений и строительства новых.

Целью работы является снижение негативного влияния на окружающую среду хозяйственно-бытовых стоков г. Снежногорска Мурманской области путем разработки технологической схемы с применением современных и эффективных методов очистки и обеззараживания сточных вод.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- обосновать обеззараживания сточных вод для сооружений невысокой производительности применение ФОС с учетом требований к системам очистки сточных вод в Арктике;
- совершенствовать технологию биологической очистки с функционированием фито-очистных систем открытого типа;
- разработать оптимальную технологическую схему для установки очистки сточных вод в Арктике с применением новых технических решений;
- оценить эффективность обеззараживания в ФОС по условно патогенным микроорганизмам.

1 Теоретическая часть

1.1 Климатические особенности в арктическо-умеренной зоне

На Крайнем Севере России живет чуть больше 11,5 миллионов человек в более чем 400 населенных пунктах на площади около 12 миллионов квадратных километров это примерно 70% от общей территории России [1], [16].

На рисунке 1 приведена карта Российской Арктики.

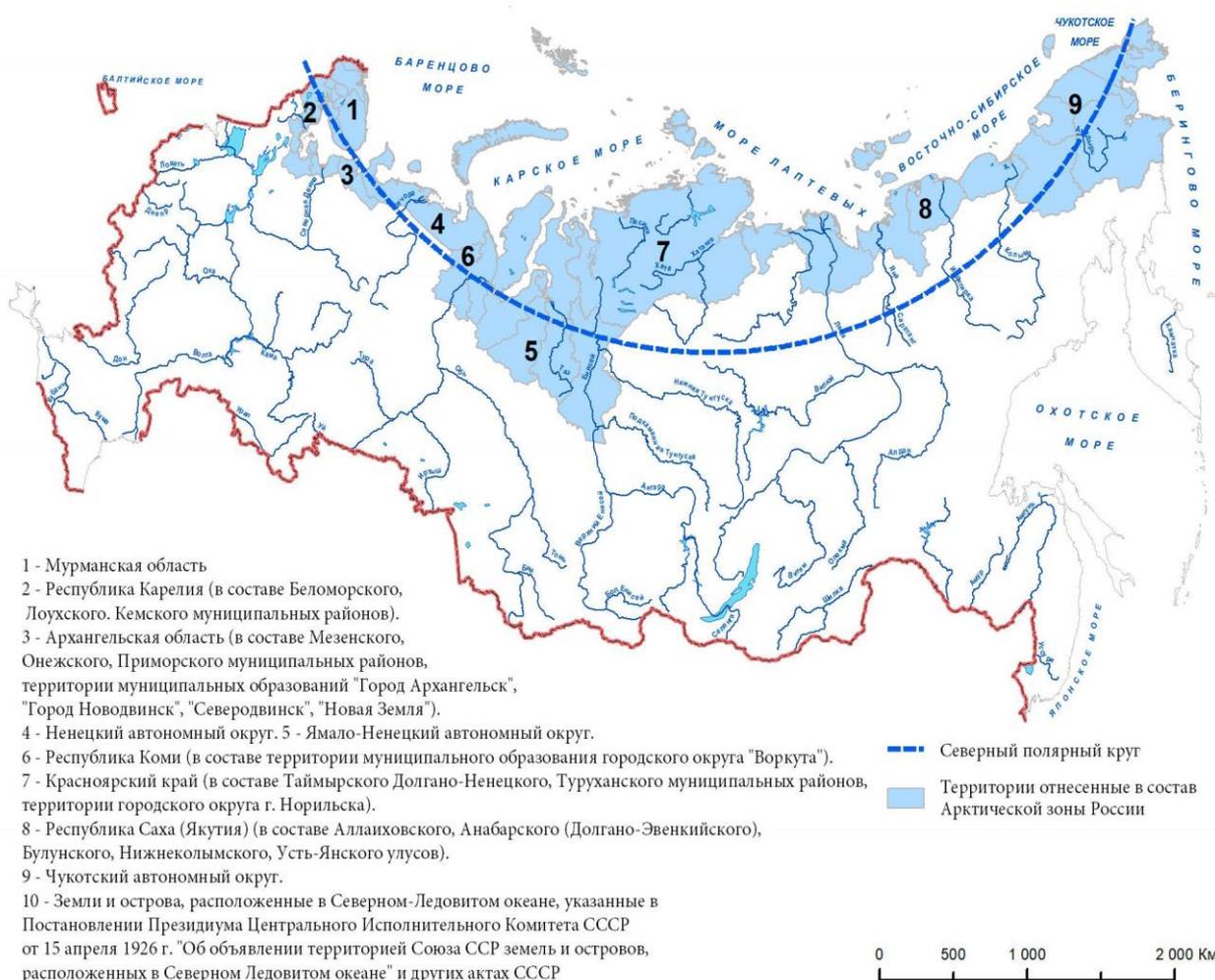


Рисунок 1 - Карта Российской Арктики

Арктическо-умеренная зона, охватывающая северные части Европы, Азии и Северной Америки, характеризуется уникальными климатическими особенностями. Приведем основные из них:

- в арктической зоне наблюдаются значительные сезонные колебания температур. Лето короткое и прохладное, а зимы длинные и суровые. В умеренной части Арктики температуры более стабильны и мягче;
- в арктических регионах летом наблюдается полярный день, когда солнце не заходит за горизонт, а зимой - полярная ночь, когда солнце не поднимается над горизонтом. Это явление влияет на экосистемы и биологические ритмы животных и растений;
- в арктической зоне осадки, как правило, низкие, что делает её похожей на пустыню, однако в умеренной части осадков больше, и они распределены более равномерно в течение года. В основном осадки приходят в виде снега зимой и дождя летом;
- Арктика подвержена сильным ветрам, особенно в зимний период. Это может приводить к образованию снежных бурь и метелей;
- в арктической зоне встречаются два основных типа экосистем: тундра (в северной части) и тайга (в южной части). Тундра характеризуется низкорослой растительностью и вечной мерзлотой, тогда как тайга состоит из хвойных лесов и обладает более разнообразной флорой и фауной;
- океаны играют важную роль в климате арктической зоны. Теплые течения могут смягчать климат на побережьях, тогда как удаленные внутренние районы могут быть значительно холоднее.

Важнейшей особенностью Арктической зоны является также наличие обширных водных ресурсов, представленных крупными речными бассейнами. Эти реки не только составляют ресурсную базу региона, но и

оказывают прямое влияние на экологическую ситуацию, климат, а также на состояние арктической флоры и фауны.

Арктика испытывает более интенсивные изменения климата по сравнению с остальным миром. Потепление приводит к таянию ледников, изменению экосистем и увеличению частоты экстремальных погодных явлений.

Климат Мурманской области субарктический морской, имеющий многие черты континентального. Зима длительная, но не суровая, лето короткое и прохладное. Средняя многолетняя температура воздуха наиболее холодного месяца (февраль) от минус 6 до минус 14 °С, самого теплого месяца (июль) от плюс 9 до плюс 15 °С. В северной части области преобладает тундровая растительность, тогда как южные районы характеризуются тайгой. Это разнообразие растительности связано с изменением климатических условий.

Более 85% всех случаев выявленного высокого уровня загрязнения и экстремально высокого уровня загрязнения поверхностных вод Арктической зоны Российской Федерации приходится на водные объекты Мурманской области. «В 2020 году в регионе было зафиксировано 170 случаев высокого уровня загрязнения и 106 случаев экстремально высокого загрязнения по 15 компонентам на 27 водных объектах, что на 36% превышает показатели предыдущего года. Во всех случаях это связано с загрязнением поверхностных вод соединениями тяжелых металлов: меди – 581 ПДК; молибдена - 173 ПДК; железа общ. -109 ПДК; никеля – 106 ПДК; марганца – 68; ртути – 17 ПДК» [30].

Город Снежногорск, имеет своеобразный климат, который определяется множеством факторов. Метеорологический режим Снежногорска формируется под влиянием атмосферных перепадов и близкого расположения к Белому морю. Климат Снежногорска отличается холодными зимами и прохладными летами. Зима здесь суровая, с достаточным количеством снега и морозов. Частыми явлениями зимнего

климата являются метели и сильные ветры. Летом в Снежногорске нет крайней жары, температура воздуха обычно держится на уровне плюс 22 °С (рисунок 2), дни в основном теплые и ясные, осенью и весной – переменчивая погода с частыми осадками.

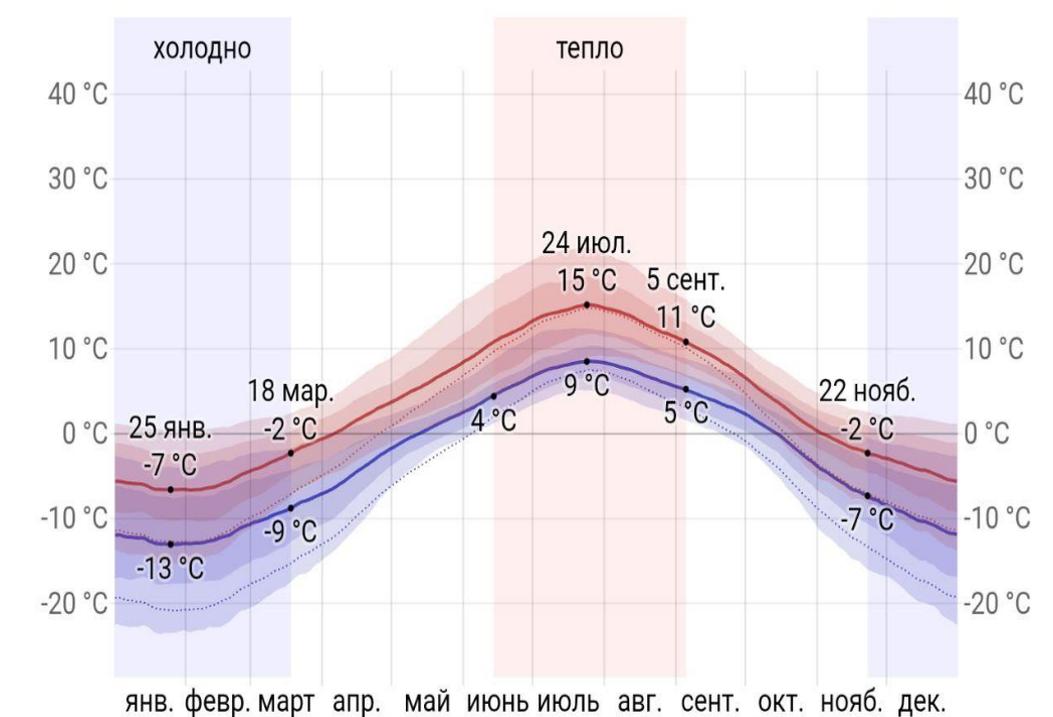


Рисунок 2 – Средняя максимальная и минимальная температура в Снежногорске [45]

Эти климатические особенности влияют на образ жизни местного населения и экосистему региона. Численность населения: 10134 чел. (по состоянию на 2025 год).

«Основные промышленные предприятия: полярный хлебозавод филиал ОАО "Хлебопек" (производство пищевых продуктов); СРЗ "Нерпа"; 10-й СРЗ; ООО "Ксилема+"(военный судоремонт и судостроение, гражданский судоремонт и судостроение, утилизация атомных подводных лодок и судов специального назначения и др.)» [24]. Снежногорские хозяйственно-бытовые стоки по самотечному коллектору поступают на канализационные очистные

сооружения механической очистки. Их производительность составляет четыре тысячи кубометров в сутки. Очищенные сточные воды сбрасываются в ручей Безымянный, а потом - в бухту Кут Кольского залива [18], [26].

«Крупнейшее озеро Арно в окрестностях города Снежногорска, расположено к юго-западу от города. Озеро расположено на высоте 57 м над уровнем моря. Площадь водоёма составляет 3,28 км². Из озера в южном направлении вытекает река Белокаменка, которая впадает в Кольский залив Баренцева моря. В озере обитает пресноводная рыба, которая на икрометание идёт в ручьи и реки. В озере проживают около 9 видов рыб: кумжа, голец, паляя, сиг и другие» [24].

«Воздействие человека на водоём за последние годы заметно снизило численность ценных рыб — кумжи, палии, сига и других» [24].

Цианобактерии, или сине-зеленые водоросли, могут развиваться в водоемах Арктики по нескольким причинам:

- потепление климата: изменения климата приводят к повышению температуры воды, что создает более благоприятные условия для роста цианобактерий;
- увеличение солнечного света, что способствует фотосинтезу и размножению цианобактерий;
- увеличение источников питательных веществ, такие как азот и фосфор, которые могут поступать в водоемы через стоки сточных вод, дождь или таяние снега и др.;
- в условиях изменения климата и экосистем могут снижаться популяции других водных организмов, что позволяет цианобактериям занимать доминирующее положение;
- цианобактерии имеют высокую адаптивность к различным условиям среды, включая низкие температуры и высокие уровни ультрафиолетового излучения, что позволяет им выживать и размножаться в экстремальных условиях Арктики.

