

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ТЮМЕНСКИЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

ОБУХОВА Марина Витальевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ОСАДКОВ
СТОЧНЫХ ВОД С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ**

Специальность 05.23.04 – Водоснабжение, канализация,
строительные системы охраны водных ресурсов

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
ВЯЛКОВА Елена Игоревна

Тюмень – 2021 г.

Оглавление

Введение	5
1 Современное состояние проблемы обработки и утилизации осадков сточных вод	11
1.1 Актуальность вопросов обработки осадков сточных вод поселений в Российской Федерации	11
1.2 Анализ методов обработки и утилизации осадков сточных вод	14
1.2.1 Осадки сточных вод поселений. Виды, состав и свойства	14
1.2.2 Методы обработки и утилизации осадков	21
1.3 Микроволновое излучение в процессах обработки сточных вод и осадков	29
1.4 Выводы по главе 1	34
2 Объекты, методы и оборудование для исследований	36
2.1 Краткая характеристика ОСК г. Тюмени	36
2.1.1 Состав и свойства исследуемых осадков сточных вод	40
2.1.2 Методы и приборы лабораторных исследований	40
2.2 Установка СВЧ-обработки осадков сточных вод	45
2.3 Выводы по главе 2	49
3 Экспериментальные исследования процесса обработки осадков СВЧ-излучением и математическая обработка результатов	51
3.1 Порционная обработка осадков в СВЧ-печи промышленного производства	52
3.1.1 Кинетика уплотнения осадков.....	52
3.1.2 Влияние микроволновой обработки на высоту границы раздела фаз при уплотнении осадков	55
3.1.3 Воздействие микроволновой обработки на влагоотдачу осадков	62
3.1.4 Действие микроволн на объём и влажность осадков сточных вод	65
3.1.5 Оценка степени прилипания к стенке цилиндра и эффекта стабилизации осадков, обработанных микроволновым излучением	69

3.1.6 Влияние СВЧ-обработки на содержание в осадках тяжёлых металлов	72
3.1.7 Изучение структуры и состава осадков после микроволновой обработки.....	75
3.2 Обработка осадков микроволнами на установке «ПОТОК ЭМ-1» в проточном режиме	77
3.2.1 Влияние микроволновой обработки осадков сточных вод на влажность	77
3.2.2 Сравнение эффективности микроволнового излучения и реагентной обработки осадков	79
3.3 Выводы по главе 3	85
4 Технико-экономические расчеты экологической эффективности обработки осадков СВЧ-излучением	88
4.1 Сравнение технико-экономических показателей традиционного реагентного метода и способа обработки осадков микроволновым излучением .	89
4.2 Предотвращённый экологический ущерб в результате внедрения способа СВЧ-обработки осадков и их вторичном использовании	93
4.3 Варианты технологических схем обработки осадков с использованием метода микроволнового излучения	96
4.4 Выводы по главе 4	98
5. Заключение	100
Список сокращений	103
Список литературы	104
Приложение А. Протокол № 218 испытательной лаборатории ФГБУ ГСАС «Тюменская»	120
Приложение Б. Протокол № 219 испытательной лаборатории ФГБУ ГСАС «Тюменская»	121
Приложение В. Протокол испытаний № 122 ООО «Тюмень Водоканал»	122

Приложение Г. Обоснование технических характеристик установки электромагнитной обработки сточных вод и осадков «ПОТОК ЭМ-1».....	123
Приложение Д. Внешний вид опытно-промышленного образца установки СВЧ-обработки осадков, антенны измерительной П6-59 и анализатора спектра	128
Приложение Е. Паспорт предлагаемой технологии (метода, способа) СВЧ-обработки осадков	129
Приложение Ж. Акт о проведении опытно-промышленных (натурных) испытаний по обработке осадков городских сточных вод на пилотной установке «ПОТОК ЭМ-1»	134

Введение

Актуальность темы исследования. Проблема экологии природных источников воды и прилегающих территорий напрямую связана с накоплением и утилизацией отходов производства и потребления человека. Ежегодно в России на предприятиях жилищно-коммунального хозяйства образуется около 1 млрд м³ осадков, формирующихся в результате очистки сточных вод, влажность которых 98 % и более. На сегодняшний день задачи эффективной обработки и утилизации данного вида отходов одни из самых сложных и требующих безотлагательного решения.

Традиционные способы обработки осадков, такие как уплотнение, обезвоживание, стабилизация, кондиционирование, часто характеризуются высокой стоимостью и сложностью используемого оборудования, необходимостью применения дорогостоящих реагентов, высокими трудозатратами и энергоёмкостью. Этим объясняется тот факт, что в настоящее время на большинстве канализационных очистных станций Российской Федерации осадки подвергаются минимальной обработке, а затем складываются на открытых иловых площадках и отвалах, которые занимают огромные площади земли. Размещение осадков на иловых площадках не отвечает современным экологическим требованиям, а при больших объёмах накопления осадки со временем становятся источником загрязнения прилегающих земельных угодий и водных объектов. Таким образом, использование существующих способов обработки осадков сточных вод во многих случаях является экономически нецелесообразным и малоэффективным с точки зрения накопления, хранения и дальнейшей утилизации осадков.

Необходимость совершенствования и повышения эффективности имеющихся способов обработки осадков сточных вод определяют актуальность данной работы.

Степень разработанности темы исследования. Теоретической основой исследования послужили работы отечественных и зарубежных учёных: Ю. В. Воронова, А. З. Евилевича, М. Г. Журбы, Б. Г. Мишукова, Ю. А. Феофанова, С. В. Яковлева, А. Н. Ким, Л. О. Никифоровой, И. А. Гапоненкова, О. А. Фёдоровой, В. И. Капустина, А. П. Коржавого, О. О. Ахмедовой, С. Ф. Степанова, А. Г. Сошинова, Р. З. Миннигалимова, Е. В. Левина, Qi Yang, Xiaoli Jing, Xin Fend, Jibao Liu, Ewa Wojciechowska, Nuno Miguel Gabriel Coelho и других авторов.

Цели исследования заключаются в экспериментальном подтверждении эффективности СВЧ-излучения при обработке осадков сточных вод и разработке оборудования для осуществления предлагаемого способа.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- провести экспериментальные исследования влияния СВЧ-излучения на свойства осадков при порционной обработке и в проточном режиме;
- разработать конструкцию установки для СВЧ-обработки осадков и экспериментально доказать работоспособность технического решения, обеспечивающего повышение эффективности обработки осадков; определить оптимальные параметры работы данной установки;
- провести натурные испытания предлагаемых технических решений на действующей очистной станции;
- выполнить технико-экономический расчёт экологической эффективности способа СВЧ-обработки осадков сточных вод;
- разработать технологические схемы обработки осадков для малых и средних канализационных очистных станций с использованием СВЧ-излучения, а также паспорт предлагаемого метода.

Объектом исследования явились осадки сточных вод – смесь первичного осадка и активного ила, активный ил.

Предмет исследования – свойства осадков сточных вод.

Научная новизна исследования заключается в достижении ряда конкретных результатов.

1. На основании экспериментальных исследований влияния СВЧ-излучения на свойства осадков при порционной обработке установлено, что повышается степень уплотнения, уменьшается объём и влажность, улучшаются влагоотдающие свойства, интенсифицируется выход примесей тяжёлых металлов в осветлённую воду, структура осадков становится более равномерной.

2. В результате сравнительных исследований СВЧ-обработки осадков на проточной установке и традиционной реагентной обработки определено, что эффективность этих двух методов сопоставима, при этом степень уплотнения при СВЧ-обработке выше.

3. Сконструирована и запатентована конструкция установки обработки осадков СВЧ-излучением. При помощи натурального эксперимента подтверждена работоспособность предлагаемого технического решения.

4. В результате расчётов и экспериментов определены оптимальные конструктивные и технологические параметры работы установки обработки осадков СВЧ-излучением.

5. Предложены рекомендуемые технологические схемы канализационных очистных станций малой и средней производительности с применением способа СВЧ-обработки осадков.

Методология и методы исследования. В работе использовались классические положения теории обработки и утилизации осадков сточных вод и современные тенденции их развития, лабораторные и опытно-промышленные исследования по стандартным методикам, методы математической обработки результатов исследований.

В диссертации представлены результаты научно-исследовательских работ, полученные автором лично и в сотрудничестве со специалистами предприятия «Росводоканал Тюмень».

Положения, выносимые на защиту:

– результаты экспериментальных исследований влияния СВЧ-излучения на свойства осадков сточных вод (степень уплотнения, объём и влажность, влагоотдающие свойства, содержание тяжёлых металлов, структура осадков,) в условиях

порционной обработки;

– результаты сравнительных исследований СВЧ-обработки осадков на точной установке с традиционной реагентной обработкой;

– конструкция и технологические характеристики установки СВЧ-обработки осадков;

– технико-экономические расчёты экологической эффективности предлагаемого способа обработки осадков СВЧ-излучением;

– рекомендуемые технологические схемы обработки осадков для канализационных очистных станций малой и средней производительности с использованием СВЧ-метода.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов», а именно: п. 4 «Методы обработки илов и осадков сточных и природных вод, конструкции используемых сооружений, установок, аппаратов и механизмов», п. 12 «Технико-экономическая эффективность и надёжность систем водного хозяйства городов, промышленных комплексов и производственных предприятий, оптимизация проектных решений строительства новых, технического перевооружения и реконструкции существующих систем, оптимизации режима работы систем и их отдельных элементов в соответствии с фактическим режимом водопотребления и поступления отработанной воды».

Теоретическая значимость работы состоит в математическом описании изменения свойств осадков сточных вод в зависимости от параметров СВЧ-излучения.

Практическая значимость результатов работы состоит в:

– создании конструкции и определении технологических параметров установки для реализации способа СВЧ-обработки осадков на вновь проектируемых и при реконструкции действующих канализационных очистных сооружениях;

– разработке рекомендуемых технологических схем обработки осадков для станций малой и средней производительности с использованием СВЧ-метода.

Результаты работы подтверждены в ходе опытно-промышленных испытаний установки СВЧ-обработки осадков, выполненные в АО «Водоканал», г. Ишим (см. Приложение Ж).

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность исследований подтверждается сходимостью результатов лабораторных, опытно-промышленных (натурных) испытаний и результатов, полученных на основе математического планирования эксперимента.

Основные положения работы докладывались на XIII научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и соискателей ТюмГАСУ (г. Тюмень: ТюмГАСУ 2014 г.); на II Всероссийской научной конференции с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии» (г. Барнаул: ИВЭП СО РАН 2014 г.); на 72-й научно-технической конференции «Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика» (г. Самара: СамГАСУ 2015 г.); на заседании кафедры «Водопользование и экология» ФГБОУ ВО СПбГАСУ (2019 г.); на международной научно-практической конференции «АРКТИКА: современные подходы к производственной и экологической безопасности в нефтегазовом секторе» (г. Тюмень: ТИУ 2019 г.); на расширенном заседании кафедры «Водоснабжение и водоотведение» ТИУ (2021 г.).

Премии и гранты: целевой грант на поддержку реализации научных проектов молодых учёных ФГБОУ ВО Тюменского индустриального университета (г. Тюмень: ТИУ 2016 г.); грант на защиту кандидатской диссертации (г. Тюмень: ТИУ 2019 г.), грант на публикацию научной обзорной статьи в журнале, индексируемом в базе цитирования Web of Science (г. Тюмень: ТИУ 2020 г.).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 26 печатных работах общим объёмом 20,01 п.л., лично автором – 8,48 п.л., в том числе 6 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов, утверждённых ВАК РФ, 7 – в журналах с индексацией SCOPUS и Web of Science, 1 монографии, имеются 2 патента на изобретение.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы и приложений. Общий объём работы – 135 страниц машинописного текста, включая 23 рисунка, 33 таблицы; список литературы состоит из 121 наименования работ; 7 приложений.