Эти и другие факторы в совокупности способствуют увеличению численности цианобактерий в арктических водоемах, поэтому важнейшей задачей очистных сооружений является снижение концентраций азота, фосфора и других загрязняющих веществ.

В последние годы в России уделяется внимание модернизации инфраструктуры, включая системы водоснабжения и канализации. В рамках федерального проекта «Модернизация коммунальной инфраструктуры» нацпроекта «Инфраструктура для жизни» в период с 2025 по 2027 год запланировано провести модернизацию очистных сооружений Мурманска и Снежногорска [4].

1.2 Отечественный опыт очистки сточных вод в Арктике

В России разработаны и применяются различные технологии и подходы к очистке сточных вод в арктических условиях, которые приведены ниже.

Механическая очистка. На начальном этапе сточные воды проходят механическую фильтрацию, которая удаляет крупные частицы и загрязнения, что позволяет уменьшить нагрузку на последующие стадии очистки.

Биологическая очистка. В процессе используются микроорганизмы для разложения органических веществ. В условиях Арктики применяются специальные технологии, адаптированные к низким температурам, а также используются активный ил и биопруды.

Физико-химическая очистка, которая включает процессы коагуляции, флокуляции и осаждения, которые помогают удалить растворенные вещества и тяжелые металлы.

Системы замкнутого цикла. В некоторых арктических населенных пунктах внедряются системы замкнутого цикла, которые позволяют повторно использовать очищенные сточные воды для технических нужд, что особенно актуально в условиях дефицита водных ресурсов [19].

Применение различных технологий очистки сточных вод способствуют минимизировать негативное воздействие на окружающую среду и способствуют сохранению экосистемы Арктики [20].

1.3 Анализ основных технологических процессов очистки сточных вод и их аппаратурное оформление

«Согласно сведениям Росводресурсов каждый год в водные объекты России сбрасывается до 52 км³ сточных вод, из которых 19 км³ сбрасывается без очистки. При этом предприятия минерально-сырьевого комплекса дают вклад 25% от общего объема сбрасываемых без очистки сточных вод» [24].

«Действующие городские очистные сооружения промышленных и ливневых сточных вод были запроектированы много лет назад, когда требования к очищенной воде по нефтепродуктам и взвешенным веществам были ниже действующих нормативов. Технологические блоки рассчитывались под количественные и качественные характеристики сточных вод, а производственные мощности таких станций (сооружений) соответствовали реализации технологических процессов и достижению степени очистки сточных вод до нужных требований тех времен» [9], [34].

«За время многолетней эксплуатации очистных сооружений состав сточных вод претерпел изменения, а технологическая система очистки осталась прежней» [6]. «Решение задачи экологизации систем водоотведения напрямую связано с необходимостью ретехнологизации большинства очистных сооружений канализации, построенных в 20 веке» [3].

«Произошло расширение перечня контролируемых показателей качества воды со стороны регулирующих органов с ужесточением существующих нормативов подготовки питьевой воды:

- введение в действие СанПиН 1.2.3685-21 "Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания";

- «низкая эффективность применяемых («традиционных») технологий для очистки воды в современных экологических условиях;
- тенденция повышения антропогенной нагрузки на источники водоснабжения;
- физический износ существующих сооружений привели к необходимости поиска и разработки новых технологических решений в области водоподготовки» [14].

Можно отметить, что наряду с основными недостатками и нарушениями эксплуатации очистных сооружений «наблюдаются и проблемы организационного характера» [14].

Поверхностные и подземные воды представляют собой основные источники водных ресурсов для промышленных и бытовых нужд. В подземных источниках содержится больше пресной воды, чем в реках и озёрах. Вода из поверхностных источников используется в промышленности, сельском хозяйстве и для бытовых нужд.

В зависимости от условий образования сточные воды подразделяют на три основные категории: хозяйственно-бытовые; промышленные; атмосферные (ливневые), соотношение которых в сточных водах зависит от географического расположения региона, численности жителей, наличия промышленных предприятий и др.

Технологическая система очистки сточных вод (ОСОС) включает в себя комплекс процессов и оборудования, предназначенных для удаления загрязняющих веществ из сточных вод, чтобы сделать их безопасными для сброса в природные водоемы или для повторного использования. Основные компоненты и этапы такой системы могут быть следующими:

Сбор и предварительная обработка. Система сбора включает:

- канализационные сети: трубопроводы для транспортировки сточных вод к очистным сооружениям.

Предварительная обработка включает:

- решетки и решеточные установки: удаление крупных твердых частиц (мусор, листья);
- отстойники: удаление осадков и взвешенных частиц путем осаждения.

Дробление и измельчение:

- удаление крупных объектов, таких как пластик и стекло.

2. Основная очистка включает:

- биологическая очистка: аэрационные установки (использование активного ила для разложения органических веществ в присутствии кислорода);
- биофильтры: применение биопленок на носителях для удаления органики;
- химическая очистка;
- коагуляция и флотация (добавление коагулянтов для связывания мелких частиц и их удаления);
- дезинфекция: уничтожение патогенных микроорганизмов с помощью хлора, озона или УФ-обработки.

3. Завершающая очистка.

Фильтрация: песчаные и угольные фильтры (удаление оставшихся взвешенных частиц и коллоидов);

Обезвреживание осадков: депонирование или переработка осадков (компостирование, сушка или сжигание осадков, образующихся в процессе очистки).

4. Контроль качества или мониторинг (оценка состояния и закономерности изменения состава сточных и природных вод):

- аналитические приборы: (постоянный контроль параметров сточных вод: рН, содержание органики, мутность на различных этапах очистки);

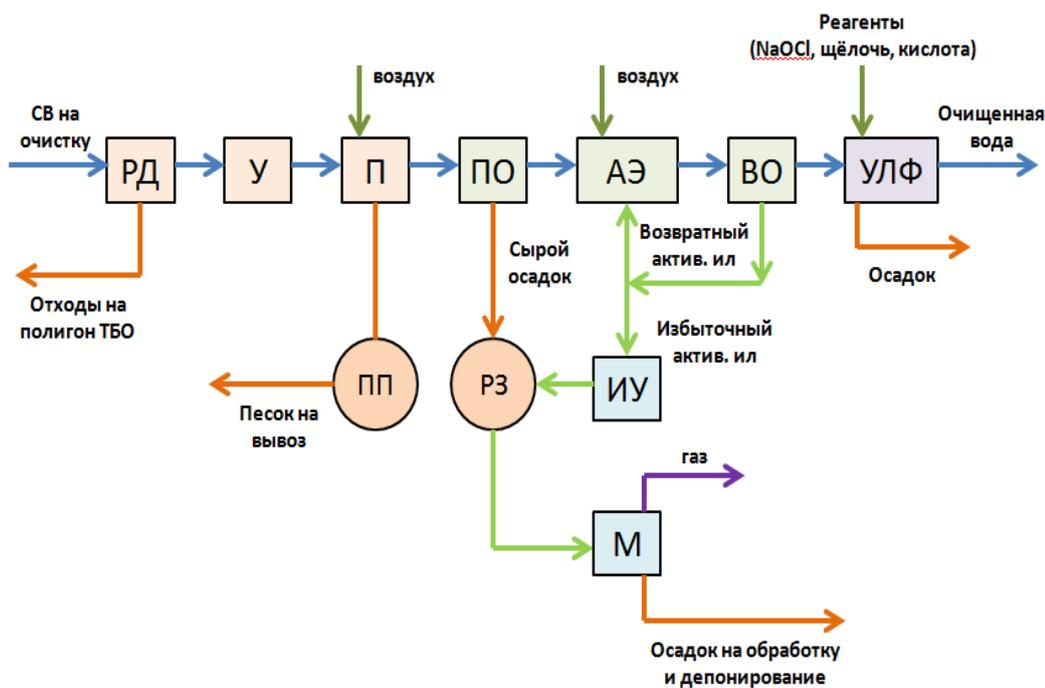
- автоматизированные системы управления: (для управления процессами очистки и обеспечения их эффективности).

5. Утилизация очищенной воды:

- сброс в водоемы: очищенные сточные воды могут сбрасываться в реки, озера или другие водоемы, при этом они должны соответствовать установленным нормам;
- повторное использование: очищенные воды могут использоваться для технических нужд (полив, промышленные процессы) или даже для питьевых нужд после дополнительной обработки.

Принципиальная схема очистки сточных вод представлена на рисунке

3:



СВ – сточная вода; РД – решётки-дробилки; У – усреднитель; П – аэрируемая песколовка; ПП – песковая площадка; ПО – первичный отстойник; РЗ – резервуар сырого осадка и активного ила; АЭ – аэротенк; ИУ – илоуплотнитель; М – метантенк; ВО – вторичный отстойник; УЛФ – блок ультрафильтрации

Рисунок 3 – Принципиальная схема очистки сточных вод

Технологическая система очистки сточных вод в Арктике должна быть адаптирована к конкретным условиям эксплуатации и требованиям к качеству очищенной воды. Эффективность технологической системы зависит от правильного выбора технологий и метода процесса очистки СВ.

1.4 Недостатки традиционных технологий водоподготовки в арктическо - умеренной зоне

Традиционные технологии водоподготовки в арктическо-умеренной зоне могут сталкиваться с рядом недостатков, связанных с особенностями климата, экосистем и инфраструктуры. Например, в условиях низких температур традиционные процессы, такие как коагуляция и флотация, могут быть менее эффективными. Замерзание воды может также повредить оборудование.

В отдаленных и труднодоступных регионах арктической зоны может быть сложно обеспечить поставку необходимых реагентов для водоподготовки и проводить регулярное обслуживание оборудования. В условиях сурового климата оборудование может подвергаться большему износу и коррозии, что требует частого ремонта и замены.

Эти недостатки подчеркивают необходимость разработки и внедрения более адаптированных и устойчивых технологий водоподготовки для арктическо-умеренной зоны

Традиционные методы могут быть недостаточно эффективными по следующим причинам:

- такие процессы как обратный осмос или ультрафиолетовая дезинфекция, требуют значительных энергетических ресурсов; использование химических реагентов (например, хлора, коагулянтов) может быть дорогим, а также требует правильного хранения и обращения;

- образование отходов т.к. процессы механической и биологической очистки приводят к образованию осадков, которые требуют дальнейшей утилизации;
- химические отходы - использование химических реагентов может привести к образованию токсичных отходов;
- зависимость от условий эксплуатации: традиционные технологии могут быть неэффективными при изменении характеристик исходной воды (например, при изменении уровня загрязнения);
- невозможность адаптации к различным условиям: традиционные системы могут не быть универсальными при значительных изменениях для работы с различными источниками воды;
- существующие установки могут быть трудны для модернизации с целью внедрения новых технологий или улучшения эффективности;
- неправильная технология утилизация осадков или химических реагентов влечет загрязнение почвы и водоемов;
- выброс очищенных сточных вод без должной дезинфекции может негативно сказаться на экосистемах водоемов.

Эти недостатки подчеркивают необходимость разработки и внедрения более адаптированных и устойчивых технологий водоподготовки для арктическо-умеренной зоны [22].

«В исследовании указано, что, согласно данным Госсанэпиднадзора России, около 50% населения страны вынуждено использовать воду ненадлежащего качества для питья и бытовых нужд. Исследования, проведенные в начале 90-х годов, показали, что 12-13% проб воды из городских водопроводов не соответствовали бактериологическим стандартам, и половина из них представляла эпидемиологическую опасность»[14], [28], [34].

Хлорирование воды является широко распространенным методом дезинфекции в РФ, применяемым для уничтожения патогенных

микроорганизмов. Однако в ходе этого процесса могут возникать галогенорганические соединения, многие из которых обладают мутагенными и канцерогенными свойствами. Хотя большинство из них содержится в воде в «следовых» концентрациях, их длительное употребление может представлять опасность для здоровья человека.

Во многих странах для дезинфекции воды и используется озон (O_3), который является эффективным средством в различных системах водоснабжения, обладающий рядом преимуществ по сравнению с хлорированием.

Таким образом, несмотря на то что традиционные технологии водоподготовки остаются широко используемыми, их недостатки подчеркивают необходимость поиска более эффективных методов очистки воды.

Фито-системы могут быть эффективными и устойчивыми альтернативами традиционным методам биологической очистки. Далее рассмотрим основные аспекты применения фито-систем в условиях арктическо-умеренной зоны.