1 Современное состояние проблемы обработки и утилизации осадков сточных вод

1.1 Актуальность вопросов обработки осадков сточных вод поселений в Российской Федерации

По данным Росводресурсов, в 2018 году общий объём сброса сточных вод в поверхностные водные объекты составил 40 057,31 млн м³, в том числе загрязнённых сточных вод – 13 134,3 млн м³ [19]. Всего можно выделить 30 городов страны с наибольшим объёмом сбрасываемых в природные водные объекты загрязнённых сточных вод. Среди них, по данным 2018 года, – Санкт-Петербург – 951,2 млн м³; Москва – 854,6 млн м³; Магнитогорск – 333,6 млн м³; Владивосток – 218,2 млн м³; Самара – 197,8 млн м³; Братск – 185,2 млн м³; Челябинск – 149,0 млн м³ и другие города [19].

Рост производства и потребления, ужесточение экологического законодательства приводят к повышению требований к очистке сточных вод и, как следствие, увеличению образования осадков. Ежегодно в России на предприятиях жилищно-коммунального хозяйства образуется около 1 млрд м³ ОСВ влажностью 98 % [52, 88, 89].

Осадки сточных вод представляют собой органические (до 80 %) и минеральные (около 20 %) примеси, выделенные из воды в результате механической, биологической или физико-химической очистки. В состав осадков входят вещества, обладающие общетоксическими, токсикогенетическими, канцерогенными и другими негативными свойствами. В осадках могут содержаться тяжёлые металлы (*Cr, Cd, Hg, Cu, Pb, Co, Zn, Mo*), патогенные организмы (бактерии, простейшие, гельминты, вирусы), нитраты, пестициды, эфиры, фенолы и другие опасные вещества. Хранящиеся на иловых картах и отвалах осадки очистных сооружений, как правило, относятся к третьему (умеренно опасные) или четвертому классу (малоопасные)

отходов. Выделяемые осадками вредные газы могут превышать предельно допустимые концентрации в несколько раз, кроме того, они дурно пахнут. Их запах равен 4–5 баллам по шкале органолептических показателей [97].

В течение десятков лет основное количество ОСВ в необработанном виде или с минимальной обработкой выливалось на перегруженные иловые площадки, в отвалы, разного типа хранилища, карьеры. Со временем это привело к нарушению экологической безопасности, ухудшению условий жизни населения и в ряде регионов уже грозит возникновением чрезвычайных ситуаций. Фильтрация в почву вредных веществ приводит к загрязнению грунтовых вод и близлежащих водоёмов.

Сложившийся уровень антропогенного загрязнения является одной из основных причин, вызывающих деградацию рек, водохранилищ, озёрных систем, накопления в донных отложениях, водной растительности и водных организмах загрязняющих веществ, в том числе токсичных, и ухудшение качества вод поверхностных водных объектов, используемых в качестве источников питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения и являющихся средой обитания водных биологических ресурсов.

Особую актуальность проблема обработки и утилизации осадков и необходимость её решения приобрели после внесения изменений в Федеральный закон «Об отходах производства и потребления» [84], а также другие законодательные акты Российской Федерации, направленные на совершенствование организации деятельности по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию и захоронению отходов производства и потребления. Основная часть этих изменений вступила в силу 1 января 2016 года. В данных нормативных актах определены принципы государственной политики в области обращения со всеми видами отходов: обеспечение максимального снижения их объёмов и обоснованный выбор последующих приёмов утилизации или экологически безопасного размещения их в окружающей среде. Применительно к осадкам сточных вод эти принципы должны осуществляться в комплексном решении двух взаимосвязанных задач:

использовании высокоэффективных технологий, сооружений и оборудования для уменьшения объёмов и массы осадков; выборе и реализации способов конечного размещения или утилизации осадков [2, 52].

В подавляющем большинстве регионов Российской Федерации в сфере накопления и обращения с ОСВ поселений на сегодня сложилась крайне негативная ситуация. Из-за высокой стоимости современных технологий и оборудования для обработки осадков, а также из-за больших объёмов образования осадков для многих очистных станций вопросы их переработки и утилизации остаются нерешёнными. В частности, эта проблема характерна для такого мегаполиса, как Москва, на городских очистных сооружениях которого ежедневно образуется 25–30 тыс. м³ осадка; для очистных сооружений канализации (далее – ОСК) г. Новосибирска, где образуется осадков 90–110 т/сут по сухому веществу; для Алтайского края, где общее количество сухого осадка, поступающего на иловые площадки, превышает 25 тыс. т/год; для Екатеринбурга, где образуется до 91,25 тыс. тонн обезвоженного осадка в год [44]; для ОСК г. Тюмени, на которых ежегодно образуется около 12,46 тыс. т осадков [70] и многих других крупных и небольших населённых пунктов. Например, в Подмоскowie уже накоплено более 120 млн тонн неутилизованных отходов сточных вод.

Только в двух мегаполисах – Санкт-Петербурге и Уфе – вопрос с экологически безопасной утилизацией осадков сточных вод решён полностью или почти полностью [11, 21, 52]. В большинстве регионов России применение новых, более эффективных технологий по переработке ОСВ находится в стадии проектирования и внедрения. Стоит отметить, что для очистных станций населённых пунктов и предприятий, расположенных на Севере и в Арктической зоне России, из-за сурового климата и сильной удалённости вопросы очистки сточных вод и обработки осадков стоят ещё более остро.

Поэтому в современных условиях решение проблем обработки и утилизации осадков сточных вод является наиболее актуальным вопросом для ОСК нашей

страны и одним из важных звеньев обеспечения экологического и санитарного благополучия населения [10, 46]. Для сохранения водных экосистем и сокращения объёмов сброса загрязнённых сточных вод и осадков стационарными источниками необходима модернизация существующих очистных станций с использованием новейших технологий очистки и оборудования [19, 20].

1.2 Анализ методов обработки и утилизации осадков сточных вод

1.2.1 Осадки сточных вод поселений. Виды, состав и свойства

Сточные воды крупных и малых населённых пунктов, поступающие на очистные сооружения, могут содержать разнообразные по составу органические компоненты: бытовые отходы, фекалии, растительные масла, нефтепродукты, волокна растений; минеральные компоненты (песок, глинистые частицы); масла, кислоты, щёлочи, соли, токсические химические вещества, включающие соли тяжёлых металлов, цианиды и т. п.; патогенные микроорганизмы, вирусы, яйца гельминтов, дрожжевые и плесневые грибы, водоросли и т. п. [28, 97].

Принятое во многих странах понятие «осадок» (sludge) относится к комплексу взвешенных веществ (концентрированных загрязнений), удаляемых из сточных вод в процессе их физической, биологической, химической и физико-химической (реагентной) очистки. В зависимости от условий формирования и особенностей отделения различают осадки первичные и вторичные.

К первичным относятся грубодисперсные примеси, которые находятся в твёрдой фазе и выделены из воды такими методами механической очистки, как процеживание, фильтрация, флотация, осаждение в центробежном поле. К вторичным осадкам относятся примеси, первоначально находящиеся в воде в виде коллоидов, молекул и ионов, но в процессе биологической или физико-химической очистки воды или обработки первичных осадков образуют твёрдую фазу [67, 97, 108].

И. С. Туровский [97, 98] приводит следующую классификацию осадков.

Осадки первичные. Грубые примеси (отбросы), задерживаемые решётками.

В состав отбросов входят крупные взвешенные и плавающие вещества, преимущественно органического происхождения. По данным М. В. Лещинского и других исследователей, в составе этих отбросов следующие компоненты: бумага – 68,5 %; тряпьё – 26,6 %; древесина, пластики – 1,9 %; другие отбросы – 3,0 %. Количество отбросов, задерживаемых решётками с прозорами 16–20 мм, на одного человека в год составляет в среднем 8 л при влажности 80 % и объёмной массе 750 кг/м³.

Задержанные отбросы часто подвергаются дроблению с последующим выпуском их в канал перед решёткой. Для переработки и использования эти отбросы могут направляться в метантенки, на пиролизные установки вместе с другими осадками или для получения компостного удобрения вместе с мусором.

Тяжёлые примеси (песок), выделяемые песколовками. В их состав обычно входят песок, обломки отдельных минералов, кирпич, уголь, битое стекло и т. п. Количество задерживаемых тяжёлых примесей на одного человека составляет 7,2 л в год при влажности 60 % и объёмной массе 1,5 т/м³.

Выделенные тяжёлые осадки подсушиваются на песковых площадках и после обезвреживания могут использоваться для подсыпки территорий или других целей.

Плавающие примеси (жировые вещества), всплывающие в отстойниках или задерживаемые жироловками. Количество этих примесей в бытовых стоках на одного человека в год составляет 2 л при влажности 60 % и объёмной массе 0,6 т/м³. Выделение жировых веществ улучшает процесс очистки сточных вод, облегчает обработку осадков.

Первичные осадки, задерживаемые первичными отстойниками, – студенистая, вязкая суспензия с кисловатым запахом, включающая в основном оседающие взвешенные вещества: белки (20–30 % от массы сухого вещества), азотсодержащие соединения (1,5–8,0 %), целлюлозу (8–15 %), жиры и масла (6–30 %), углеводы (6–

43 %), тяжёлые металлы, патогенные бактерии, вирусы. Свежий сырой осадок серого или светло-коричневого цвета содержит частицы разного размера и состава, имеет высокую влажность, способен быстро гнить. Влажность осадка составляет 93–95 %. Плотность сырого осадка – примерно 1 г/см³. Осадки при влажности более 90 % представляют собой жидкую текучую массу; при влажности 86–90 % имеют пастообразную консистенцию; при влажности 82–86 % похожи на жидкую грязь; при более низкой влажности имеют вид влажной земли.

Механический состав первичных осадков отличается большой неоднородностью. Величина отдельных частиц колеблется от 10 мм и более до частиц коллоидной и молекулярной дисперсности.

Осадки вторичные. Активный ил, задерживаемый во вторичных отстойниках, – суспензия коллоидного типа, состоящая из микроорганизмов с адсорбированными и частично окисленными загрязнениями, извлеченными из сточных вод в процессе биологической очистки. Активный ил содержит в два раза больше белков и в два-три раза меньше углеводов, чем осадок первичных отстойников. Активный ил осаждается в виде хлопьев среднего размера от 1 до 4 мм, имеющих светло-серый, желтовато-серый или тёмно-коричневый цвет.

После уплотнения или сгущения влажность активного ила существенно снижается до 95–98 %, что приводит к сокращению его объёма в 5–15 раз. Активный ил при влажности 88–91 % имеет пастообразную консистенцию; при влажности 85–87 % и ниже имеет вид влажной земли. Средняя плотность активного ила – 0,7–1,3 г/см³. Основную часть сухого вещества активного ила составляют органические вещества. К этому типу осадков относят и биопленку, которая образуется на станциях с биофильтрами. Влажность вторичных осадков колеблется в пределах от 96 (для биопленки) до 99,8 % (для активного ила) и зависит от типа сооружений биологической очистки.

Шламы, задерживаемые отстойниками или другими сооружениями после физико-химической очистки, чаще всего выделяются в результате локальной

очистки или доочистки промышленных сточных вод с применением реагентной обработки, фильтрования, электролиза, адсорбции, ионного обмена, обратного осмоса, экстракции и других методов.

Осадок, анаэробно сброженный в осветлителях-перегнивателях, двухъярусных отстойниках и метантенках. В двухъярусных отстойниках процесс распада осадков происходит при щелочном брожении ($\text{pH} = 7-8$) и за 1–7 месяцев (в зависимости от климатических условий) достигает 50 %. Здесь распад органических веществ не останавливается, как в септике, на первой фазе кислого брожения, а проходит и вторую фазу – щелочного брожения с выделением метана и углекислоты.

Структура сброженного осадка более мелкая и однородная, цвет – почти чёрный или тёмно-серый, влажность достигает 85 %, но при выпуске принимается 90 %. Такие осадки отличаются хорошей текучестью, легко обезвоживаются. Выделяют запах сургуча или асфальта.

В метантенках, как в двухъярусных отстойниках, процесс распада осуществляется в щелочной среде, но протекает более быстро, благодаря подогреву осадков, перемешиванию и соблюдению процента загрузки сырыми осадками. При мезофильном сбраживании и температуре подогрева до 27–33 °С процесс распада длится 25–20 дней и меньше. При термофильном брожении и температуре подогрева осадка до 50–55 °С распад его протекает более глубоко и быстро и длится 10–8 дней.

В метантенках распад осадков сопровождается выделением большого количества газа – метана, весьма ценного для использования.

Аэробно стабилизированный активный ил или его смесь с осадком из первичных отстойников в сооружениях типа аэротенков. Преимущества этого способа сбраживания заключаются в отсутствии запаха, меньшей взрывоопасности сооружений и строительной стоимости, а также более простой эксплуатации.

Однако аэробная стабилизация связана с дополнительными затратами на аэрирование. Аэрирование активного ила или смеси ила с осадком при температуре 10–20 °С продолжается 8–15 дней, что приводит к минерализации органических веществ на 30–40 %. Оставшиеся органические вещества практически стабильны.

После аэробной стабилизации осадки уплотняются в отстойниках за 5–15 ч до влажности 98–96 %, при этом улучшается их водоотдача. При стабилизации бактерии *coli* гибнут на 95 %, но яйца гельминтов не исчезают, поэтому осадки после аэробной стабилизации нуждаются в обеззараживании.

Химический состав. Химический состав осадков первичных отстойников зависит от состава очищаемых сточных вод, типа и количества промышленных сточных вод, очищаемых совместно с бытовыми сточными водами, состава очистных сооружений. Сухое вещество осадка при очистке городских сточных вод в основном составляют органические вещества, на долю которых в среднем приходится 60–75 % массы сухого вещества.

Химический состав сухого вещества осадков существенно дополняет их характеристику, что имеет значение для определения ценности осадков и выяснения сложных процессов, происходящих в результате их обработки [46]. Данные по физико-химическому составу различных видов осадков представлены в таблицах 1.1 и 1.2.

Осадок может содержать соли таких тяжёлых металлов, как кадмий, хром, кобальт, медь, свинец, ртуть, никель и цинк. Сырой осадок имеет рН 5,0–8,0, щёлочность ($CaCO_3$) – 500–1500 мг/дм³, органические кислоты 200–2000 мг/дм³ [28, 97, 98].

Основную часть сухого вещества активного ила составляют органические вещества, включающие микроорганизмы с адсорбированными и частично окисленными загрязнениями. Количество органических веществ в активном иле колеблется в пределах от 65 до 82 %, зольность – 18–35 %. Щёлочность активного ила ($CaCO_3$) – 580–1100 мг/дм³, органические кислоты 1100–1700 мг/дм³, рН = 6,5–7,5.

Таблица 1.1 – Физико-химический состав осадка первичных отстойников и активного ила [97]

Наименование компонентов	Содержание, % от массы сухого вещества	
	осадок	активный ил
Общее содержание сухого вещества, %	2,0–8,0	0,3–1,0
Органическое вещество	60–80	65–82
Зольность	20–40	18–35
Жиры и масла, включая растворимые	6–30	4–25
Белки	20–30	26–43
Углеводы	6–43	2–15
Азот (N)	1,5–8,0	2,4–7,5
Фосфор (P_2O_5)	0,8–2,8	2,8–11
Калий (K_2O)	0,1–1,0	0,2–0,7

Бактериальная заражённость осадков огромна. В них можно обнаружить все основные формы бактериальных организмов: кокки, палочки, спирали. Из патогенных микроорганизмов встречаются возбудители желудочно-кишечных и других заболеваний [5, 28, 67, 97, 108].

Биологический процесс очистки сточных вод – наиболее эффективный метод удаления из сточных вод колиформ, патогенных бактерий и вирусов. В первичных отстойниках с осадком устраняется от 30 до 70 % микроорганизмов. В процессе биологической очистки сточных вод удаляется 90–99 % микроорганизмов. Среднее количество индикаторных и патогенных микроорганизмов, таких как палочки коли, стрептококки, сальмонеллы, вирусы, а также яиц гельминтов, достигает миллионы и даже миллиарды в расчёте на 1 грамм сухого вещества.

Так, на 1 грамм сухого вещества в среднем приходится $6,4 \times 10^3$ колиформ, $2,1 \times 10^6$ стрептококков, 8×10^2 сальмонелл, $3,5 \times 10^3$ вирусов, а также более 1000 яиц гельминтов [97, 108].

Таблица 1.2 – Химический состав минеральной (зольной) части осадка и активного ила [97]

Наименование компонента	Количественные значения показателей, %	
	осадок первичных отстойников	активный ил
SiO_2	15–56	15–39
Al_2O_3	0,3–18,9	7–26,9
Fe_2O_3	2,0–13,9	7–18,7
CaO	11,8–35,9	8,9–16,7
MgO	2,1–4,3	1,4–11,4
K_2O	0,7–3,4	0,8–3,9
Na_2O	0,8–4,2	1,9–8,3
SO_3	1,8–7,5	1,5–6,8
ZnO	0,1–0,6	0,2–0,3
CuO	0,1–0,8	0,1–0,2
NiO	0,2–2,9	0,2–3,4
Cr_2O_3	0,8–3,1	0–2,4

Класс опасности осадков бытовых сточных вод. В настоящее время в России для отходов, в соответствии с Приказом Министерства природных ресурсов РФ от 15.06.2001 года № 511 и Приказа Министерства природных ресурсов Российской Федерации и экологии от 04.12.2014 года № 536 «Об утверждении Критериев отнесения отходов к I-V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду», установлено пять классов опасности [69].

Осадки бытовых сточных вод относятся к IV классу опасности (малоопасные). Однако накопление необезвреженных осадков в больших количествах со временем приводит к серьёзному ухудшению состояния окружающей среды, а период самовосстановления составляет не менее 3-5 лет.

1.2.2 Методы обработки и утилизации осадков

Целью обработки осадков является удаление их с очистных сооружений, задачами – уменьшение их объёма и влажности, устранение запаха, обеззараживание и перевод осадков из категории опасных загрязнений в категорию продукта, пригодного для утилизации, например, в качестве органического удобрения или добавки к почвам с целью улучшения их структуры [28, 39, 68, 90, 95, 97, 108].

Вопросам обработки и утилизации осадков сточных вод посвящены научные и научно-практические труды Р. Я. Аграноника, В. И. Алексеева, Т. Б. Арбузовой, В. В. Бабкова, Ю. В. Воронова, Л. Л. Гольдфарба, Л. И. Гюнтера, Г. Я. Дрозд, А. И. Жукова, А. З. Евилевича, М. Г. Журбы, В. И. Кичигина, Б. Н. Ласкорина, Б. Г. Мишукова, В. Д. Назарова, И. С. Туровского, Ю. А. Феофанова, С. В. Яковлева и многих других.

В таблице 1.3 представлены краткое описание существующих методов обработки ОСВ, их основные достоинства и недостатки, а также прогноз применения.

Анализ существующих методов показал, что многие имеют существенные недостатки (высокая стоимость и сложность оборудования, высокая энергоёмкость, необходимость применения реагентов, зависимость от внешних факторов и другие), поэтому важным на сегодняшний день остаётся повышение эффективности существующих технологий обработки и разработка новых методов, более совершенных в технологическом плане и более выгодных с экономической точки зрения.

К перспективным способам обработки осадков сточных вод относятся использование комбинированных аппаратов для обезвоживания и термической сушки осадков, физические методы обработки и обезвреживания, технологии удаления тяжёлых металлов [97]. К физическим методам обработки ОСВ относится использование физических полей, в частности электромагнитных полей СВЧ-диапазона.

Таблица 1.3 – Существующие методы обработки ОСВ

Наименование метода	Назначение	Сооружения, оборудование, материалы	Технико-экономические показатели		Прогнозирование применения метода
			достоинства	недостатки	
Уплотнение [26, 44, 45, 87, 94]:					
Гравитационное уплотнение	Увеличение концентрации, снижение объёма и влажности осадков	Илоуплотнители	Распространенный метод, невысокая стоимость, простота сооружений	Длительное время обработки (до 24 часов), громоздкие сооружения, высокая влажность получаемых осадков (85–97 %)	Так же, как и в настоящее время
Флотационное уплотнение (напорная флотация, насыщение активного ила воздухом)		Флотаторы	Невысокая стоимость, меньшее время обработки, чем при гравитационном уплотнении, возможность регулирования процессов подачей воздуха	Сложное оборудование, объёмные сооружения, затраты электроэнергии	Так же, как и в настоящее время
Центробежное уплотнение, сгущение		Центрифуги, гидроциклоны, сепараторы	Компактные сооружения, меньшая продолжительность, простота эксплуатации, отсутствие запаха, эффективное уплотнение осадков	Высокие эксплуатационные затраты, невозможность накопления большого количества ила в илоуплотнителе, большой расход электроэнергии, быстрая изнашиваемость оборудования	Уменьшаться
Стабилизация [7, 22, 26, 45, 94, 97]:					
Аэробная стабилизация	Разложение органического вещества, предотвращение	Аэробные стабилизаторы, аэротенки с продленной аэрацией	Простота конструкции и эксплуатации, низкое содержание БПК и взвешенных веществ в воде, отсутствие запаха, низкая стоимость	Высокий расход электроэнергии, снижение эффективности в зимнее время, не происходит обеззараживания	Так же, как и в настоящее время

Продолжение таблицы 1.3

Наименование метода	Назначение	Сооружения, оборудование, материалы	Технико-экономические показатели		Прогнозирование применения метода
			достоинства	недостатки	
Анаэробное сбраживание	загнивания, обеззараживание	Метантенки, двухъярусные отстойники, осветлители-перегниватели, сбраживатели	Образование потенциального топлива, высокая степень разложения органики, дегельминтизация осадков	Затраты электроэнергии, высокая стоимость, сложность конструкции и эксплуатации оборудования, взрывоопасность метантенков и биореакторов, снижение водоотдающей способности	Увеличиваться
Кондиционирование [15, 25, 45, 46, 97]:					
Коагуляция реагентами	Улучшение водоотдающих свойств осадков, распад органики, обезвреживание	Реагенты: хлорное железо, сернокислое окисное железо, железный купорос и другие	Широкое распространение	Высокая стоимость, реагентное хозяйство, коррозионность	Увеличиваться
Тепловая обработка и замораживание		Нагревание осадков до температуры 170–220 °С при давлении 1,2–2 МПа в течение 30–120	Отпадает необходимость в реагентах, снижение влажности, стерилизация, отсутствие загниваемости	Сложность оборудования, высокий расход тепловой энергии, высокие значения БПК и ХПК иловой воды, образование запахов и газов	Так же, как и в настоящее время
Промывка сброженных осадков		Очищенная сочная жидкость или вода в количестве от 1 до 5 м ³ /м ³	Улучшение свойств осадков, удаление продуктов распада после сбраживания	Необходимость дополнительных сооружений для разделения воды и осадка, появление нового отхода – воды после промывки	Так же, как и в настоящее время