2 Анализ процессов обеззараживания сточных вод

2.1 Физико–химические методы очистки сточных вод

Физико-химические методы очистки сточных вод представляют собой совокупность процессов, основанных на физических и химических взаимодействиях, которые позволяют удалять загрязняющие вещества из воды. Эти методы часто используются в комбинации с биологическими процессами для достижения более высокой степени очистки. Физико-химическая очистка более устойчива к суровому климату и залповым сбросам стоков, чем биологическая очистка. В качестве основных ступеней очистки используют коагуляцию и флокуляцию, флотацию, фильтрование, окисление с последующей двухступенчатой доочисткой на механических и сорбционных фильтрах.

«В небольших населенных пунктах, расположенных в районах Крайнего Севера или приравненных к ним условиях, биологическая очистка сточных вод является сложно реализуемым процессом в связи с суровыми климатическими условиями, неравномерностью подачи стоков на очистку, сложностью эксплуатации, отсутствием квалифицированного персонала и другими причинами. Опубликованные исследования отечественных и зарубежных ученых подтверждают возможность полной замены биологического этапа очистки стоков на физико-химические методы: коагуляцию, окисление и др., что не противоречит действующим нормативам СП 32.13330.2018» [5], [21].

Из-за сложного состава сточных вод при их очистке используются комбинации различных методов в сочетании с механическими, биологическими и химическими способами очистки. Во всех случаях первой стадией является механическая очистка, способствующая удалению взвешенных частиц. К новым подходам к очистке сточных вод можно отнести такие методы как фотокаталитический метод, который основывается

на применении катализаторов из полупроводниковых материалов; гальванокоагуляцию; обработки водных растворов неорганических и органических веществ плазмой тлеющего разряда и др. «В последние годы ученые проявляют особый интерес к явлению кавитации и ее применению в водоочистке, так как многие исследования подтвердили, что кавитационные эффекты воздействуют на микроорганизмы, присутствующие в воде» [2].

Классификация методов очистки сточных и соответствующих им технологий приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация методов очистки производственных сточных вод

Методы очистки сточных вод	Технологии
«Физические (механические)	Процеживание и отстаивание
	Удаление всплывающих примесей
	Удаление взвешенных частиц под действием центробежных сил (осаждение в гидроциклонах, центрифугирование и др.)
	Удаление твердых взвешенных веществ фильтрованием (фильтрование через зернистый слой, через фильтрующие и мембранные перегородки и др.)» [14]
«Химические	Нейтрализация сточных вод и перевод ионов тяжелых металлов в малорастворимое состояние (реагентная нейтрализация сточных вод, перевод ионов тяжелых металлов в малорастворимое состояние, фильтрование кислых сточных вод и др.)
	Окисление примесей сточных вод с использованием газообразного и сжиженного хлора, диоксида хлора, хлорной извести, гипохлоритов натрия, перманганата калия, перекиси водорода, кислорода воздуха, озона, пиролюзита и др.»[14]
	Восстановление примесей сточных вод
«Физико-химические	Коагуляция
	Флокуляция
	Флотация
	Адсорбция и ионный обмен
	Экстракция
	Термические методы очистки и обезвреживания сточных вод (окисление, выпаривание, огневое обезвреживание и др.)» [14]
«Электрохимические	Электрохимическое окисление и восстановление
	Электрокоагуляция
	Электрофлотация
	Другое
Биологические методы очистки сточных вод	Аэрационная очистка сточных вод в биологических реакторах с активным илом
	Очистка сточных вод на биофильтрах» [14]

Рассмотрим современные методы очистки сточных вод.

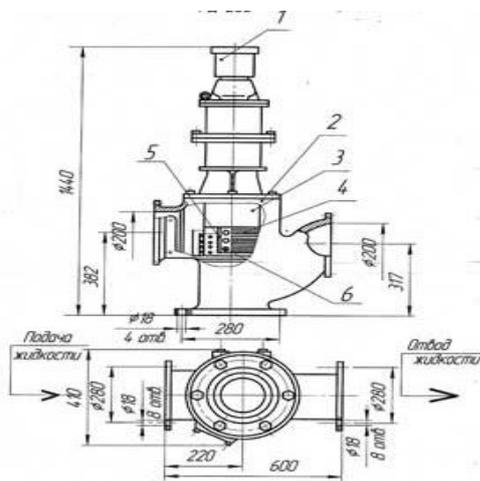
2.1.1 Механические методы

Механическая очистка предназначена для удаления из сточных вод нерастворенных, органических и минеральных загрязнений. Для механической очистки применяются решетки, усреднители, песколовки, отстойники разных типов.

Решетки применяются для задерживания из сточных вод крупных загрязнений и являются сооружениями, подготовляющими сточные воды к дальнейшей, более полной очистке. Отбросы, образовавшиеся на решетках, либо дробятся и направляются с остальными осадками очистных сооружений для совместной переработки, либо вывозятся в специальные места, где осуществляется обработка промышленных и твердых бытовых отходов [10].

Решетки подразделяются на неподвижные, подвижные и совмещенные с дробилками (решетки-дробилки).

Решетки-дробилки состоят из следующих основных частей: барабана, корпуса, подвески и приводного механизма (рисунок 4):



1 – приводной механизм; 2 – корпус; 3 – подвеска; 4 – барабан; 5 – планка;
6 – резец

Рисунок 4 – Решётка-дробилка РД-200

Сточная жидкость с содержащимися в ней отбросами поступает из подводящего канала в специальную камеру, где установлена решетка-дробилка, и попадает на вращающийся барабан со щелевыми отверстиями. Мелкая фракция отбросов вместе со сточной жидкостью проходит через щели внутрь барабана и попадает в отводящий канал. Задержанные барабаном крупные части отбросов по ходу вращения барабана перемещаются к трепальному гребню и выводятся через отводящий трубопровод.

Пропускная способность решеток-дробилок приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Пропускная способность решеток-дробилок

Марка	РД-100	РД-200	РД-400	РД-600
Максимальная пропускная способность, м ³ /час	30	60	420	2000

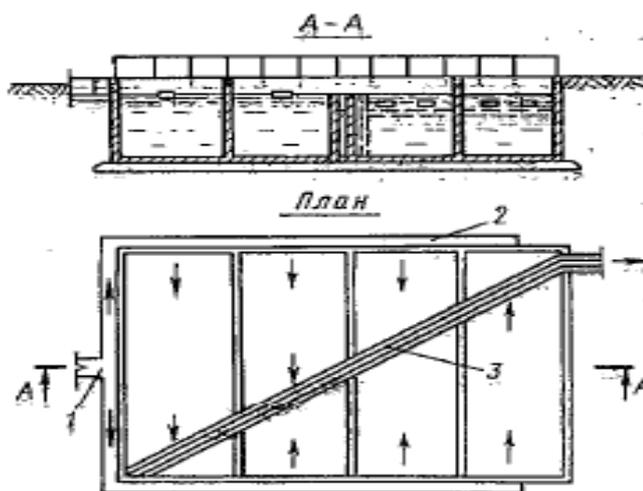
Для обеспечения нормальной работы очистных сооружений необходимо усреднение поступающих сточных вод по концентрации загрязняющих веществ или по расходу воды, а иногда и по обоим показателям одновременно. В зависимости от этих требований назначается тип усреднителя.

В настоящее время применяется в основном усреднители, действующие по принципу дифференцирования потока (конструкции ВНИИ ВОДГЕО), и усреднители с перемешиванием поступающей жидкости сжатым воздухом.

Принцип работы усреднителя с дифференцированием потока сточной воды следующий: сточная вода через окна, расположенные в распределительных лотках, поступает в коридоры усреднители и собирается затем в диагональный сборный лоток. Эффект усреднения по концентрации

достигается в этом случае за счёт разного времени добегания отдельных порций сточной воды к сборному лотку.

Усреднитель включает в себя подводящий лоток, распределительный лоток постоянного сечения и сборный лоток (рисунок 5).



1 – подводящий лоток; 2 – распределительный лоток; 3 – сборный лоток

Рисунок 5 – Усреднитель конструкции ВНИИ ВОДГЕО

Песколовки – сооружения, предназначенные для выделения из сточных вод механических примесей минерального происхождения, главным образом песка. Их применение является обязательным. Песколовки устанавливаются перед первичными отстойниками.

Аэрируемые пескоуловители имеют более сложную конструкцию – оснащены постоянно действующими аэраторами, гидромеханической системой смыва осадка в бункер, гидроэлеваторами, песковым блоком, задвижками и затворами. Отличаются удлиненной конструкцией, напоминающей параллелепипед, и близким к эллиптическому поперечному сечению.

Основные размеры аэрируемых песколовков приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Пропускная способность аэрируемых песколовок

Номер типового проекта	902-2-27 №1	902-2-27 №2	902-2-27 №3	902-2-27 №8
Пропускная способность м ³ /сут	1400-2700	2700-4200	4200-7000	40000-64000

2.1.2 Метод УФ обеззараживания

Ультрафиолетовое обеззараживание сточных вод — это современный и экологически безопасный метод дезинфекции, который активно используется во многих очистных сооружениях.

Обеззараживание сточных вод с помощью ультрафиолетового облучения осуществляется в специальных установках, где контакт сточных вод с УФ-лучами происходит в камерах, специально предназначенных для этой цели. Внутри камер размещаются УФ-лампы, которые излучают ультрафиолетовое излучение. Эти камеры сконструированы таким образом, чтобы обеспечить максимальное время контакта сточных вод с УФ-излучением. УФ-лампы помещаются в прочные кварцевые чехлы. Кварц позволяет ультрафиолетовому свету проходить, при этом защищая лампы от воздействия воды и предотвращая их загрязнение. Когда сточные воды проходят через камеры, они подвергаются воздействию УФ-излучения.

Эффект обеззараживания достигается благодаря воздействию ультрафиолетовых лучей с длиной волны от 200 до 300 нм на белковые коллоиды и ферменты в протоплазме микробных клеток. Сточные воды, которые подлежат ультрафиолетовой очистке, должны обладать достаточной прозрачностью, поскольку в загрязненных водах интенсивность проникновения УФ-лучей быстро снижается, что ограничивает применение УФ-установок для дезинфекции сточных вод. Обеззараживание происходит благодаря фотохимическому воздействию ультрафиолетовой бактерицидной энергии, излучаемой специальными лампами, на бактерии. Это приводит к

разрушению ДНК и РНК микроорганизмов, что делает их неспособными к размножению и вызывает их гибель.

Влияние УФ-установок на сточные воды зависит от типа ламп. В настоящее время наиболее эффективными и надежными в эксплуатации являются установки ультрафиолетового обеззараживания НПО «Лит», разработанные специально для обеззараживания сточных вод.

2.1.3 Ультразвуковой метод очистки

Ультразвуковой метод очистки сточных вод основан на использовании ультразвуковых волн для разрушения загрязняющих веществ и микробных клеток в воде. В сочетании с другими методами очистки, такими как биологическая или химическая обработка, ультразвук может значительно повысить общую эффективность очистки сточных вод.

Сущность метода заключается в следующем. Ультразвуковые устройства генерируют звуковые волны с частотой выше 20 кГц, что превышает предел слышимости человека. Эти волны создают механические колебания в жидкости. При определенной интенсивности ультразвука в жидкости возникают пузырьки, которые быстро образуются и разрушаются (явление кавитации). Этот процесс создает локальные области высоких температур и давлений, что приводит к разрушению загрязняющих веществ.

Метод не требует применения химических реагентов, что снижает риск образования токсичных побочных продуктов. Ультразвуковые установки компактны и легко интегрируемы в существующие системы очистки.

Однако для генерации ультразвука требуется энергия, что может увеличить эксплуатационные расходы. В некоторых случаях ультразвук может быть менее эффективен для удаления тяжелых металлов, органических соединений или питательных веществ (азота и фосфора).

Эффективность метода может зависеть от параметров воды, таких как температура, состав и уровень загрязнения.

Важно контролировать скорость потока сточных вод через УФ-реактор, чтобы обеспечить достаточное время воздействия излучения на все микроорганизмы.

2.2 Химические методы очистки сточных вод

2.2.1 Метод хлорирования

Физические методы обработки считаются более безопасными для окружающей среды и имеют преимущества с точки зрения затрат. Однако следует учитывать, что микроорганизмы могут развивать устойчивость к таким воздействиям.

Химические методы очистки сточных вод представляют собой технологии, использующие химические реакции для удаления загрязняющих веществ. Эти методы могут быть эффективными для обработки различных типов сточных вод, включая промышленные, бытовые и сельскохозяйственные [12].