Продолжение таблицы 1.3

Наименование метода	Назначение	Сооружения, оборудование, материалы	Технико-экономические показатели		Прогнозирование применения метода
			достоинства	недостатки	
Жидкофазное окисление		Реакторы		Сложность оборудования	Так же, как и в настоящее время
Обезвоживание [1, 3, 16, 25, 40, 45, 64, 66, 95, 97, 103, 106, 108]:					
Механическое обезвоживание	Снижение влажности и объёма осадков	Ленточные, камерные прессы, фильтры, центрифуги, вакуум-фильтры, различного типа сушилки	Компактное оборудование, снижается время обработки, широкое распространение, низкая влажность осадков (60–80 %)	Высокая стоимость, сложность оборудования, применение флокулянтов, неприятные запахи	Увеличиваться
Обезвоживание в естественных условиях		Иловые площадки	Низкая стоимость, простота конструкции и управления, низкое потребление электрической энергии	Отчуждение больших площадей земли, длительное время обработки, зависимость от климата и грунтовых условий, неудовлетворительное санитарно-гигиеническое состояние площадок	Уменьшаться

Окончание таблицы 1.3

Наименование метода	Назначение	Сооружения, оборудование, материалы	Технико-экономические показатели		Прогнозирование применения метода
			достоинства	недостатки	
Обеззараживание [28, 94, 97, 106]:					
Обеззараживание нагреванием	Снижение до безопасного уровня количества патогенных микроорганизмов, яиц гельминтов, вирусов, предотвращение загниваемости	Сушилки, нагревание до 70 °С в теплообменниках	Хорошая эффективность обеззараживания	Высокая стоимость, сложность оборудования, большие энергозатраты	Увеличиваться
Химическое обеззараживание		Известь	Отсутствие неприятных запахов, возможность использования осадков в качестве удобрения	Высокая стоимость, необходимость применения реагентов	Увеличиваться
Компостирование		Компостные кучи, биореакторы	Низкая стоимость, возможность использования осадков в качестве улучшающих структуру почв материалов	Большая длительность процесса, трудоёмкость, энергозатраты	Увеличиваться
Радиационный метод		Радиационное излучение	Эффективность	Сложность оборудования, опасность процессов для здоровья людей	Так же, как и в настоящее время
Сжигание		Печи с кипящим слоем, барабанные, циклонные, многоподовые	Значительное уменьшение объёмов осадка, обеззараживание, полная минерализация	Высокая стоимость, сложность оборудования, образование газов, золы, рентабельность использования только для крупнотоннажных производств	Уменьшаться
Пиролиз		Реакторы	Вторичные продукты	Затраты тепловой энергии, сложность оборудования	Увеличиваться

Утилизация осадков. Утилизация осадков позволяет не только решить природоохранные проблемы, но и вернуть осадки в повторное использование или получить из них многие ценные продукты и материалы [46].

Удобрения. При соответствии состава осадков техническим условиям предусматриваются все случаи их использования в качестве удобрения. Они могут применяться в жидком виде без обработки или с минимальной обработкой – уплотнением. Эти жидкие текучие осадки влажностью 99,7–90 % чаще всего перекачиваются по трубам непосредственно на поля через распределительные устройства или накопители, расположенные в центре удобряемых участков.

Осадки, подсушенные на иловых площадках или механически обезвоженные до влажности 80–60 %, а также термически высушенные до влажности 40–5 %, перевозятся на удобряемые поля, сады, парки всеми возможными видами транспорта [8, 18, 43, 81]. Осадки могут с успехом применяться для улучшения структуры и плодородия торфяных и песчаных почв, а также для рекультивации земель. В некоторых случаях из осадков или из иловой воды после метантенков можно отдельно получать азотное удобрение.

Корма для животных получают на базе избыточного активного ила в смеси с кормовыми дрожжами или с другими продуктами комбикормовой промышленности. Активный ил, при условии соответствия его состава техническим требованиям, является ценным белково-витаминным кормовым продуктом (белвитамил), обладает высокими пищевыми качествами и используется при кормлении животных, птиц, пушных зверей. Ценный кормовой продукт получают из отходов сточных вод свеклосахарных заводов, а из отходов стоков пищевой промышленности можно получить высокоценную мясокостную и рыбную муку.

Вторичное сырьё. В данном случае речь идёт о применении осадков сточных вод многих промышленных предприятий как сырья для собственного производства или других предприятий. Например, хорошие результаты были получены при использовании активного ила в производстве картона, мешочной бумаги, целлюлозы.

В химической промышленности, в частности, на предприятиях, вырабатывающих синтетические смолы, надсмольные сточные воды можно превратить в дополнительное сырьё для производства пластмассовых изделий. На базе шламовых отходов предприятий вискозных волокон можно регенерировать цинк, который целесообразно использовать на данных предприятиях или в ряде других отраслей промышленности.

Материалы для строительной промышленности. Многие промышленные предприятия отходы сточных вод могут утилизировать для решения различных задач, в том числе для получения строительных материалов [100]. Так, например, на заводах цветной металлургии из шламов можно получить вяжущие вещества для производства магнезиального цемента, ксилолита, фибролита, искусственного мрамора и других материалов.

Осадки сточных вод содового производства можно использовать для автоклавных бетонов, а шламовые отходы – в виде пиритных огарков. На предприятиях, вырабатывающих серную кислоту, шламы можно применять также для производства цемента и асбоцементных труб [27].

На целлюлозно-бумажных предприятиях волокнодержущие осадки можно использовать в производстве волокнистых, древесноволокнистых и древесностружечных плит. Эти же осадки можно применять в производстве сухой штукатурки, кирпича, лёгких бетонных плит, теплоизоляционных материалов.

Ликвидация осадков. Депонирование в почве (захоронение). К захоронению осадков сточных вод следует прибегать только в случаях невозможности их утилизации по техническим или экономическим причинам. Важно также учитывать необходимость предотвращения возможных отрицательных воздействий на окружающую среду.

Для определения условий и способа захоронения осадка необходимо установить источники его образования, физические, химические и биологические свойства. Не все осадки, полученные в процессах очистки сточных вод, пригодны для

захоронения из-за наличия в них патогенных микроорганизмов, выделяющихся опасных газов, высокотоксичных соединений и т. п. Экономически нецелесообразно направлять осадки на захоронение, если содержание сухого вещества в них менее 15 %.

Существует несколько способов захоронения осадков. Наиболее распространенные из них – траншейный и полигонный. В зависимости от содержания сухого вещества возможно складирование исходного осадка с наполнителями, в качестве которых могут использоваться грунт или твёрдые бытовые отходы [94]. Заполненное хранилище отходов обязательно закрывается изолирующим слоем грунта. Изоляция грунтом и его последующее уплотнение препятствуют загрязнению окружающей воздушной среды выделяющимися газами и распространению мух и грызунов.

Сжигание – это процесс окисления органической части осадка при повышенной температуре до нетоксичных газов (двуокись углерода, водяные пары) и выделения минеральной части в виде расплава или сухого порошка (золы). Осадки городских сточных вод целесообразно сжигать после их механического обезвоживания либо термической сушки в тех случаях, когда они не могут быть утилизированы в сельском хозяйстве в качестве органического удобрения.

С технологической точки зрения сжигание представляет собой метод обезвреживания осадков с одновременным использованием последних в качестве топлива и утилизацией выделившейся теплоты, а также образовавшейся золы. Теплота используется для подогрева воздуха, необходимого для сжигания, а зола – как присадочный материал для интенсификации процесса обезвоживания осадков на вакуум-фильтрах или фильтр-прессах.

В качестве топочных устройств для сжигания осадков сточных вод применяют печи с кипящим слоем инертного носителя (песка), барабанные, циклонные, многоподовые печи, циклонные топки.

Пиролизный метод подразделяется на сухой пиролиз и окислительный с последующим сжиганием пиролизных газов.

Окислительный пиролиз – это процесс термического разложения отходов при их частичном сжигании или непосредственном контакте с продуктами сгорания топлива. Он является одной из стадий газификации. В процессе окислительного пиролиза образуется твёрдый углеродистый остаток (кокс), в то время как твёрдый остаток процесса газификации является минеральным продуктом (зола и шлак). В дальнейшем кокс можно использовать в качестве твёрдого топлива или в других целях. Окислительный пиролиз отходов осуществляется во вращающихся барабанных реакторах, шахтных реакторах с вращающимся подом, многоподовых реакторах и реакторах с псевдоожиженным слоем [97].

Под *сухим пиролизом* понимают процесс термического разложения отходов, твёрдого и жидкого топлива без доступа кислорода в реакторах с внешним и внутренним подогревом. В результате сухого пиролиза отходов образуются пиролизный газ с высокой теплотой сгорания, жидкие продукты и твёрдый углеродистый остаток.

1.3 Микроволновое излучение в процессах обработки сточных вод и осадков

В современном мире микроволны нашли широкое применение в промышленности, медицине, быту, радиолокации, также они используются в телефонной связи, при передаче телевизионных программ, работе Интернета и других сферах. Новым направлением использования микроволновой энергии являются обработка сточных вод и осадков, отходов производства и жизнедеятельности человека [31, 35, 110, 119].

На основании изученной литературы можно сделать вывод, что электромагнитное излучение обладает широким спектром воздействия на водные системы: меняется поверхностное натяжение воды, повышаются адсорбция и растворение

веществ, увеличивается концентрация кислорода, ускоряется кристаллизация, уменьшается степень смачивания водой твёрдых поверхностей, ускоряется коагуляция, изменяются электрохимические процессы, наблюдается бактерицидный эффект микроволн [9, 13, 23, 24, 37, 38, 47, 48, 49, 50, 57, 58, 82, 91, 104, 105].

Накопившийся экспериментальный материал свидетельствует о наличии теплового и нетеплового действия микроволн на объекты живой природы [4, 64, 86, 121]. Комбинированный эффект СВЧ-излучения даёт ряд преимуществ по сравнению с обычным электротермическим нагревом и может быть использован в технологиях обработки осадков сточных вод.

Л. О. Никифоровой [65] доказано, что проблема активации ферментативной системы биоценоза комплекса биологической очистки решается за счёт использования электромагнитных полей. Применение данной технологии позволяет увеличить окислительную мощность аэрационных сооружений до 40 %, уменьшить величину илового индекса до 45 %. Также разработан новый метод обеззараживания воды.

Т. И. Комаровой с соавторами [83] подтверждена эффективность применения КВЧ-излучения для увеличения биомассы углеводородокисляющих бактерий *Rhodococcus erythropolis* E-15. Данный вид микроорганизмов способен использовать нефтяные углеводороды в качестве источников углерода и энергии. Они широко распространены как в водных, так и наземных местах обитания.

И. А. Гапоненковым, О. А. Фёдоровой [17] были проведены исследования воздействия СВЧ-волн на некоторые физические и химические свойства активного ила очистных сооружений предприятий пищевой промышленности. Доказано, что СВЧ-обработка активного ила приводит к существенному увеличению скорости его осаждения и степени уплотнения.

В. И. Капустиным, А. П. Коржавым [41] доказано, что микроволновая обработка осадков сточных вод позволяет обеспечить эффективное удаление из осадков примесей тяжёлых металлов с энергозатратами не более 0,05 кВт час/кг.

В Волгоградском техническом университете О. О. Ахмедовой, С. Ф. Степановым, А. Г. Сошиновым предложен способ повышения эффективности локальных очистных сооружений сточных вод за счёт применения комбинированных электрофизических методов воздействия [80].