Хлорирование — это один из самых распространенных методов дезинфекции воды, который используется для уничтожения патогенных микроорганизмов и обеспечения безопасности питьевой воды.

Хлоратор — это устройство, предназначенное для добавления хлора или его соединений в воду с целью дезинфекции. Оно используется в системах водоснабжения, бассейнах и других объектах, где требуется обработка воды для уничтожения патогенных микроорганизмов.

Основные типы хлораторов:

- газовые хлораторы: используют газообразный хлор, что обеспечивает высокую степень дезинфекции;
- хлораторы с использованием гипохлорита натрия;
- хлораторы с использованием кальция.

«В процессе обработки воды хлорсодержащими реагентами происходит окисление, приводящее к галогенированию и трансформации

вредных веществ, что неизбежно ведёт к образованию новых, более токсичных соединений» [14].

«Запроектированные и построенные десятилетия назад по типовым проектам с применением «традиционной» технологии подготовки питьевой воды (реагентная обработка с последующим отстаиванием, фильтрованием и хлорированием) эти сооружения были рассчитаны на извлечение из воды лишь загрязнений природного характера и в современных условиях не в состоянии обеспечивать ужесточившиеся требования к качеству питьевой воды» [15].

«Перечень химических веществ, образующихся в ходе обработки природных вод хлором, весьма обширен и включает не только тригалогенметаны (хлороформ, бромдихлорметан, дибромхлорметан и бромформ), но и другие летучие галогенпроизводные углеводородов (четырёххлористый углерод, дихлорэтан, ди-, три- и тетрахлорэтилен и др.), а также широкий спектр нелетучих и ограниченно-летучих соединений» [14].

Далее рассмотрим «методы очистки воды, которые в современных условиях обеспечивают соблюдение нормативных требований к качеству питьевой воды и не причиняют вреда населению и окружающей среде» [14].

2.2.2 Метод озонирования

«Озонирование является универсальным методом обработки, позволяющим эффективно воздействовать на большое число различных загрязнителей искусственного и естественного происхождения с одновременным обеззараживанием. При этом физиологическая полноценность воды (а именно солевой состав), обработанной озоном, сохраняется (что не всегда можно сказать о воде, обработанной при помощи осмотических, обратноосмотических, ионообменных и мембранных технологий)» [14].

«Технология очистки воды с использованием озонсорбции, которая включает озонирование и последующую фильтрацию через активированные угли, обеспечивает следующие преимущества» [14]:

- «снижение цветности и повышение прозрачности воды за счет разложения органических веществ;
- улучшение органолептических характеристик воды благодаря удалению привкусов и запахов, вызванных минеральными и органическими соединениями;
- эффективное удаление металлов, включая тяжелые металлы, а также надежное обезжелезивание и деманганация;
- окисление и разложение фенолов, азотсодержащих соединений (аммиака, нитратов, нитритов), сероводорода и цианидов;
- окисление и разложение поверхностно-активных веществ и нефтепродуктов;
- существенное улучшение показателей окисляемости общего органического углерода (ООУ) и растворенного органического углерода (РОУ) благодаря высокой окислительной способности;
- обеззараживание воды в случае бактериального загрязнения патогенными микроорганизмами, вирусами и цистами лямблий, которые устойчивы к хлорсодержащим реагентам;
- надежность работы сооружений водоподготовки благодаря локальному производству озона на месте его использования, что исключает необходимость транспортировки реагентов»[14].

«В последнее время появилась опасность загрязнения воды относительно новыми загрязнителями сложными химическими и/или биологическими веществами, возникающими при производстве гормональных лекарственных и косметических препаратов. Попадая в источники водоснабжения со сточными водами фармацевтических и косметологических производств, они транзитом проходят очистные сооружения и станции водоподготовки и оказываются в питьевой воде, в дальнейшем способствуя появлению устойчивых штаммов микроорганизмов» [14].

Для достижения соответствия «качества воды установленным стандартам применяются различные методы дезинфекции. Эффективность наиболее распространенных из них в отношении различных патогенов, упомянутых выше, представлена в таблице 4» [14].

Таблица 4 – «Эффективность воздействия на патогены методов дезинфекции» [14]

Дезинфектант	Бактерии	Вирусы	Протозоа	Общий рейтинг
Свободный хлор	Очень хорошо	Очень хорошо	Плохо	Хорошо
Хлорамин 2	Плохо	Плохо	Очень плохо	Плохо
Диоксид хлора	Хорошо	Очень хорошо	Плохо	Хорошо
Озон	Очень хорошо	Очень хорошо	Очень хорошо	Очень хорошо
Ультрафиолет	Очень хорошо	Плохо	Хорошо	Хорошо

Анализ данных свидетельствует, что озон является одним из наиболее эффективных дезинфектантов. Его высокая окислительная способность позволяет эффективно уничтожать широкий спектр патогенов, включая бактерии, вирусы и грибки. В отличие от некоторых других методов, озон не оставляет вредных остатков и разлагается в воде, что делает его безопасным для окружающей среды.

«Можно отметить высокую эффективность озона при воздействии на микроорганизмы: споры, амёбы, вирусы, различные микробы и прочее. На рисунке 6 показано влияние озона на гибель бактерий *Esherichia coli* по сравнению с влиянием хлора.

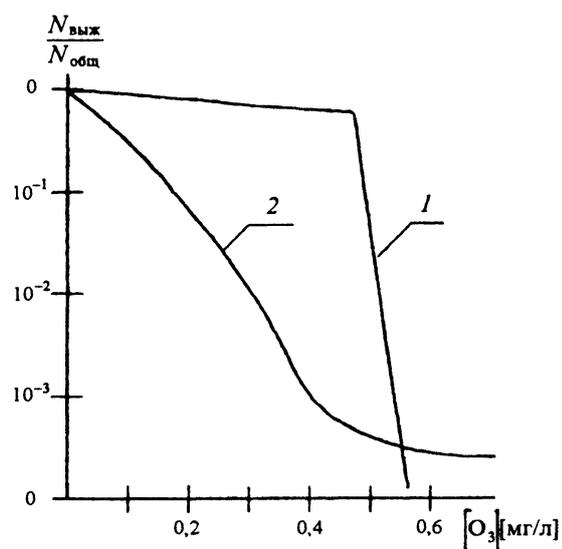


Рисунок 6- Выживаемость микроорганизмов в озонированной (1) и хлорированной (2) воде [17]

При малых концентрациях влияние озона незначительно, зато, начиная с некоторой критической точки, он полностью подавляет этот тип бактерий, в то время как хлор все еще оставляет незначительную их часть невредимыми. Концентрация 0,5-1мг/л критическая в случае очистки не только от бактерий, но и от химических примесей» [17] (таблица 5).

Таблица 5 - «Сравнение технологий очистки воды. Окислительные свойства» [14]

«Технология	Окислительные свойства		
	Общее действие	Особенности и ограничения	Особые свойства и требования»[14]
«Озонирование	Очень сильный окислитель	Быстрое окисление марганца и железа	Разрушает органические соединения (фенолы)» [14]
«УФ-облучение	Не обладает окислительными свойствами		
Хлорирование	Окислитель	Медленное окисление марганца и железа	Разрушает органические соединения (фенолы)» [14]

Продолжение таблицы 5

«Технология	Окислительные свойства		
	Общее действие	Особенности и ограничения	Особые свойства и требования»[14]
«Мембраны (ультрафильтрация, обратный осмос)	Не обладают окислительными свойствами	Особые требования по содержанию марганца, железа и окислителей в исходной воде, обрастание и возможность повреждения при высоком их содержании	Особые требования по содержанию органические соединения (фенолов)» [14]
«Засыпные фильтры	Не обладают окислительными свойствами	Удаляют двухвалентное железо (окисленное) из воды, но при высоких концентрациях быстро снижается эффективность работы, требуется часиная промывка	Не задерживают» [14]

Несмотря на свои преимущества, таких как высокая эффективность дезинфекции и отсутствие вредных остатков, технология озонирования в России не получила широкого распространения и носит лишь единичный характер.

«Анализ данных, представленные в таблицах, показал, что озон имеет ряд очевидных преимуществ. Учитывая рост экологических и вирусологических проблем, его использование будет только возрастать. Это подтверждается информацией Международной ассоциации по озону: более 1700 станций водоподготовки в Европе и свыше 5000 по всему миру применяют озон в технологиях очистки питьевой воды, и этот рынок продолжает расти» [14].

За последние 15-20 лет бактерии и вирусы стали в шесть раз более устойчивыми к хлорированию и в четыре раза к ультрафиолетовому облучению, что подтверждают научные исследования. Поэтому для повышения эффективности борьбы с бактериями можно использовать комбинацию различных методов обеззараживания сточных вод.

2.3 Комбинированный метод обеззараживания

Комбинированный метод обеззараживания воды, который включает озонирование и ультрафиолетовое (УФ) облучение, представляет собой эффективный подход к очистке воды от патогенных микроорганизмов и других загрязняющих веществ.

Рассмотрим подробнее каждый из этих методов и их взаимодействие (таблица 6).

Озонирование. Озонирование основано на использовании озона (O₃) как мощного окислителя. Он эффективно уничтожает бактерии, вирусы, грибки и другие микроорганизмы, разрушая их клеточные стенки и генетический материал.

Таблице 6 - Преимущества и недостатки технологий УФО и озонирования

Преимущества и Недостатки	УФО	Озон
Преимущества	Безреагентный и безопасный способ обеззараживания	Прекрасно осветляет воду, улучшает её качество, делает прозрачной
	Прост в установке и эксплуатации	Можно контролировать эффективность, регулируя количество озона
	Нейтрализует до 99% патогенных микроорганизмов	Эффективен против практически всех бактерий и вирусов

Продолжение таблицы 6

Преимущества	УФО	Озон
Преимущества	Не изменяет химический состав воды	Озон генерируется на месте, не требует транспортировки и хранения
	Сравнительно недорог в обслуживании	Разложение озона занимает 20-30 минут, после чего он превращается в кислород
Недостатки	При неправильном подборе мощности ламп снижается качество обеззараживания	Неправильное дозирование озона может быть опасно для человека и рыбы
	Требует качественной предварительной очистки, так как плохо работает в мутной воде	Необходимы специальные материалы для оборудования (полиэтилен, нержавеющая сталь)
	Нужен постоянный контроль и профилактическое обслуживание оборудования	Озонирование более дорогой способ дезинфекции по сравнению с ультрафиолетом

Преимущества: высокая эффективность в уничтожении широкого спектра патогенов; способность окислять органические и неорганические загрязнители, включая запахи и цвета; не оставляет токсичных остатков в воде, так как быстро разлагается на кислород. Недостатки: озон нестабилен и требует специального оборудования для генерации и введения в воду; может образовывать побочные продукты (например, альдегиды) при взаимодействии с органическими веществами.

Ультрафиолетовое облучение. УФ-облучение использует световые волны в диапазоне ультрафиолетового спектра (обычно 200-300 нм) для инактивации микроорганизмов. УФ-свет повреждает ДНК и РНК патогенов, что приводит к их неспособности к размножению.

Преимущества: быстрое действие; УФО может обеззараживать воду за считанные секунды; не требует добавления химических веществ и не оставляет остатков; эффективно против бактерий, вирусов и некоторых спорообразующих организмов. Недостатки УФО: неэффективен против загрязняющих веществ, таких как тяжелые металлы и некоторые

органические соединения; требует прозрачности воды - мутная вода может снижать эффективность облучения.

Комбинированный метод. Использование озонирования перед УФ-облучением позволяет улучшить качество обеззараживания сточных вод. Озон удаляет органические загрязнители, которые могут снижать эффективность УФО, тем самым повышая ее. Кроме того, озон может разрушать устойчивые к УФ-патогены и улучшать общую безопасность воды.

Преимущества комбинированного подхода.

1. Совместное использование обоих методов позволяет достичь более высокого уровня обеззараживания.

2. Комбинированный метод может эффективно уничтожать как микроорганизмы, так и органические загрязнители.

3. УФО может уменьшить количество побочных органических веществ, которые могут образовываться при озонировании.

Таким образом, комбинированный метод озонирования и ультрафиолетового облучения является современным подходом к эффективной очистке воды. Он обеспечивает высокий уровень обеззараживания, снижает вероятность образования токсичных веществ и подходит для широкого применения сточных вод как промышленных предприятий, так и жилищно-коммунальных.

2.4 Применение фито-систем для очистки сточных вод

«Фито-системы (ФОС) – это системы очистки стоков, состоящие из фильтрующей среды, засаженной высшими водными растениями, через которую протекают сточные воды. При этом поток воды через ФОС может протекать как по земной поверхности, так и под ней (через пористую загрузку с посаженными в неё болотными растениями), а направление потока может быть горизонтальным или вертикальным» [29].