Российскими учёными разработан микроволновый реактор, способный перерабатывать 100 тыс. т твёрдых бытовых отходов (далее – ТБО) в год. В этом устройстве содержится специальная камера, отапливаемая через простенки с помощью топливного газа и за счёт микроволн. Под действием приложения этих двух температурных воздействий происходит разложение вещества без доступа кислорода. Вещество разлагается на три составляющие: углеродный остаток, газовую фракцию и различные компоненты, которые потом компенсируются и превращаются в печное топливо или моторный продукт [56].

Р. З. Миннигалимовым разработан способ обезвоживания водонефтяных эмульсий посредством воздействия электромагнитного поля, защищённый патентом. Разработаны технология и промышленная технологическая установка переработки нефтяных шламов с использованием СВЧ-энергии [60].

Учёными Китайской академии наук (Jibao Liu, Yuansong Wei, Kun Li и др.) изучен вопрос влияния гибридной обработки СВЧ-излучением и подкислением на обезвоживаемость осадка, а также его механизм. Результаты показали, что комбинированная СВЧ кислотная обработка эффективна для улучшения обезвоживаемости осадка [112].

Другие китайские исследователи (Qi Yang, Xiaoli Jing, Xin Fend и др.) изучили физико-химические свойства активного ила после СВЧ-обработки. Было установлено, что СВЧ-энергия улучшает уплотнение осадков, повышает содержание растворенного кислорода, неорганического азота, разрушает микробные клетки [118].

Ева Войцеховская (Ewa Wojciechowska) рассмотрела вопросы возможности применения микроволновой энергии для кондиционирования различных смесей осадка и активного ила сточных вод [120].

Канадскими исследователями (Nuno Miguel Gabriel Coelho, Ronald L. Droste и др.) рассмотрен вопрос влияния предварительной микроволновой обработки на анаэробное сбраживание осадков. Результаты экспериментов показали, что реакторы с предварительно обработанным осадком микроволновым излучением вырабатывают больше биогаза, чем реакторы, работающие на обычном осадке, происходит удаление патогенных микроорганизмов, а также более интенсивный гидролиз органического материала [114].

Испанскими специалистами (J.A Menéndez, M Inguanzo и др.) разработан новый способ пиролиза осадка сточных вод с использованием микроволновой печи. В работе показано, что пиролиз происходит если сырой влажный осадок смешать с небольшим количеством микроволнового поглотителя (например, обугленный уголь) [111].

В свою очередь грузинскими учеными (Паата Дж. Кервалишвили, Арчилом Чиракадзе, Закарией Буачидзе, Давидом Джишиашвили и др.) проводятся исследования по использованию микроволновой обработки для эффективной переработки горно-металлургических, полимерных, сельскохозяйственных, коммунальных, медицинских и радиоактивных отходов, а также микроволнового синтеза наночастиц и наноматериалов [113].

Патентный обзор:

– известен способ обеззараживания промышленных сточных вод в импульсном электромагнитном устройстве с напряжённостью магнитного поля 70–80 кА/м и частотой 2–10 имп/с [73];

– существует способ антибактериальной обработки потока жидкой среды посредством воздействия на закрученный поток жидкости магнитным и электрическим полями и создания градиента концентрации ионов [74];

– разработан комплексный способ безреагентной очистки сточных вод и брикетирования, включающий обеззараживание брикетов осевшего ила в СВЧ-печах [75];

– имеет место безреагентный способ обработки и обезвреживания осадков сточных вод [76];

– известен способ обработки и обезвреживания сточных вод и их осадков и устройство для осуществления способа [79];

– разработано оборудование для очистки сточных вод от органических загрязнений [115];

– существует оборудование для стерилизации и удаления взвешенных веществ из воды для питьевых целей из подземных источников и цистерн [116];

– разработано высокоэффективное, энергосберегающее, компактное техническое устройство для очистки сточных вод [117].

Анализ имеющихся отечественных и зарубежных научно-технических и патентных источников по вопросу возможности использования СВЧ-излучения в области очистки стоков и обработки осадков показал, что с каждым годом интерес исследователей как в России, так и за рубежом к данной теме возрастает, увеличивается количество экспериментальных данных, подтверждающих эффективность микроволнового излучения для обработки сточных вод и осадков. На сегодняшний день имеются исследования влияния микроволн на физико-химические свойства осадков, подтвержден эффект обеззараживания. Но при этом, практически отсутствует оборудование для осуществления СВЧ-обработки сточных вод и осадков, необходима разработка технологических схем очистных станций с использованием микроволновой энергии.

Гипотеза воздействия СВЧ-излучения на влагоотдающие свойства осадков сточных вод.

Пространственная структура осадков сточных вод является коллоидной системой, включающей мелкодисперсные твёрдые частицы. Суммарный

отрицательный электрический заряд на поверхности коллоидных частиц вызывает взаимное отталкивание, и, как следствие, осадки не поддаются осаждению и фильтрации.

Воздействие микроволнового излучения связано с ионизацией молекул вещества и образованием возбуждающих частиц, которые вступают во взаимодействие между собой и другими молекулами или распадаются с образованием свободных радикалов.

СВЧ-обработка осадков сточных вод приводит к образованию диссоциированных молекул и свободных радикалов, возникновению электрических зарядов, возникают условия смещения равновесия коллоидных систем, и, как следствие, улучшение влагоотдающих свойств осадков. За счёт объёмного повышения температуры осадка увеличивается испарение влаги, что приводит к уменьшению его объёма. За счёт повышения активности кислорода активизируются окислительные процессы (разложение органики). При этом полезным побочным эффектом является деструкция клетчатки, снижение активности ферментов клетки микроорганизмов, происходит дезинфекция и уничтожение яиц гельминтов, патогенных бактерий, что существенно упрощает дальнейшую утилизацию осадков.

1.4 Выводы по главе 1

1. Анализ существующей научно-технической литературы по вопросам очистки сточных вод, обработки и утилизации осадков показал, что актуальность проблемы обработки и утилизации ОСВ возрастает с каждым годом. В связи с ужесточением экологического законодательства и внедрением технологий высокой степени очистки сточных вод объёмы осадков, образующихся в процессах очистки, многократно возрастают. В подавляющем большинстве регионов Российской Федерации в области обращения с осадками сточных вод на сегодня сложилась крайне сложная ситуация: большая часть образующихся осадков складывается на иловых

площадках очистных сооружений (в том числе в Тюмени), лишь около 20 % осадков перерабатываются. Такие условия их хранения, как правило, со временем приводят к загрязнению поверхностных и подземных вод, почв, растительности.

2. Традиционно используемые сегодня методы обработки осадков сточных вод (уплотнение, обезвоживание, стабилизация, кондиционирование и др.) имеют ряд существенных недостатков: высокая стоимость и сложность оборудования, высокая энергоёмкость, необходимость применения реагентов и т. д. Поэтому важным на сегодня является разработка новых и экономически оправданных методов. К перспективным методам обработки ОСВ относится использование физических полей, в частности электромагнитных полей СВЧ-диапазона.

3. Многими исследователями показано, что электромагнитное излучение обладает широким спектром воздействия на водные системы: повышаются адсорбция и растворение веществ, увеличивается концентрация кислорода, ускоряется коагуляция, изменяются электрохимические процессы, наблюдается бактерицидный эффект микроволн и т. д. Имеется экспериментальный материал, свидетельствующий о наличии теплового и нетеплового действия микроволн на объекты живой природы. Комбинированный эффект СВЧ-излучения даёт ряд преимуществ по сравнению с обычным электротермическим нагревом и может быть использован в технологиях обработки осадков сточных вод. Исследования, выполненные в России и за рубежом, подтверждают эффективность использования микроволн для интенсификации процессов обработки ОСВ.

2 Объекты, методы и оборудование для исследований

2.1 Краткая характеристика ОСК г. Тюмени

Очистные сооружения канализации г. Тюмени – комплекс сооружений, предназначенный для полной биологической очистки хозяйственно-бытовых и промышленных сточных вод города. Объём промышленных стоков составляет около 25 % от общего объёма водоотведения. Технология очистки включает основные этапы: механическую и биологическую очистку, обеззараживание и обработку осадков. Состав сооружений приведён в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Состав канализационных очистных сооружений г. Тюмени [70]

Наименование	Количество
Приёмная камера, L = 24,7 м, В = 3,7 м, Н = 3,0 м	1
Решётки механизированные	5
Песколовка горизонтальная аэрируемая, трёхкоридорная, L = 13,5 м, В = 14,9 м, Н = 3,5 м	1
Песколовки горизонтальные с круговым движением воды, d = 5,5 м, Н = 3,5 м	4
Первичные радиальные отстойники, d = 40 м, Н = 4,5 м	4
Аэротенки-смесители коридорного типа:	
– трёхкоридорные: L = 84 м, В = 18 м, Н = 5,0 м;	1
– четырёхкоридорные: L = 84 м, В = 36 м, Н = 5,0 м	1
Вторичные радиальные отстойники, d = 40 м, Н = 4,5 м	6
Блок воздуходувок (ВНС)	2
Станция УФО очищенных сточных вод	1
Блок механического обезвоживания осадка:	
– декантеры АД2040 фирмы «Вестфалия» (Германия);	2
– ленточные фильтр-прессы ПЛ-20 производства НПО «Экотон» (Россия)	2
Песковые площадки на бетонном основании с вертикальным дренажом, 26×26 м	2
Иловые площадки на искусственном основании, 75×140 м; 75×115 м; 75×105 м; 75×100 м	4

Географическое положение: ОСК расположены в пригородной зоне г. Тюмени (в районе посёлка Антипино), на правом берегу реки Туры ниже города по течению, площадь территории – 50 га. Сброс очищенных сточных вод осуществляется в озеро Осинное и далее в реку Туру.

Количественный и качественный состав поступающих сточных вод.

Производительность очистных сооружений: проектная – 220 тыс. м³/сут; фактическая – от 190 тыс. до 260 тыс. м³/сут (максимальная в паводковый период). Характеристика поступающих и очищенных сточных вод приведена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Качественная характеристика поступающих и очищенных сточных вод [70]

Наименование показателей	Концентрация	
	на входе	на выходе
Взвешенные вещества, мг/дм ³	135,50	9,10
БПК ₅ , мг/дм ³	138,10	7,80
Азот аммонийный, мг/дм ³	27,85	1,36
Азот нитритов, мг/дм ³	отсутствует	0,11
Азот нитратов, мг/дм ³	1,40	72,50
Фосфаты, мг/дм ³	8,40	6,45
Железо общее, мг/дм ³	5,48	0,48
рН	7,82	7,60
Сульфаты, мг/дм ³	67,80	67,00
Хлориды, мг/дм ³	60,80	57,00
Прозрачность, см	1,50	20,30
СПАВ, мг/дм ³	1,84	0,052
Нефтепродукты, мг/дм ³	3,70	0,77

Технология очистки сточных вод [70].

Смесь хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод г. Тюмени поступает в приёмный резервуар городских ОСК, откуда, пройдя грубую механическую очистку на решётках, самотёком поступает в песколовки – горизонтальные с круговым движением воды и аэрируемую. В песколовках происходит выделение из стоков крупных загрязнений минерального происхождения (гальки, песка, шлака) с последующей откачкой пескопульпы на песковые площадки. Далее стоки попадают в распределительную чашу первичных радиальных отстойников. Осветлённые в первичных отстойниках стоки отводятся в распределительный канал аэротенков коридорного типа, где смешиваются с активным илом. Перемешивание стоков и ила производится при помощи воздуха, нагнетаемого в аэротенки воздуходувками, также воздух обеспечивает жизнедеятельность биоценоза микроорганизмов, участвующих в процессах биологической очистки. Дальше иловая смесь поступает во вторичный отстойник, где происходит разделение иловой смеси на активный ил и очищенную воду. Часть ила возвращается в регенератор аэротенка (циркуляционный активный ил) при помощи эрлифта и рециркуляционной насосной станции, а часть направляется в первичные отстойники для биокоагуляции.