«Схему строения ФОС можно представить в виде четырех основных элементов:

- 1) водупорный слой;
- 2) фильтрующий слой;
- 3) болотные растения;
- 4) устройства для равномерного распределения стоков по площади ФОС и регулирования уровня воды в ней» [29].

При необходимости можно создать ФОС небольшой производительности, которое при низком уровне загрязненности сточных вод может функционировать как единственная ступень очистки. «Однако чаще всего перед этим проводится предварительная механическая очистка сточных вод, а ФОС применяется для вторичной или третичной очистки» [27].

«В последние годы ФОС используется для очистки всех типов сточных вод, включая фильтрат полигонов твердых бытовых отходов, ливневые стоки, стоки животноводческих предприятий, промышленные стоки, шахтные воды, стоки нефтеперерабатывающих заводов, пищевой промышленности и даже избыточного осадка сточных вод и пр.» [27], [31], [3], [11] и др.

«Технологии ФОС делят на три основных типа в зависимости от местоположения гидравлической проектной линии и варианта проектирования [25].

- 1) ФОС с открытой водной поверхностью или надповерхностные ФОС – системы поверхностного потока, внешне напоминающие естественные болота. Обязательным условием является наличие открытой акватории, застойной воды, плавающей или надводной растительности, укорененной в плодородном слое на дне ФОС. Для предотвращения инфильтрации дно ФОС изолировано водонепроницаемым материалом» [26].

«Сточные воды, протекающие через ФОС, очищаются под воздействием процессов седиментации, фильтрации, адсорбции, осаждения, окисления и восстановления.

2) ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком (Horizontal subsurface flow (HSSF) wetlands) не имеют открытых акваторий и постоянного уреза воды (рисунок 7)»[26].

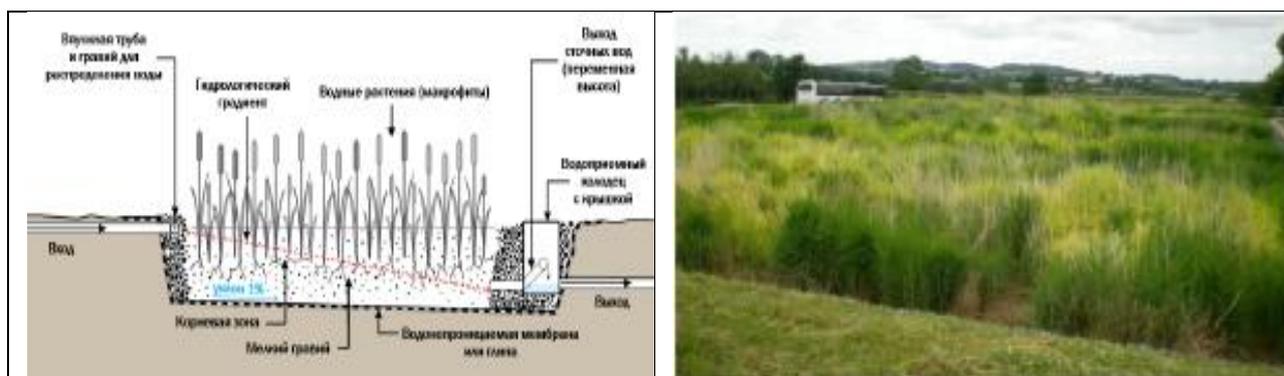


Рисунок 7– «Схема ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком»[26].

3) «ФОС с вертикальным подповерхностным потоком (Vertical flow (VF) wetlands). В таких ФОС сточные воды проходят через загрузку в вертикальном направлении (сверху вниз или снизу вверх).

Существует несколько разновидностей ФОС вертикального потока. В самой распространенной из них сточные воды подаются импульсно под напором и сначала затапливают поверхность фильтрующего материала, а затем просачивается в более глубокие слои» [26].

«Гибридные ФОС (hybrid wetlands) представляют собой комбинацию двух или более перечисленных выше типов систем с целью увеличения эффективности очистки. В настоящее время большинство гибридных систем – это сочетание зон с горизонтальным и вертикальным потоками» [26]

«Наиболее распространённым вариантом является комбинация стадии вертикального потока, за которой следует участок с горизонтальным подповерхностным потоком, что приводит к интенсификации процессов

нитрификации и денитрификации. Такие системы получили широкое распространение в европейских странах из-за строгих требований к удалению азота» [26]. «В течение последних десятилетий подобные ФОС были построены во Франции, Словении, Норвегии и др. Более поздние гибридные конфигурации включают в себя все типы ФОС, в том числе и поверхностного потока, а также системы с принудительной аэрацией.» [26].

«В России имеется ограниченный опыт использования ФОС в виде систем с открытой водной поверхностью. Их аналогами являются биоплато и габионные очистные фильтрующие сооружения (ГОФС), которые с 1997 года успешно очищают ливневые стоки. Кроме того, действует несколько экспериментальных систем ФОС. В рамках международного проекта (Россия, Финляндия, Швеция, Нидерланды) в посёлке Шонгуй Мурманской области было создано единственное в мире биоплато для очистки сточных вод за Полярным кругом [1]. В условиях низких среднегодовых температур (минус 1,5 °С) и морозных зим (до минус 53 °С) эксплуатируется несколько систем в Томской области» [26], [5].

Существование незначительного числа «ФОС в нашей стране можно объяснить следующими причинами:

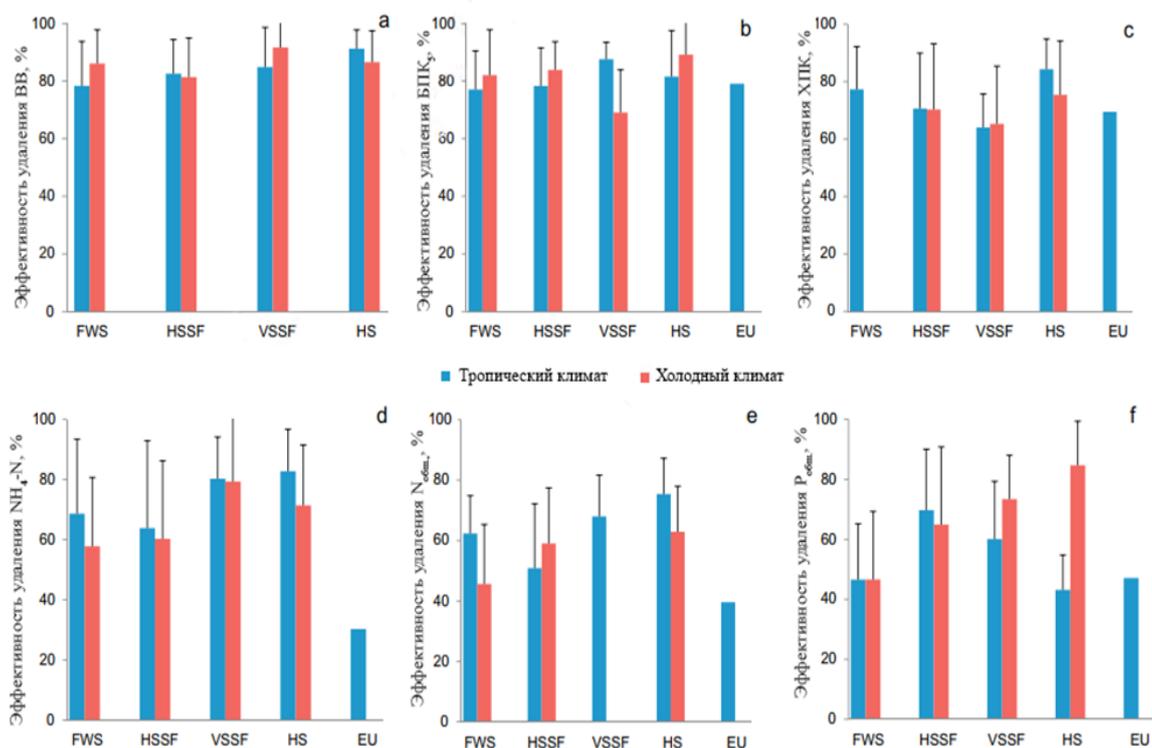
- разнообразие климатических условий, что ставит под сомнение возможность применения ФОС на всей территории, особенно в районах с холодным климатом;
- отсутствие законодательных актов, регулирующих строительство ФОС;
- нехватка адаптированных для России руководств и технических рекомендаций по проектированию ФОС, предназначенных для работы в холодных условиях;
- отсутствие расчетов экономической эффективности ФОС в России;
- недостаток опыта в проектировании, строительстве и эксплуатации таких систем;

- малое количество действующих объектов ФОС и пилотных установок;
- отсутствие федеральных или региональных программ, направленных на исследование и внедрение ФОС»[26].

«Многие процессы очистки, протекающие в ФОС (физические, химические и в особенности биологические) зависят от температуры. В условиях холодного климата в ФОС может наблюдаться замедление или остановка процессов очистки, формирование ледяного покрова на поверхности и отсутствие вегетирующей растительности. В холодный зимний период некоторые ФОС прекращают функционировать и служат лишь хранилищем стоков. Однако существуют многочисленные ФОС, работающие при температуре ниже нуля, например, в Швеции, Норвегии, Дании, Австрии, Канаде и северных штатах США. С 1996 по 2002 год в Швеции было создано более 23 км² ФОС, а в Дании до 2004 года – около 32 км²»[29].

«Климат не является единственным и решающим фактором, определяющим работу ФОС. Эффективность удаления загрязняющих веществ зависит от множества факторов (типа ФОС, природы загрузки, растительного сообщества, химического состава и характера поступления стоков, аэрации, наличия предварительной очистки и т.д). При грамотном проектировании ФОС с учетом всех перечисленных выше особенностей, зимний период не будет оказывать негативного влияния на её работу.

Сравнение эффективности фито-очистных систем, расположенных в тропических регионах и в странах с холодным климатом показало, что в некоторых случаях системы в северных странах работают даже лучше, чем в тропиках (рисунок 8)»[26], [36].



«(а), БПК5 (b), ХПК (c), аммонийного азота (d), общего азота (e) и общего фосфора (f) в ФОС в тропическом климате и в странах с холодным климатом. FWS – ФОС с открытой водной поверхностью, HSSF – ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком, VSSF – ФОС с вертикальным подповерхностным потоком, HS – гибридные ФОС, EU – страны Европейского союза»[26].

Рисунок 8 – «Эффективность удаления загрязняющих веществ»[26].

«Очевидно, использование ФОС в холодном климате накладывает ряд конструктивных ограничений, связанных с необходимостью изолировать «деятельный слой» ФОС от сезонных колебаний. В качестве изолирующей прослойки может использоваться слой снега, льда, мульчи, отмершая биомасса растений или воздушная прослойка (рисунок 9)» [26].

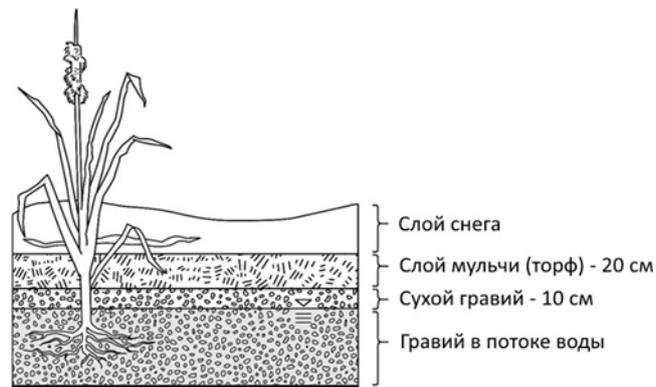


Рисунок 9 – «Вертикальная стратификация ФОС в зимний период»[26]

«Кроме того, важным вопросом функционирования ФОС с зимний период является аэрация. Снижение БПК негативно сказывается на эффективности очистки от соединений азота» [26].

«В России несколько экспериментальных систем успешно функционируют в Сибири, в условиях умеренного субарктического климата при средней температуре января минус 10 °С и абсолютном минимуме минус 39 °С (ФОС в г. Колпашево, Тогуре, Кожевниково, Молчаново, Белом Яре, Самусе, Корнилово)»[26], [5]. «Эти ФОС, спроектированные в НИИ Биологии и биофизики Томского Государственного Университета, представляют собой системы с подповерхностным горизонтальным потоком, засаженные эйхорией. Перед ледоставом уровень воды в этих ФОС искусственно повышают, а затем снова понижают, благодаря чему на поверхности ФОС образуется ледяная корка, покрытая снегом, и воздушная прослойка под ней, изолирующая поток воды от холодного атмосферного воздуха. Биохимические процессы окисления являются экзотермическими и способствуют поддержанию положительной температуры в ФОС.

Известны примеры функционирования подобных систем в арктических условиях за полярным кругом (пос. Шонгуй и Верхнетуломский, Кольский район Мурманской области) [3]. В пос. Шонгуй после механической и биологической очистки стоки поступают в гибридную ФОС, состоящую из

блока с открытой водной поверхностью (300 м²) и участка с подповерхностным потоком с гравийной загрузкой (245 м²), после чего спускаются в р. Колу. Растительная составляющая представлена макрофитами болотных экосистем севера, при этом хорошую приживаемость, рост и эффективность показали калужница арктическая (*Caltha arctica*) и осока водная (*Carex aquatilis*). В течение трёх лет наблюдений после постройки (2002 год) система демонстрировала высокую степень очистки по БПК (92-94%), взвешенным веществам (88-93%), аммонийному азоту (62-76%), фосфатам (6-36%), железу (49-58%) и т.д.

Даже в самые холодные периоды температура стоков оставалась положительной (не менее плюс 7 °С), благодаря чему система успешно функционирует круглогодично, хотя эффективность очистки летом выше, чем зимой (рисунок 10)» [7].



Рисунок 10– «ФОС в зимний период»[3]

«Таким образом, мировой опыт использования ФОС показывает, что эти системы могут успешно функционировать в условиях холодного климата, в том числе и в РФ. Очистка сточных вод от загрязнителей в ФОС осуществляется за счёт физических, химических и биологических процессов

с участием загрузки, растительности и ассоциированной с ней биоты (таблица 7)»[26].

Таблица 7– «Основные процессы трансформации и удаления загрязняющих веществ в ФОС»[26], [28]

«Загрязняющее вещество»	Процессы удаления / превращения		
	Физические	Химические	Биологические
Взвешенные вещества	Фильтрация и седиментация	Осаждение, растворение	Бактериальное разложение
Органические поллютанты (по БПК ₅ или ХПК)	Фильтрация и седиментация	Окисление	Бактериальное разложение (растворённое органическое вещество), микробное поглощение
Азот	Улетучивание	Ионный обмен	Нитрификация, денитрификация, анаммокс, поглощение биотой
Фосфор	Фильтрация	Адсорбция и осаждение	Поглощение биотой
Сера	Осаждение	Адсорбция, окисление, осаждение	Сульфатредукция, поглощение биотой
Тяжёлые металлы	Осаждение	Адсорбция и осаждение	Биодеградация, фитодергадация, поглощение растениями
Патогенная микрофлора	Фильтрация	УФ деградация, адсорбция	«Хищничество, естественная смертность» [27]

«Осадок сточных вод образуется при любой технологии очистки стоков. Объем осадка варьирует в широких пределах (0,5-30% от объема сточных вод) в зависимости от типа стоков и технологии очистки. Обработка осадка – сложный технологический процесс, требующий времени, площадей для хранения осадка и значительных затрат.»[27], [28].

«Количество осадка, образующегося в фито-очистной системе, максимально при использовании ФОС для первичной очистки стоков. Наиболее эффективное технологическое решение ФОС для первичной очистки бытовых стоков – так называемая французская система. При использовании этой технологии стоки подвергаются механической очистке

на решетках (с целью удаления крупного мусора), после чего они поступают напрямую в ФОС. Очистка осуществляется по нескольким параллельным линиям. Каждая линия состоит из двух засаженных растительностью блоков с подповерхностным вертикальным потоком, первый из которых заполнен гравием, а второй – песком» [27].

«Как правило, при очистке бытовых стоков подобным образом скорость накопления осадка невелика (1-2 см в год), и удаление осадка из системы рекомендуется производить один раз в 10-15 лет. Если же ФОС используется для вторичной или третичной очистки, то осадконакопление происходит ещё медленнее»[29], [27].

«Первый блок, называемый FRB(French Reed Bed) предназначен для очистки от взвешенных веществ, азота и органических поллютантов; на его поверхности накапливается осадок. Второй блок предназначен для более глубокой очистки, здесь фильтруются тонкодисперсные загрязняющие вещества, и завершается процесс нитрификации. Нагрузка на линии подается поочередно. Сначала сточные воды очищаются на первой линии, а через некоторое время поток перенаправляют на другую линию. В это время происходит естественное высушивание и минерализация осадка, образовавшегося на поверхности первого блока первой линии (FRB).

Аэробные условия и присутствие корневых систем растений предотвращают появление неприятного запаха в процессе минерализации осадка. Через несколько дней, когда осадок высыхает и гидравлическая проводимость первого блока восстанавливается, поток снова направляют по первой линии. В это время происходит высушивание осадка на второй линии» [29].

Количество фито-систем в мире составляет более 130-ти тысяч [36].

В таблице 8 приведены сравнительные характеристики, достоинства и недостатки методов очистки сточных вод от азотных соединений.

Таблица 8 – «Достоинства и недостатки методов очистки сточных вод от азотных соединений» [13]

Способ очистки	Достоинства	Недостатки
Физико-химические методы		
«Ионный обмен Обратный осмос Нанофильтрация Электрохимический метод	1. Высокая эффективность очистки (до 98%) 2. Нет необходимости в химических реагентах 3. Низкая зависимость от температуры окружающей среды	1. Высокие капитальные и эксплуатационные затраты 2. Образование больших объемов высококонцентрированных растворов»[13]
«Химические методы		
Озонирование Хлорирование	1. Высокая эффективность очистки (99-100%) 2. Уничтожение патогенных бактерий и вирусов наряду с процессом очистки»[13]	1. Увеличение концентрации нитратного азота пропорционально уменьшению аммонийной и нитритной форм 2. Образование высокосолёных растворов (при хлорировании) »[13]
Биологические методы		
«Нитрификация и денитрификация	1.Отсутствие неприятных запахов 2. Долгий срок службы сооружений 3. Независимость от температуры окружающей среды и состава сточных вод.	1. Образование избыточного количества активного ила 2. Высокие энергозатраты, связанные с необходимостью аэрации 3. Недостаточная производительность для очистки больших объемов сточных вод» [13]
«Анапмох-процесс (процесс анаэробного окисления аммония)	1.Уменьшение концентрации аммонийного и нитритного азота без одновременного увеличения концентрации нитратной формы 2. Экономия электроэнергии за счет отсутствия необходимости в аэрации 3. Образование меньшего количества активного ила по сравнению с аэротенками и биофильтрами	1. Необходимость контроля возраста ила и его удержания в очистном сооружении 2. Необходимость поддержания высокой концентрации ила для обеспечения эффективной очистки» [13]

Продолжение таблицы 8

Способ очистки	Достоинства	Недостатки
Биологические методы		
«Фито-очистные системы: Биоплато Биопруды Сконструированные водно-болотные угодья	1. Использование только солнечной энергии для процесса очистки 2. Отсутствие необходимости в химических реагентах 3. Отсутствие отходов, требующих утилизации и обезвреживания	1. Необходимость значительных площадей для проведения очистки 2. Эффективность очистки зависит от расхода сточных вод» [13]
«Системы микроводорослей	1. Комплексная очистка загрязняющих веществ 2. Минимизация капитальных и эксплуатационных затрат 3. Не образуется отходов, требующих утилизации или обезвреживания	1. Часть штаммов неэффективна при низких температурах» [13]

«Таким образом, анализ научной литературы показал, что ФОС способны эффективно очищать сточные воды от взвешенных частиц, органических токсикантов (включая ксенобиотики), азота, фосфора, серы, тяжелых металлов и бактериального загрязнения в условиях холодного климата» [13],[27].

3 Разработка технологической схемы СВ в условиях климата арктическо-умеренной зоны

Существующая схема очистки канализационных сточных вод г. Снежногорска представлена на рисунке 11.



Рисунок 11 – Технологическая схема очистки сточных вод

Как отмечалось ранее, в городе Снежногорск проживает 32 тыс. человек, в городе функционируют несколько градообразующих промышленных предприятий.

На очистных городских КОС отсутствуют блоки физико-химической и биологической очистки воды. Качество воды, сбрасываемой в ручей Безымянный, затем - в бухту Кут Кольского залива, крайне неудовлетворительное.

С учетом анализа современных технологий очистки сточных вод нами разработана технологическая схема, обеспечивающая качество воды, отвечающая требованиям стандарта для сброса в водоемы. Очищенная вода после дополнительной обработки может быть использована для нужд населения и предприятий.

В предложенной схеме отсутствуют традиционные физико-химические методы очистки СВ, стадии уплотнение избыточного ила, аэробная стабилизация смеси осадка первичных отстойников и уплотненного

избыточного ила, а также обезвреживание и стабилизация осадка на иловых картах и пр.

Независимо от состава, все сточные воды проходят этап механической очистки. Блок механической очистки предназначен для удаления из сточных вод нерастворимых органических и минеральных загрязнителей. В нашем случае механическая очистка необходима для уменьшения количества взвешенных веществ, а также для первичной фильтрации от тяжёлых металлов.

Включение системы ФОС значительно упрощает процесс очистки СВ и повышает эффективность существующей технологии.

Технологическая схема очистки сточных вод после модернизации приведена на рисунках 12 и 13.

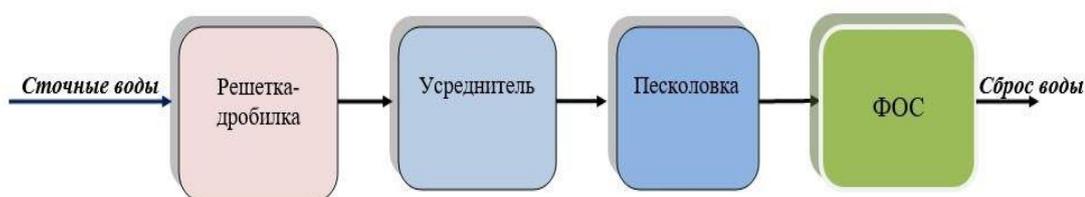


Рисунок 12 - Технологическая схема очистки сточных вод с включением ФОС

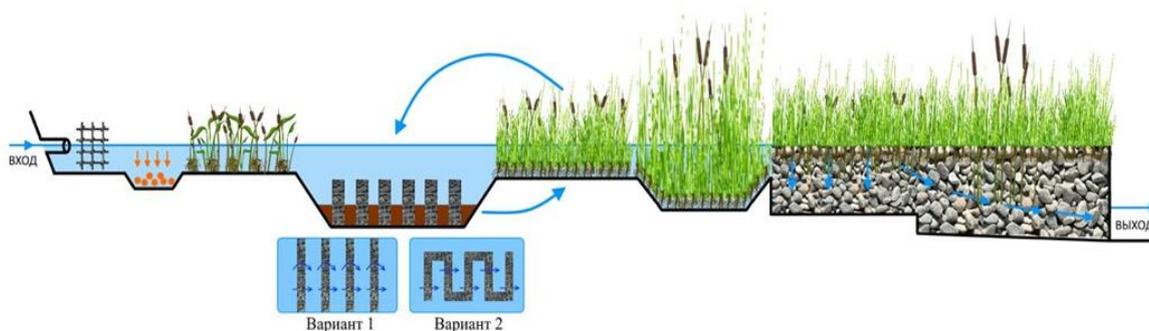


Рисунок 13 – Технологическая схема очистки сточных вод после модернизации

Механическая очистка проводится с помощью решёток для задержания крупных примесей, усреднителей для стабилизации состава стоков, песколовков для удаления минеральных частиц и отстойников для осаждения взвешенных веществ.

«Создание на дне ФОС (в зоне отстойника) конструкции из коробчатых габионов по типу «стиральной доски» (рисунок 14). приведет к селекции специфических биоценозов и дифференциации зон с донными отложениями (между габионными перегородками) и без них (над габионными перегородками), что наряду с чередованием зон способствует более эффективному процессу нитри-денитрификации уже на начальных этапах ФОС»[27].

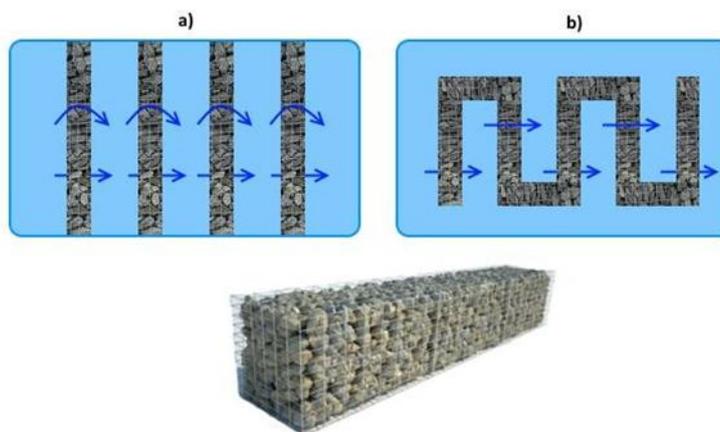


Рисунок 14 – «Конструкции габионов на дне зоны отстойника»[26]

«Наличие холодных зим требует устройства терморегулирующего слоя, защищающего сооружение от промерзания зимой. Для такой защиты используется рыхлый материал, например, торф, легкие почвы, опилки и т.п., толщина которого определяется расчетом теплового баланса ФОС. »[26].