Избыточный ил и первичный осадок из первичных отстойников направляются в цех механического обезвоживания, а в случае остановки – на иловые поля.

После вторичных отстойников вода поступает на обеззараживание на станцию ультрафиолетового обеззараживания (далее – УФО), а затем сбрасывается в озеро Осинное и далее в реку Тура.

Работу очистных сооружений, запроектированных в соответствии с нормативами 70-х годов прошлого века, учитывая используемую технологию очистки сточной воды, следует признать удовлетворительной. Необходима реконструкция

цеха механического обезвоживания осадка, в том числе строительство системы уплотнения избыточного активного ила [70].

Технология обработки осадков сточных вод [70].

В процессе очистки стоков образуются следующие осадки и отходы:

- на решётках – крупные отбросы в количестве 900 кг/сут, которые вывозятся спецтранспортом на полигон бытовых отходов;
- песок из песколовок в виде пескопульпы откачивается гидроэлеватором на песковые площадки. Количество песка составляет 1760 кг/сут;
- избыточный активный ил из вторичных отстойников удаляется из нижней части отстойников илососами и подаётся на первичные отстойники.

После осаждения смесь избыточного ила вторичных отстойников и осадка первичных отстойников в объёме около 600 м³ (31,5 т/сут по сухому веществу) перекачивается плунжерными насосами на установки механического обезвоживания в цех механического обезвоживания осадка (далее – ЦМОО), при остановке ЦМОО – на иловые поля. Виды осадков сточных вод и их количество представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Виды осадков и их количество [70]

Наименование	Количество т/сут сух. вещ.	Количество т/год сух. вещ.
Крупные отбросы с решёток	0,9	328,5
Песок в виде пескопульпы	1,76	642,4
Сырой осадок первичных отстойников	14,85	5420,25
Избыточный ил	16,64	6073,6
Всего	34,15	12464,75

Существующая технология обработки и утилизации осадков является устаревшей, экономически неэффективной и экологически неоправданной. Перегруженные иловые поля оказывают негативное влияние на прилегающие территории.

На сегодняшний день существует проблема утилизации накопленного осадка. Объем накопленного осадка на иловых полях ОСК – около 400 тыс. м³ [70].

2.1.1 Состав и свойства исследуемых осадков сточных вод

Основные свойства ОСВ г. Тюмени.

Смесь первичного осадка и активного ила в пропорции 1:2: влажность – 96,1÷98,3 %, зольность – 36,8÷36,9 %, рН = 7,8.

Избыточный активный ил: влажность – 99,4 %, зольность – 29,7 %, рН = 7,6.

Химический состав осадков, образующихся на ОСК г. Тюмени, представлен в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Химический состав осадков сточных вод [70]

Показатели	Значения показателей			Показатели	Значения показателей		
	мг/л	кг/сут	т/год		мг/л	кг/сут	т/год
Взвешенные вещества	135,46	16960,0	6295,8	Железо общее	2,6	338,0	125,47
ХПК	183,3	23829,0	8845,8	Фенолы	0,009	1,17	0,43
БПК ₅	138,29	16418,0	6094,6	Жиры	13,0	1690,0	627,36
Нефтепродукты	4,06	527,8	195,93	Медь	0,0226	2,938	1,09
АПАВ	1,5	195,0	72,39	Цинк	0,16	20,8	7,72
Хлориды	до 7,16	930,8	345,5	Никель	0,013	1,69	0,627
Фосфаты	до 1,0	130,0	48,26	Свинец	0,029	3,77	1,4
Сульфаты	до 9,7	1261,0	468,1	Хром	–	–	–

2.1.2 Методы и приборы лабораторных исследований

Исследования влияния электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на свойства осадков сточных вод проводились в лаборатории ОСК г. Тюмени. Лабораторные исследования выполнены с использованием различных методов по

стандартным методикам при помощи поверенных приборов, выпускаемых в России и за рубежом. Для уменьшения погрешности результатов опыты проводились не менее трёх раз при равных исходных условиях.

На первом этапе исследований микроволновая обработка осадков осуществлялась порционно в СВЧ-печи промышленного производства мощностью 0,8 кВт, частотой излучения 2450 МГц.

На втором этапе обработка осадков осуществлялась на авторской установке «ПОТОК ЭМ-1» в проточном режиме (см. п. 2.2).

Основные определяемые свойства ОСВ.

1. Влажность.

Влажность осадка (W) характеризуется отношением массы воды к общей массе влажного осадка. Влажность определяется гравиметрическим методом [39].

Используемые приборы и оборудование: весы лабораторные электронные Pioneer; баня шестиместная водяная LOIP LB-162 (ТБ-6/24); платформа нагревательная ПМД-2001; низкотемпературная лабораторная электропечь SNOI 58/350; шкаф сушильный электрический круглый 2В-151.

2. Зольность.

Зольность (Z) характеризует содержание в осадке минеральных примесей [39].

Используемые приборы и оборудование: весы лабораторные электронные Pioneer; баня шестиместная водяная LOIP LB-162 (ТБ-6/24); платформа нагревательная ПМД-2001; низкотемпературная лабораторная электропечь SNOI 58/350; шкаф сушильный электрический круглый 2В-151; электропечь муфельная лабораторная ПМ-1,0-7.

3. Плотность.

Плотность (ρ), кг/см³, характеризует массу единицы его объёма и выражается отношением массы всех составных компонентов осадка к его объёму [39].

Используемые приборы и оборудование: весы лабораторные электронные Pioneer.

4. Удельное сопротивление фильтрованию.

Величина удельного сопротивления характеризует влагоотдающие свойства осадков и показывает способность осадков отдавать влагу под действием вакуума или давления. Эта характеристика зависит от характера капилляров, сухого вещества осадка, от степени дисперсности, химического состава, вязкости, а также от соотношения свободной и связанной воды. Величина удельного сопротивления различна для осадков разного происхождения и различных сточных вод. Мало того, для одного и того же осадка она изменяется в широких пределах в зависимости от его влажности [39, 97].

Используемые приборы и оборудование: для измерения удельного сопротивления к фильтрации используется собранная автором лабораторная установка (рисунки 2.1 и 2.2).

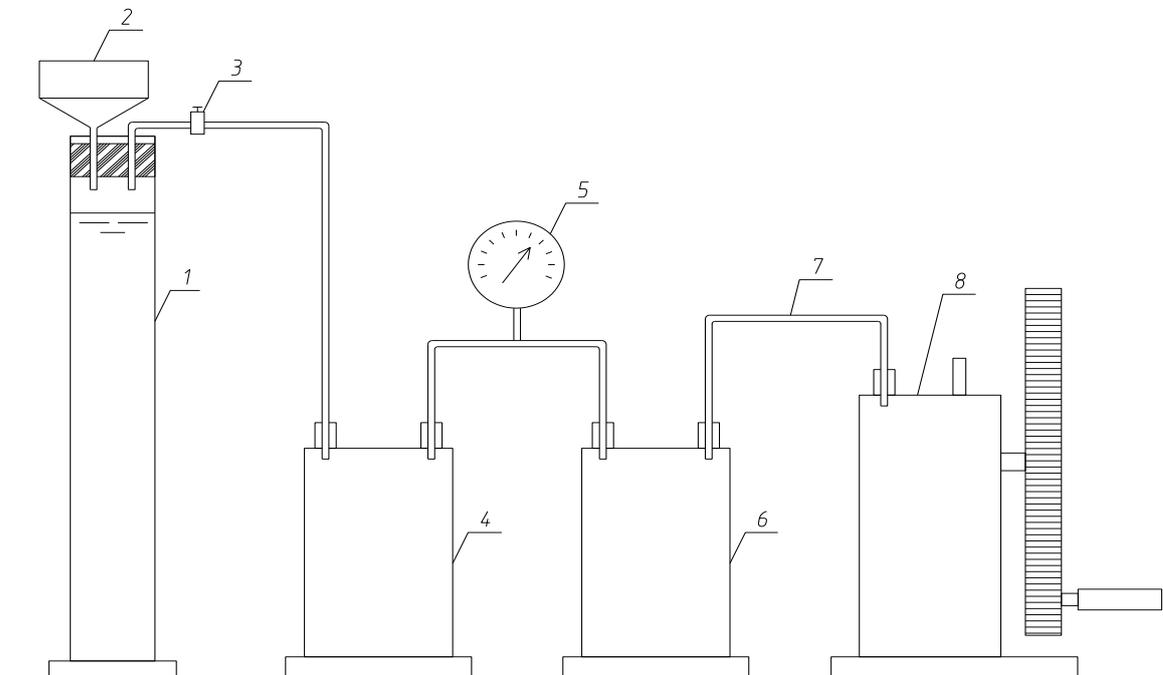


Рисунок 2.1 – Лабораторная установка для определения удельного сопротивления осадка: 1 – мерный цилиндр; 2 – воронка Бюхнера; 3 – трехходовый кран; 4 – ёмкость для сбора фильтрата; 5 – вакуумметр; 6 – ресивер; 7 – вакуумный шланг; 8 – насос Комовского



Рисунок 2.2 – Лабораторный стенд для определения удельного сопротивления осадка

5. Концентрация.

Количество находящихся в 1 м^3 осадка твёрдых частиц сухого или растворённого вещества, $\text{кг}/\text{м}^3$, называется его концентрацией (C) [39].

Используемые приборы и оборудование: весы лабораторные электронные Pioneer; баня шестиместная водяная LOIP LB-162 (ТБ-6/24); платформа нагревательная ПМД-2001; низкотемпературная лабораторная электропечь SNOL 58/350; шкаф сушильный электрический круглый 2В-151.

Дополнительные показатели качества ОСВ.

1. Высота слоя уплотнённого ОСВ.

Определение высоты слоя уплотнённого осадка:

– *без добавления флокулянта:* пробы смеси осадков помещались в стандартные лабораторные цилиндры вместимостью 1000 мл. Вариант определения № 1: в момент разделения фаз – осветлённая вода – уплотнённый осадок – при

помощи сантиметровой линейки фиксировалась высота слоя осадка. Вариант определения № 2: через каждые 0,5 часа в течение 2 часов снимали показания высоты слоя уплотнения осадков в цилиндрах;

– с использованием флокулянта «Zetag 8165»: в лабораторные цилиндры вместимостью 1000 мл помещалась смесь сырого осадка и избыточного активного ила. К смеси осадков добавляли 0,1 % раствор флокулянта, приготовленный из расчёта 3,5 г/кг или 2,0 г/кг сухого вещества. Тщательно перемешивали. Через каждые 0,5 часа в течение 2 часов снимали показания высоты слоя уплотнения осадков в цилиндрах;

– с использованием порошкообразной негашеной извести в сухом виде: к смеси осадков добавляли известь порошкообразную дозой 2 г/дм³ и тщательно перемешивали. Через каждые 0,5 часа в течение 2 часов снимали показания высоты слоя осаждения осадка в лабораторных цилиндрах.

2. Объём пробы смеси ОСВ.

Определение объёма уплотнённого осадка: пробы смеси осадков помещались в лабораторные цилиндры. В момент разделения фаз – осветлённая вода – уплотнённый осадок – визуально по градуированной шкале фиксировался объём пробы осадка.

3. Время капиллярного всасывания.