Понижение уровня воды в зимний период создает дополнительный термоизолирующий слой сухого гравия.

Для повышения эффективности ФОС предлагается [26]:

- расширить зоны с растительностью для увеличения времени обработки стоков и улучшения разложения загрязнителей;
- создать зоны с рециркуляцией, чтобы продлить время обработки, не увеличивая площадь системы, что позволит улучшить качество воды;
- установить конструкции из коробчатых габионов («стиральные доски») на дне ФОС, это позволит формировать нужные биоценозы, а также улучшить процессы нитрификации и денитрификации;
- предусмотреть принудительную аэрацию с использованием перфорированных труб для формирования контролируемых аэробных и анаэробных зон;
- управлять микробным сообществом, внося штаммы микроорганизмов или корректируя растительное покрытие для ускорения разложения конкретных загрязнителей.

3.1 Расчет фито-очистных сооружений

1. Выполним расчет площади фитоочистных сооружений, исходя из численности населения, требуемого время удерживания, качество СВ до и после очистки. Контроль качества очистки СВ осуществляем по показателю БПК₅. Исходные данные: число жителей $N = 11000$ чел.; норма водопотребления $q = 0,16$ м³/сутки на человека. На входе концентрация БПК₅ составляет БПК₅=54 мг/л, на выходе – 10 мг/л. Расчет ведем по показателю БПК₅.

Определим общий объём сточных вод:

$$Q = N \cdot q = 11\,000 \cdot 0,16 = 1760 \text{ м}^3/\text{сут}$$

При очистке в ФОС динамика удаления органических веществ описывается законом первого порядка.

Тогда время удерживания (t) можно оценить по формуле:

$$t = (1/k) \cdot \ln(C_1/C_2), \quad (1)$$

где k – кинетическая константа удаления, зависящая от конкретных условий системы (принимается $k \approx 0,3 \text{ сут}^{-1}$).

$$t = \left(\frac{1}{0,3}\right) \cdot \ln\left(\frac{54}{10}\right) = 3,33 \cdot \ln(5,4) = 3,33 \cdot 1,686 \approx 5,62 \text{ сут}$$

Таким образом, для снижения концентрации с 54 до 10 мг/л требуется примерно 5,6 суток удерживания.

Определяем требуемый объем ФОС. Так как время пребывания определяется соотношением

$$V = Q \cdot t, \quad (2)$$

то получаем:

$$V = 1760 \text{ м}^3/\text{сут} \cdot 5,62 \text{ сут} \approx 9891 \text{ м}^3$$

Определим площадь по формуле:

$$S = V/h \quad (3)$$

где h – глубина, м.

Для арктических (умеренных) условий для обеспечения и равномерного прогрева и перемешивания примем проектную глубину $h = 2,5 \text{ м}$.

Принимая $h = 2,5 \text{ м}$, получаем:

$$S = 9891 \text{ м}^3 / 2,5 \text{ м} = 3956 \text{ м}^2 \approx 0,4 \text{ га}.$$

Таким образом, для модернизации очистного сооружения необходимо выделить участок площадью 0,4 га.

2. Далее рассчитаем энергию необходимую для поднятия уровня воды.

Предположим, что уровень необходимо поднять на 0,5 метра.

Плотность воды (ρ): 1000 кг/м³ (при температуре около 4 °С).

Определим объем воды, необходимый для поднятия уровня на 0,5 м, исходя из площади участка:

$$V = S \cdot H = 3956 \text{ м}^2 \cdot 0,5 \text{ м} = 1978 \text{ м}^3$$

Энергия, необходимая для подъема воды, рассчитывается по формуле:

$$E = \rho \cdot g \cdot H \cdot V \quad (4)$$

где E — энергия в джоулях (Дж),

ρ — плотность воды (1000 кг/м³),

g — ускорение свободного падения (примерно 9,81 м/с²),

H — высота подъема (в метрах),

V — объем воды (в м³).

Подставим значения в формулу:

$$E = 1000 \text{ кг/м}^3 \cdot 9,81 \text{ м/с}^2 \cdot 0,5 \text{ м} \cdot 1978 \text{ м}^3 = 9702090 \text{ Дж} \approx 9,7 \text{ МДж}$$

Так как насос не является 100% эффективным, необходимо учесть коэффициент полезного действия насоса. Предположим КПД равен 0,75 (75%):

$$E(\text{нужная}) = \frac{E}{\text{КПД}} = \frac{9,7}{0,75} = 12,9 \text{ МДж.}$$

Для экономического анализа переводим энергию в киловатт-часы.

(1 МДж = 0,278кВт · ч)

$$12,9 \cdot 0,278 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Стоимость электроэнергии по одноставочному тарифу в Снежногорске составлять около 3,70 руб за 1 кВт·ч, значит:

$$3,6 \cdot 3,70 \text{ р} = 13,32 \text{ р/ч}$$

Таким образом, для подъема 3956 м³ воды на высоту 0,5 метра потребуется примерно 3,6 кВт · ч энергии, что обойдется в 13,32 рублей при цене электроэнергии 3,70 рубля за кВт·ч.

3. Предположим, для поднятия 1978 м³ воды(V) на 0,5 метра будут использоваться четыре дренажных насосов, которые справятся с этой задачей за 24 часа(t).

Определим необходимую производительность для группы насосов:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{1978}{24} = 82,42 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}$$

Тогда, производительность каждого насоса будет составлять:

$$Q(1 \text{ насоса}) = \frac{82,42 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}}{4} = 20,61 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}$$

Напор (H_b) должен учитывать высоту, на которую поднимается вода, и дополнительные потери. Если принять коэффициент потерь за 0,2(20%), то:

$$H_b(\text{общий}) = H + \Delta H$$

где ΔH — потери.

$$\Delta H = 0,5 \cdot 0,2 = 0,1 \text{ м}$$

Тогда:

$$H_b(\text{общий}) = 0,5 \text{ м} + 0,1 \text{ м} = 0,6 \text{ м}$$

Теперь мы знаем что:

Необходимая производительность для одного насоса примерно 20,61 м³/ч.

Необходимый напор для одного насоса: около 0,6 м.

4. В зимнее время процесс аэрации становится затруднительным, поэтому в нашей системе предусмотрена принудительная аэрация с помощью перфорированных труб на дне ФОС, по которым циркулирует воздух.

Для нормальной работы фитоочистного сооружения обычно рекомендуется обеспечивать 1 м³ воздуха на 1 м³ воды в час. Это означает, что необходимо подавать воздух из расчета:

$$Q = V = 9891 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Переведем потребность в воздухе из м³/ч в литры в секунду:

$$Q = \frac{9891 \text{ м}^3/\text{ч}}{3600} = 2744,72 \text{ л/с}$$

При аэрации требуется определенное давление для подавления воздуха через систему труб. Обычно это давление составляет от 0.1 до 0.3 МПа. Учитывая глубину 2.5 метра, можно оценить дополнительные требования к давлению. Давление, необходимое для преодоления водяного столба, составит около 0.025 МПа на метр, но также следует учитывать сопротивление труб и перфорации.

Таким образом можно взять необходимые параметры с запасом, и рассчитывать на 0.2 Мпа.

Зная это, мы можем рассчитать мощность компрессора по следующей формуле:

$$P = \frac{Q \cdot P(\text{дав})}{\eta} \quad (5)$$

где P — мощность компрессора (кВт)

Q — расход воздуха (в $\text{м}^3/\text{ч}$)

$P(\text{дав})$ — давление (в МПа)

η — эффективность компрессора (предположительно около 0,7 – 0,9, возьмем 0,8 для расчетов)

Подставляем данные:

$$P = \frac{9891 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot 0,2 \text{ МПа}}{0,8} = 2,4 \text{ kW}$$

С учетом запаса лучше выбрать компрессор мощностью 3-4 кВт.

Энергия, потребляемая компрессором, в киловатт-часах (кВт·ч), может быть рассчитана по формуле:

$$E = P \cdot t \quad (6)$$

где E — энергия, потребляемая компрессором (кВт·ч);

P — мощность компрессора (кВт);

t — время работы компрессора (часы).

Скажем, что компрессор будет работать 22 часа в день (1-2 часа для проверок и профилактических работ). Для этого мы выбрали компрессор с мощностью 4 кВт:

$$E = 4 \text{ кВт} \cdot 22 \text{ ч} = 88 \text{ кВт}$$

Стоимость электроэнергии затрачиваемой компрессором:

$$88 \text{ кВт} \cdot 3,70 \text{ р} = 325,6 \text{ р/сут}$$

Предположим, одна перфорированная труба может подать около $0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ воздуха. Теперь вычислим количество труб (N):

$$N = Q/P \quad (7)$$

где P — это производительность одной трубы,

Q - потребность в воздухе л/с

Подставим значения:

$$P = 0,5 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}} = \frac{0,5 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}}{3600 \text{ с}} = 0,00013889 \text{ м}^3/\text{с}$$

Теперь подставляем это значение в формулу(7) количества труб:

$$N = \frac{2744,72 \text{ л/с}}{138,89 \text{ л/с}} = 20 \text{ шт}$$

Для наших расчетов можно взять средний диаметр отверстий – 2-3 мм, что обеспечит оптимальную аэрацию и минимальное забивание.

Зоны аэрации рекомендуется создать на входе и выходе из системы.

3.2 Техничко-экономическое обоснование применения ФОС

Стоимость строительства ФОС включает следующие основные составляющие:

1. Капитальные затраты: расходы на приобретение и подготовку земельного участка, проведение необходимых анализов, проектирование, земляные работы, установку гидроизоляции и фильтрующих материалов, монтаж трубопроводов, создание инженерных сетей, высадку растений и уплату налогов.

2. Эксплуатационные расходы: техническое обслуживание и ремонт оборудования, уход за растениями, мониторинг системы и удаление осадка.

Процесс строительства ФОС включает несколько этапов:

– подготовка участка и выполнение земляных работ;

- формирование бассейна (либо с помощью земляных работ, либо с установкой боковых стенок);
- укладка гидроизоляционного слоя;
- монтаж системы аэрации;
- засыпка гравием и высадка растений.

В таблице 9 приведены данные затрат при строительстве ФОС.

«Таблица 9 – Распределение капитальных затрат при строительстве ФОС»[26]

Статьи расхода	Относительная стоимость, %
Колодцы, люки	2,8
Гравий, песок	34,1
Здание мехочистки	17,2
Трубы	4,9
Оборудование	10,2
Строительные работы (включая земляные работы)	30,7
Итого	100

Наиболее затратные статьи при сооружение фито-систем: стоимость минеральных материалов (гравия и песка) и строительные работы. Для строительства ФОС можно использовать песок после стадии механической очистки СВ.

В таблице 10 на основе данных [26] приведен сравнительный анализ эксплуатационных затрат на обслуживание ФОС и классических очистных сооружений с активным илом населенного пункта численностью 35 тыс. жителей.

Таблица 10- Анализ эксплуатационных затрат на обслуживание ФОС и классических очистных сооружений

Эксплуатационные расходы	ФОС горизонтального типа с принудительной аэрацией	Очистные сооружения с активным илом (удаление биогенных элементов)
Общие затраты на электричество, кВт час/м ³	3,15-3,5	8,0-10,5
Персонал, обслуживание оборудования	Периодическое наблюдение за ростом растений, неквалифицированным персоналом. Профилактические работы с оборудованием (насосы, воздуходувки) – 1 раз в полгода.	Персонал на постоянной основе: 1) квалифицированный технолог - ежедневно, 2) операторы – 5-7 человек, 3) рабочие – 10 человека, Плановое обслуживание оборудования.
Вывоз и депонирование осадка, м ³ / год	Раз в 10-15 лет	Около 5,3тыс. м ³ при влажности 80%
Применение реагентов для удаления некоторых загрязняющих веществ	Нет	Да (количество зависит от содержания загрязнителя в поступающих стоках)

По стоимости строительства ФОС сравнимы с классическими очистными сооружениями такой же эффективности. Однако расходы на обслуживание ФОС значительно ниже, чем в случае с традиционными очистными сооружениями. Экономия происходит за счёт снижения затрат на электроэнергию, персонал, обслуживание оборудования, вывоз и депонирование осадка и отсутствия необходимости в использовании химических реагентов. Таким образом, ФОС являются экономически выгодным технологическим решением для модернизации очистных сооружений города Снежногорска.

Заключение

Большая часть территории РФ находится в арктическом и субарктическом климате, что придаёт Арктике стратегическое значение из-за наличия значительных запасов полезных ископаемых. По различным оценкам, в этом регионе сосредоточено 25–30% неразведанных мировых запасов нефти и газа, а также значительные количества драгоценных металлов, таких как палладий и платина.

В «Стратегии развития Арктической зоны РФ и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» [23] предусмотрены инвестиционные проекты по разведке и добыче полезных ископаемых, направленные на социально-экономическое развитие страны. В этой связи при промышленном освоении Арктики крайне важно развивать методы регулирования природопользования.

Тем не менее, проблема очистки сточных вод в этом регионе остаётся недостаточно проработанной. Более 85% случаев высокого уровня загрязнения и экстремально высокого загрязнения поверхностных вод Арктики зафиксировано в водоёмах Мурманской области [20].

В данной работе анализируется состояние системы очистки сточных вод в городе Снежногорске, расположенном в Мурманской области. Очистные сооружения города не оснащены блоками физико-химической и биологической очистки, что приводит к крайне неудовлетворительному качеству сбрасываемой воды в ручей Безымянный, а затем — в бухту Кут Кольского залива.

В рамках федерального проекта «Модернизация коммунальной инфраструктуры» нацпроекта «Инфраструктура для жизни» с 2025 по 2027 год запланирована модернизация очистных сооружений в Мурманске и Снежногорске. Нами предложено дополнить существующую систему очистки сточных вод фитоочистной системой.

Мировой опыт, включая несколько аналогичных систем в России, доказывает, что фито-очистные системы могут эффективно функционировать в условиях холодного климата.

С учётом анализа современных технологий очистки сточных вод нами разработана технологическая схема, которая обеспечивает качество воды, соответствующее стандартам для сброса в водоёмы. Очищенная вода после дополнительной обработки может быть использована для нужд населения и предприятий.

Технологическая схема включает механическую и биологическую очистку сточных вод с использованием ФОС. В данной схеме отсутствуют стадии уплотнения избыточного ила, аэробной стабилизации смеси осадков отстойников уплотнения и утилизации избыточного ила, обезвреживания и стабилизации осадка на иловых картах.

По стоимости строительства ФОС сравнимы с классическими очистными сооружениями такой же эффективности. Однако расходы на обслуживание ФОС значительно ниже, чем в случае с традиционными очистными сооружениями.

Экономия происходит за счёт снижения затрат на электроэнергию, персонал, обслуживание оборудования, вывоз и депонирование осадка и отсутствия необходимости в использовании химических реагентов.

Таким образом, ФОС являются экономически выгодным технологическим решением для модернизации очистных сооружений города Снежногорска.

Список используемых источников

1. Арктическая зона Российской Федерации: риски и перспективы развития [Электронный ресурс]: [//https://vostokgosplan.ru/wp-content/uploads/arkticheskaya-zona-rf.pdf64274](https://vostokgosplan.ru/wp-content/uploads/arkticheskaya-zona-rf.pdf64274) (дата обращения: 11.03.2025).
2. Верещагина, И. Ю. Искусственное биоплато в Арктических широтах / И. Ю. Верещагина, Н. В. Василевская // Экология производства. – 2004. – № 4. – С. 18–20.
3. Вертинский А. П. Физико-химические методы очистки сточных вод: проблемы, современное состояние и возможные пути усовершенствования.// «Инновации и инвестиции». №11. 2019.- С.257-261.
4. Вильсон Е.В., Бутко Д.А. Актуализация технологии очистки сточных вод на базе наилучших доступных технологий // Вестник Евразийской науки, 2019 №4. URL: <https://esj.today/PDF/39SAVN419.pdf> (дата обращения: 14.04.2025)
5. В Мурманской области модернизируют очистные сооружения [Электронный ресурс]: <https://severpost.ru/read/186202/> (дата обращения: 28.03.2025).
6. Вялкова Е.И., Глущенко Е.С., Велижанина Т.С., Осипова Е.Ю. Анализ физико-химических методов очистки бытовых сточных вод северных населенных пунктов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. Т. 22. № 1. С. 152–163. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-1-152-163.
7. Дягилева А.Б. Основы проектирования природоохранных систем и сооружений. Часть.1 Требования к проектированию водоочистных сооружений: учебное пособие/ ВШТЭ СПбГУПТД . - СПб., 2020. -92 с.
8. Зверева С.М., Бартова Л.В. Развитие технологии очистки сточных вод малых населенных пунктов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 2. – С. 64–74.

9. Информационно-технологический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 10-2019 «Очистка сточных вод с использованием систем водоотведения поселений, городских округов». – Москва: Бюро НДТ, 2019. – 416 с.

10. Использование высших водных растений в практике очистки сточных вод и поверхностного стока [Электронный ресурс]: <https://www.c-o-k.ru/articles/ispol-zovanie-vysshih-vodnyh-rasteniy-v-praktike-ochistki-stochnyh-vod-i-poverhnostnogo-stoka> (дата обращения 21.02.2025).

11. Кашулин Н.А., Скуфьина Т.П., Даувальтер В.А. и др. Устойчивое водопользование в Арктике. Новые подходы и решения.// Арктика: экология и экономика № 4 (32), 2018. – С.15-29.

12. Коротаева А. Э. Ликвидация последствий загрязнения сточных вод горных предприятий методами биологической очистки.//Дисс. к. т. н.:1.6.21. Санкт-Петербург, 2024. -183с.

13. Корса-Вавилова Е. В. Процесс и аппаратурное оформление озонной обработки воды.//Дисс. к.т.н.: 2.6.13. Москва, 2023. – 190с.

14. Лихачев Н.И. Канализация населенных мест и промышленных предприятий / И. И. Ларин, С, А. Хаскин и др.; Под общ. ред. В. Н. Самохина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1981. – 639 с.

15. Лукин Ю.Ф. Статус, состав, население Российской Арктики // Арктика и Север. 2014.№ 15. С. 57–94.

16. Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. Физическая химия озона. М: Изд-во МГУ, 1998.-480с.

17. Манжина С. А. Российские и зарубежные практики обращения с осадком сточных вод. // Экология и водное хозяйство. 2023. Т. 5, № 1. С. 15–31. URL: <https://doi.org/10.31774/2658-7890-2023-5-1-15-31>. (дата обращения: 21.02.2025).

18. Методика технологического контроля работы очистных сооружений городской канализации. М., Стройиздат, 1977. – 299 с.

19. Мочалов И.П., Родзиллер И.Д., Жук Е.Г. Очистка и обеззараживание сточных вод малых населенных мест: В условиях Крайнего Севера. Л., Стройиздат. 1991. – 160с.

20. Мурашев С.В. Разработка технических конструкций и методов очистки и обеззараживания сточных вод на морских объектах в Арктике.// Дисс. к.т.н.: 05.23.04. Санкт-Петербург, 2017.-184с.

21. Носенко М.О. Анализ причин неэффективной работы очистных сооружений малой канализации в условиях Крайнего Севера. // Вестник Евразийской науки, 2020.- №4. URL: <https://esj.today/PDF/32SAVN420.pdf> (дата обращения 25.02.2025).

22. Оборудование и устройство очистных сооружений и установок. : учебно-методическое пособие для выполнения практических работ / сост.: Ю.Л. Морева, А.В. Лоренцон; СПбГТУРП. - СПб., 2014. - 64 с.

23. О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года : Указ Президента Российской Федерации от 26 октября 2020 г. № 645 [ред. от 12.03.2025] // Президент России : офиц. сайт. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/news/64274> (дата обращения: 21.03.2025).

24. Пора очищать Арктику. Создание фитоочистной системы для доочистки сточных вод горнорудных предприятий от минеральных соединений азота / Л. А. Иванова, В. А. Мязин, М. В. Корнейкова, Н. В. Фокина, Г. А. Евдокимова, В. В. Редькина; ответственный редактор канд. биол. наук Е. А. Боровичев. - Апатиты: Издательство Кольского научного центра, 2021. - 88 с.

25. Рехтин, А.Ф. Проектирование сооружений для очистки сточных вод [Текст] : учебное пособие / А.Ф. Рехтин, Е.Ю. Курочкин, Б.П. Лашкинский. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. – 314 с.

26. Рыбка К.Ю. Фито-очистная система открытого типа как природно-техногенный барьер для загрязняющих веществ.//Дисс. канд. географ. наук: 25.00.36. Москва, 2021. – 230с.

27. Рыбка К.Ю., Щеголькова Н.М. Механизмы очистки сточных вод от биогенных элементов (азота и фосфора) в фитоочистных системах//Экосистемы: экология и динамика, 2018, том 2, № 4, с. 144-171.

28. Рябчиков Б.Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования: [Питьевая вода, пищевая промышленность, энергетика] /Б.Е. Рябчиков. – М.: ДеЛи принт, 2004. – 326 с.

29. Санникова Н.В., Шулепова О.В., Резниченко В.А. Использование осадка сточных вод в составе почвогрунтов для рекультивации нарушенных земель в условиях Крайнего Севера. // Вестник КрасГАУ. 2023. № 10. С. 30–40.

30. Солнышкова М.А. Снижение загрязнения поверхностных вод неорганическими соединениями азота в зоне воздействия горнодобывающих предприятий Мурманской области.//Дисс. к.т.н.: 25.00.36. Санкт-Петербург – 2020. -133с.

31. Степанова С.А. , Симонова Г.В. Водяной гиацинт - естественный водоочиститель // Вестник СГУГиТ, Том 24, № 1, 2019.- С. 264-277.

32. Суглобов Д.А., Вялкова Е.И., Осипова Е.Ю. Особенности проектирования резервуаров-накопителей сточных вод в арктических условиях. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 5. С. 132–143.

33. Суглобов Д.А., Вялкова Е.И., Осипова Е.Ю. Особенности проектирования сетей канализации в арктических условиях. // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 5. С. 133–144.

34. Технология очистки городских сточных вод : учеб. метод. пособие по выполнению курсового проекта: в 2 ч. Ч. II. Биологическая очистка / О.Б. Меженная, О. В. Ковалева ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2010. – 99 с.

35. Флюрик Е. А., Абрамович О. В., Змитрович А. А. Использование *Eichorniacrassipes* для очистки сточных вод и получения кормовой добавки //

Химия и технология органических веществ и биотехнология. – 2014. – № 4. – С. 155–160.

36. Щеголькова Н.М, Диас В., Криксунов Е.А. Рыбка К.Ю. Фитосистемы для очистки сточных вод: современное решение экологических проблем.// Перспектива XXI века. НДТ. 2015, №2 – С.46-56.

37. Щеголькова Н., Рыбка К., Диас В., Криксунов Е. Природный механизм с техническими элементами. Применение фито-сооружений для очистки сточных вод в различных климатических зонах / ВодаMagazine. № 12 (88) Декабрь 2014. С. 12–18.

38. Энциклопедия технологий 2.0: Технологии водоснабжения и водоотведения./ [гл. ред. Д.О. Скобелев]; ФГАУ «НИИ «ЦЭПП». Москва; Санкт-Петербург: Реноме, 2023.- 502с.

39. Achenyo Idachaba. How I turned a deadly plant into a thriving business // TED, May 27-29. – Monterey, California, 2015.

40. Borowski D, Huddleston W, Thorp B. SchussenAktivplus: reduction of micropollutants and of potentially pathogenic bacteria for further water quality improvement of the river Schussen, a tributary of Lake Constance, Germany / Borowski D., Huddleston W., Thorp B. // International Journal of Energy and Environmental Engineering. December 2014, Volume 5, Issue 4, pp 387–397.

41. Butler E. Oxidation pond for municipal wastewater treatment / Butler E. //Applied Water Science, March 2017, Volume 7, Issue 1, pp 31–51.

42. Chaturvedi, V., Verma, P. Microbial fuel cell: a green approach for the utilization of waste for the generation of bioelectricity / Chaturvedi V., Verma P.// Bioresources and Bioprocessing 2016.

43. Cosgrove W. J., Loucks D. P. Water management: Current and future challenges and research directions. Water Resources Research, 2015, vol. 51, no. 6, pp. 4823-4839.

44. The increase of process stability in removing ammonia nitrogen from wastewater / A. Benáková, I. Johanidesová, P. Kelbich [et al.] // Water Science and Technology. – 2018. – Vol. 77. – Iss.9. – PP. 2213-2219.

45. Weather Spark [Электронный ресурс]: <https://ru.weatherspark.com>
(дата обращения: 28.05.2025).