Для оценки фильтруемости осадков используют экспрессный метод, основанный на вытекании воды из осадка на фильтровальную бумагу. На ровную поверхность кладут лист фильтровальной бумаги. В цилиндрический сосуд, установленный на фильтровальную бумагу, помещают осадки. При помощи секундомера фиксируется время, необходимое для того, чтобы вода продвинулась по фильтровальной бумаге на 1 см. Это время составляет от нескольких секунд в случае осадков с эффективной предварительной обработкой до нескольких минут для осадков, из которых трудно удаляется вода [99].

4. Определение содержания примесей тяжёлых металлов.

Исследование проб надиловой воды после уплотнения смеси осадков, исходных и обработанных СВЧ-излучением, на содержание примесей тяжёлых металлов (мышьяка, никеля, ртути, свинца, цинка, хрома (+6), стронция) проводились в лицензированных лабораториях г. Тюмени: Центральной аналитической лаборатории (ООО «Тюмень Водоканал»), ФГБУ ГСАС «Тюменская», (см. приложения А–В).

5. Структура и микробиологический состав. Изучение проводилось при помощи электронного микроскопа марки Альтами БИО 8. Наблюдались изменения пространственной структуры проб смеси осадков после СВЧ-обработки и электротермического нагрева.

2.2 Установка СВЧ-обработки осадков сточных вод

Описание и принцип действия установки «ПОТОК ЭМ-1».

С целью промышленного внедрения метода микроволновой обработки осадков на канализационных очистных станциях была разработана опытная установка «ПОТОК ЭМ-1» проточного типа [32, 35, 80, 81]. Конструкция установки исключает процессы ручной загрузки/выгрузки осадков – подача жидких осадков в установке регулируется открытием/закрытием запорной арматуры на подающем трубопроводе.

Принципиальная схема опытной проточной установки «ПОТОК ЭМ-1» показана на рисунке 2.3 (фото установки – в приложении Д).

Установка для обработки осадков сточных вод включает: две камеры (1 и 2) с встроенными в них одним СВЧ-генератором (не показано), подводящий трубопровод (3) и отводящий трубопровод (4), трубопроводы обрабатываемой жид-

кой среды (5 и 6), ёмкость исходной жидкой среды (7) и ёмкость обработанной жидкой среды (8).

Камеры (1 и 2) размещены в экранирующем кожухе (9), который выполнен из стального листа. Подводящий трубопровод (3) оборудован насосом (10), обратным клапаном (11), запорно-регулирующей арматурой (12, 13, 17), средством контроля давления 14 (манометром), средством контроля температуры 15 (термометром). Отводящий трубопровод (4) оборудован средством контроля температуры (16) (термометром).

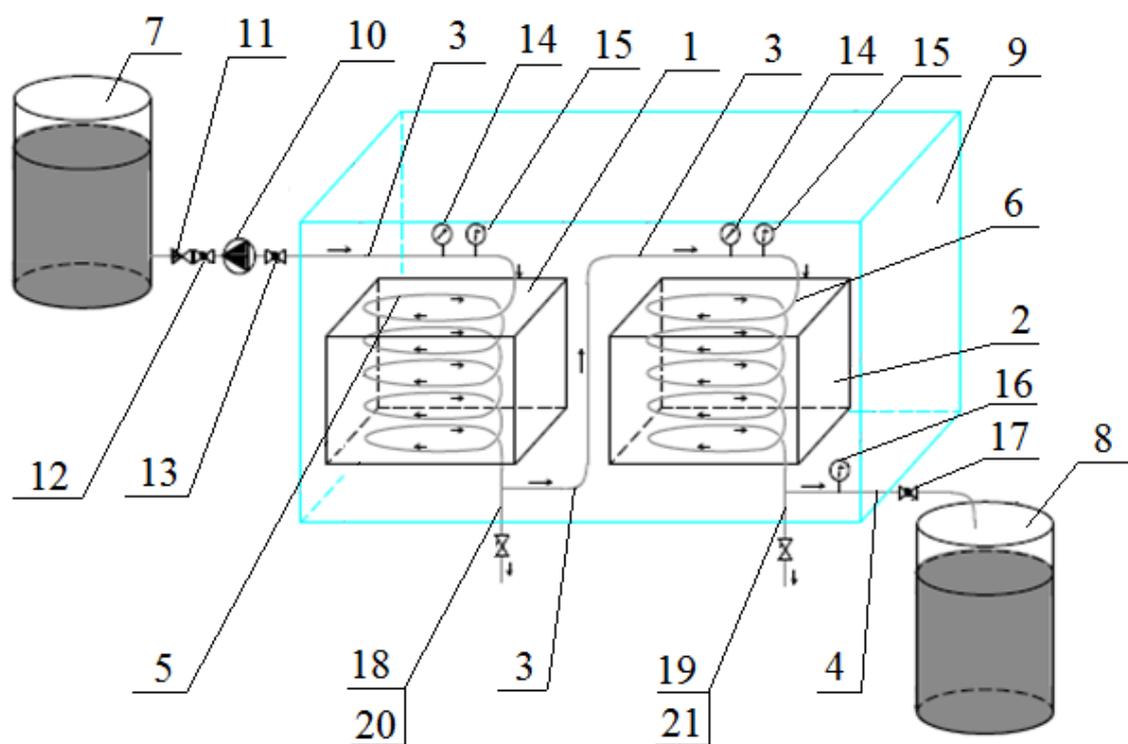


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема установки «ПОТОК ЭМ-1»

Трубопроводы обрабатываемой жидкой среды (5 и 6) выполнены в форме цилиндрической спирали из радиопрозрачного материала (из кремнийорганической силиконовой резины) и размещены вертикально внутри указанных камер (1

и 2). Трубопроводы обрабатываемой жидкой среды (5 и 6) снабжены сливными патрубками (18 и 19) с краном дренажным (20 и 21) соответственно.

Камеры (1 и 2) выполнены из металла.

Экранирующий кожух (9) – из алюминиевой фольги толщиной 0,5 мм.

Принцип действия.

Осадки сточных вод из ёмкости исходной жидкой среды подают при помощи насоса по трубопроводам в СВЧ-камеры. СВЧ-обработку жидкой среды осуществляют в две стадии последовательно, на первой стадии воздействуют в камере (1), на второй стадии – в камере (2). В камерах осадки движутся по трубопроводу обрабатываемой жидкой среды сверху вниз по спирали, при этом на них воздействует СВЧ-излучение мощностью 1 кВт (каждая камера), частотой излучения 2450 МГц. Обработку осуществляют в проточном режиме, при этом продолжительность воздействия составляет 5-10 минут до достижения требуемой температуры жидкой среды (50-85 °С). Затем обработанные осадки поступают по отводящему трубопроводу в ёмкость обработанной жидкой среды. Давление, развиваемое насосом, контролирует манометр, установленный на подводящем трубопроводе. Скорость потока жидкой среды в трубопроводах регулируют посредством запорно-регулирующей арматуры. Температуру обрабатываемой жидкой среды фиксируют термометрами.

Для полного удаления жидкой среды из трубопроводов предусмотрены сливные патрубки с краном дренажным.

Электрооборудование устройства может работать как от сети, так и от автономного источника питания.

Ниже представлены основные технические характеристики установки «ПОТОК ЭМ-1» (обоснование в приложении Г):

– обрабатываемая жидкость – смесь первичных осадков и активного ила (1:2) влажностью (W) 98-99 %;

- наружный диаметр трубопровода (D) – 28 мм;
- внутренний диаметр трубопровода ($D_{\text{вн}}$) – 20 мм;
- время обработки смеси осадков (t) – 5-10 мин;
- температура исходной смеси осадков (T) – плюс 20 °С.
- часовая производительность – 0,1 м³/ч;
- суммарная потребляемая мощность установки – 2,0 кВт;
- суммарная мощность электромагнитного излучения – 2,0 кВт;
- частота излучения – 2450 МГц;
- температура жидкой среды – от 20 до 85 °С;
- скорость движения – 0,1 м/с;
- требуемый напор – 2,5 м;
- плотность потока микроволнового излучения – от 0 до 0,03 Вт/см².

Измерение плотности потока микроволн установкой «ПОТОК ЭМ-1» было выполнено при помощи антенны измерительной рупорной П6-59 и анализатора спектра R&S FSH8 (см. приложение Д). Свидетельства о поверке № 30 000033804, № 348923. Измерения проводились на расстоянии около 1 м от работающих СВЧ-печей.

Преимущества данной конструкции установки «ПОТОК ЭМ-1» перед существующим оборудованием для обработки осадков сточных вод.

Большинство установок, выпускаемых промышленностью для обработки осадков, основано на дозированной подаче осадков в ёмкости, где происходят процессы обработки [3, 22, 26, 67, 87, 96, 106]. Такой принцип действия требует применения громоздкого, сложного и дорогостоящего оборудования, автоматизации процессов, и, как следствие, происходит значительное удорожание процесса обработки осадков в целом.

Разработанная автором установка «ПОТОК ЭМ-1» имеет проточный принцип действия, т.е. отсутствует сложное и малоэффективное ёмкостное оборудова-

ние. Она проста в эксплуатации, обладает высокой мобильностью, компактна, что позволяет использовать её при реконструкции существующей очистной станции. СВЧ-обработка осадков при помощи данной установки можно осуществлять непосредственно на трубопроводе подачи осадков, что значительно сокращает продолжительность обработки, облегчает эксплуатацию и удешевляет технологию обработки осадков. Известно, что для увеличения эффектов очистки осадков сточных вод не требуются СВЧ-генераторы высокой мощности, достаточно применения двустадийной обработки маломощным оборудованием [67].

2.3 Выводы по главе 2

1. Анализ технологии очистки сточных вод и осадков ОСК г. Тюмени показал, что на станции обеспечивается очистка сточных вод до требуемых нормативов, разрешённых для сброса очищенных сточных вод в природные водные объекты. При этом обработка и утилизация образующихся осадков осуществляется по малоэффективной и экологически небезопасной технологии – механическое обезвоживание с применением дорогостоящих флокулянтов, хранение на иловых полях с последующей утилизацией на полигонах ТБО. По причине остаточной заражённости гельминтами и содержания металлов сверх нормативов осадки недопустимо использовать в качестве удобрений. На данном этапе работы ОСК требуется разработка и внедрение комплекса мероприятий, усовершенствующих технологию обработки и утилизации осадков.

В качестве объектов исследований определены осадки очистных сооружений г. Тюмени: активный ил и смесь сырого осадка и активного ила (1:2). Лабораторные исследования по излучению влияния СВЧ-излучения на свойства осадков сточных вод выполнялись с использованием различных методов исследований по стандартным методикам при помощи поверенных приборов.

На первом этапе исследований электромагнитная обработка осадков осуществлялась порционно в СВЧ-печи промышленного производства мощностью 0,8 кВт, частотой излучения 2450 МГц. Второй этап исследований выполнен на авторской установке «ПОТОК ЭМ-1» в проточном режиме.

2. Разработанная и запатентованная автором установка «ПОТОК ЭМ-1» имеет проточный принцип действия, который позволяет осуществлять СВЧ-обработку осадков непосредственно на трубопроводе подачи осадков, что значительно удешевляет технологию обработки и сокращается продолжительность обработки. К преимуществам данной установки можно отнести: отсутствие сложного оборудования, мобильность, компактность, сокращение продолжительности обработки осадков, независимость от климатического фактора. Все это позволяет использовать её при реконструкции существующей очистной станции, на очистных станциях в северной климатической зоне. Для эксплуатации данного оборудования не требуется дополнительное обучение персонала.

3 Экспериментальные исследования процесса обработки осадков СВЧ-излучением и математическая обработка результатов

Экспериментальная часть данной работы выполнялась в аккредитованной химико-бактериологической лаборатории ОСК г. Тюмени, ООО «Тюмень Водоканал».

Место отбора проб активного ила – 3-й аэротенк, на выходе; смеси первичных осадков и избыточного активного ила в пропорции 1:2 – цех механического обезвоживания осадков (ОСК г. Тюмени).

Для уменьшения погрешности результатов опыты проводились три-пять раз при равных исходных условиях. В таблицах и графиках представлены средние результаты серии экспериментов.

Оптимальная продолжительность порционной СВЧ-обработки (3-5 минут) была определена опытным путём в зависимости от повышения температуры обрабатываемой пробы и изменения её свойств. При 1-2-минутной обработке температура осадка изменялась незначительно, объём, влажность и степень уплотнения исходного и обработанного осадка практически не менялись.

При микроволновой обработке пробы продолжительностью более 5 минут происходило значительное повышение температуры, что является нецелесообразным, т.к. ведёт к увеличению энергозатрат.

Математическая обработка данных планируемого эксперимента проводилась согласно [6, 12, 53, 61] в следующем порядке:

- проверка гипотезы о нормальном законе распределения погрешностей эксперимента;
- кодирование переменных;
- расчёт коэффициентов регрессии и получение уравнений регрессии;
- проверка адекватности математической модели.

Для обработки экспериментальных данных использовался программный продукт Microsoft Excel.

3.1 Порционная обработка осадков в СВЧ-печи промышленного производства

3.1.1 Кинетика уплотнения осадков

Серия экспериментов № 1. Изучение кинетики уплотнения активного ила, обработанного в СВЧ-печи.

Порядок и условия проведения экспериментов:

1. Производился отбор проб активного ила. Объём одной пробы – 200 мл.
2. Осуществлялось уплотнение исходного ила следующим образом: пробы помещались в лабораторные цилиндры и через определённое время (от 1 до 30 минут) фиксировалась высота слоя уплотнённого ила в цилиндрах.
3. Проводилась СВЧ-обработка проб следующим образом: пробы активного ила в жаропрочной посуде помещались в СВЧ-печь и обрабатывались (мощность и продолжительность микроволновой обработки были постоянными – 0,8 кВт и 5 минут соответственно).
4. Пробы активного ила, обработанные микроволнами, помещались в лабораторные мерные цилиндры ($V = 1000$ мл); затем, через определённое время (от 1 до 30 минут), фиксировалась высота слоя уплотнённого ила в цилиндре.

Полученные опытные данные представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Динамика снижения границы раздела фаз активного ила при уплотнении

Продолжительность уплотнения в лабораторном цилиндре, мин	Высота границы раздела фаз, см	
	исходный необработанный активный ил	активный ил, обработанный в СВЧ-печи
1	9,8	9,4
5	8,2	6,5
10	7,7	5,6
15	7,0	5,0
20	6,8	4,6
25	6,0	4,2
30	5,8	3,8

Был построен сравнительный график (рисунок 3.1), отображающий характеристики процесса уплотнения активного ила. По полученным графическим данным можно сделать вывод, что ил, обработанный СВЧ-излучением, уплотняется интенсивнее, чем исходный.

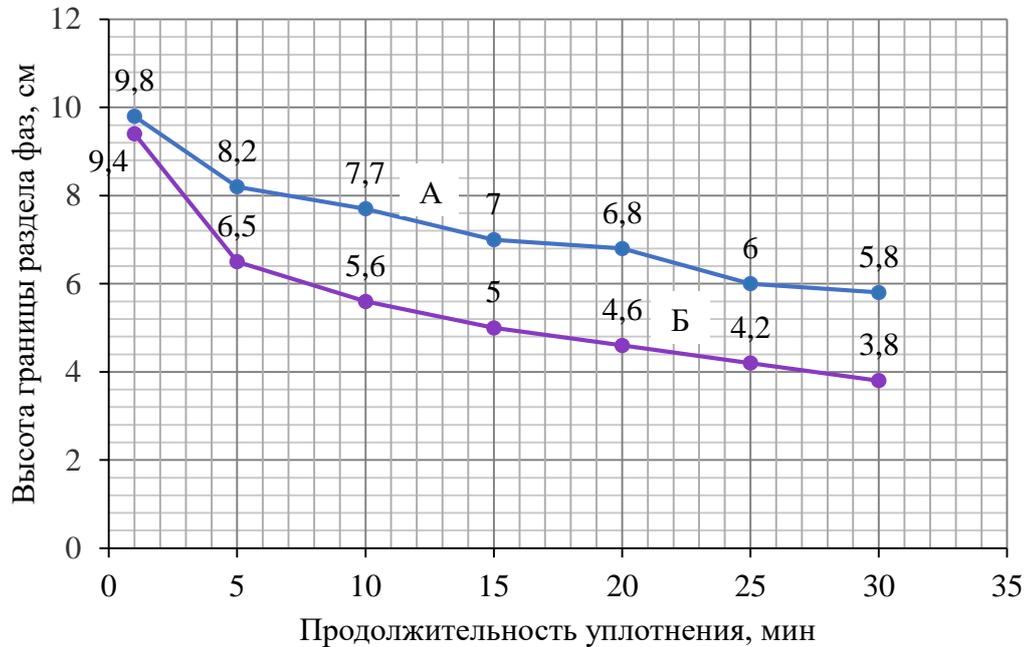


Рисунок 3.1 – Графики кинетики уплотнения активного ила: А – для исходного активного ила; Б – для активного ила после 5-минутной обработки в СВЧ-печи мощностью 0,8 кВт

В ходе экспериментов было установлено, что СВЧ-обработка интенсифицирует процесс уплотнения: активный ил, порционно обработанный в СВЧ-печи в течение 5 минут при мощности излучения 0,8 кВт при одинаковой продолжительности уплотнения, уплотняется в среднем на 34 % интенсивнее, чем ил без обработки.

Серия экспериментов № 2. Сравнение кинетики уплотнения осадков, обработанных в СВЧ-печи и после нагрева электротокком.

Порядок и условия проведения экспериментов:

1. Производился отбор проб смеси сырого осадка и активного ила, объём одной пробы – 200 мл; температура исходной смеси осадков – 22,0 °С.

2. Проведение обработки проб двумя вариантами:

№ 1 – пробы смеси осадков в жаропрочной посуде помещались в СВЧ-печь и обрабатывались до температур 30, 50, 70, 90 и 100 °С. Измерение температуры

осадков осуществлялось термометром. При этом мощность СВЧ-излучения была постоянной – 1 кВт;

№ 2 – пробы смеси осадков в жаропрочной посуде нагревались на электроустановке (настольной электроплитке Irit IR-8004) мощностью 1 кВт до тех же значений температур, что при СВЧ-обработке. Температура осадков фиксировалась термометром.

3. Пробы осадков, обработанные микроволнами и после нагрева электротокком, помещались в лабораторные мерные цилиндры ($V = 500$ мл); затем, в момент чёткого разделения фаз (через 10 мин), фиксировалась высота слоя уплотнённого осадка в цилиндре.

Полученные опытные данные представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Динамика снижения границы раздела фаз смеси осадков в результате ее уплотнения

Температура смеси осадков, °С	Продолжительность уплотнения в лабораторном цилиндре, мин	Высота границы раздела фаз, см		Эффективность СВЧ-обработки, %
		смесь осадков, обработанная в СВЧ-печи	смесь осадков, после нагрева электротокком	
30	10	12,8	13,4	4,47
50		10,5	11,8	11,02
70		8,8	11,5	23,48
90		9,0	11,4	21,05
100		8,8	11,2	21,42

На основании полученных данных построен график (рис. 3.2), отображающий характеристики процесса уплотнения смеси осадков.

Анализируя результаты проведённых экспериментов, можно сделать вывод, что степень уплотнения смеси осадков после СВЧ-обработки в среднем на 16,3 % выше, чем у осадков после нагрева электротокком.

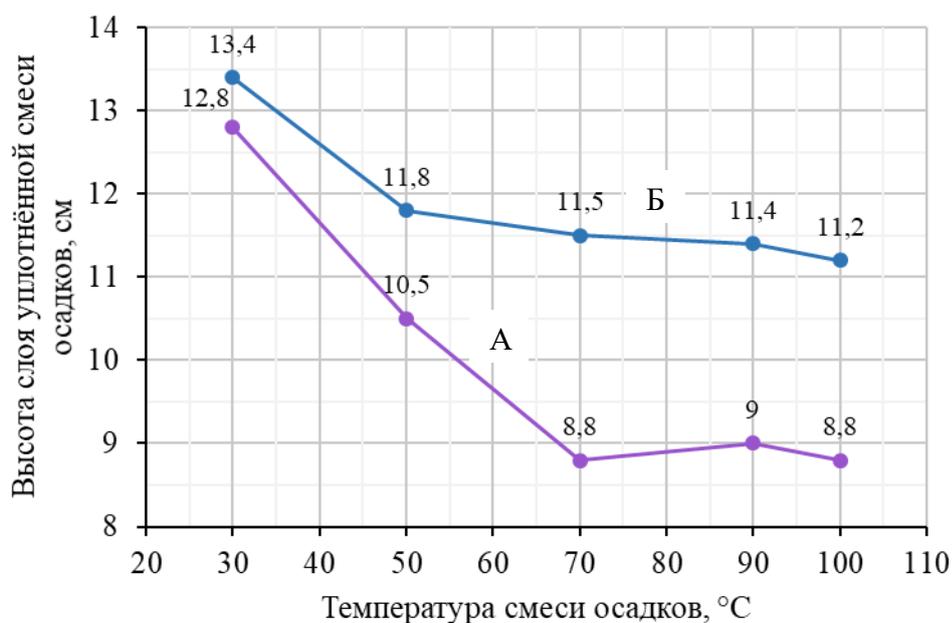


Рисунок 3.2 – Графики уплотнения смеси осадков:

А – для смеси осадков после СВЧ-обработки;

Б – для смеси осадков после нагрева электротоком

3.1.2 Влияние микроволновой обработки на высоту границы раздела фаз при уплотнении осадков

Серия экспериментов № 3. Влияние мощности и продолжительности микроволновой обработки на высоту границы раздела фаз при уплотнении смеси осадков.

Порядок и условия проведения экспериментов:

1. Производился отбор проб неуплотнённых осадков: смесь сырого осадка и активного ила. Объём одной пробы осадков – 200 мл.

2. Осуществлялось уплотнение исходных осадков следующим образом: пробы помещались в лабораторные цилиндры и в момент разделения фаз (осветлённая вода – осадок) фиксировалась высота слоя осадка в цилиндре ($H = Y_0$).

3. Осуществлялась СВЧ-обработка проб следующим образом: пробы смеси осадков в жаропрочной посуде помещались в СВЧ-печь и обрабатывались, при этом продолжительность и мощность излучения варьировались согласно двух-факторному плану эксперимента [6].

4. Пробы смеси осадков, обработанные микроволновым излучением, помещались в лабораторные мерные цилиндры ($V = 1000$ мл). Затем, в момент разделения фаз после уплотнения, фиксировалась высота слоя осадков ($H = Y_0$).

С целью изучения влияния мощности и продолжительности СВЧ-обработки на границу раздела фаз при уплотнении использовался метод статистического планирования. В качестве модели описания процесса выбран полином второй степени:

$$Y_0 = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + a_{11} \cdot X_1^2 + a_{22} \cdot X_2^2; \quad (3.1)$$

Результаты экспериментов и математической обработки приведены в таблицах 3.3–3.8.

Таблица 3.3 – Интервалы варьирования

X_i	$X_1 (t, \text{мин})$	$X_2 (N, \text{кВт})$
1	4,5	0,8
0	3,0	0,64
-1	1,5	0,48

Таблица 3.4 – Дисперсионный анализ в середине эксперимента

Обозначение H в кодированном виде	Высота слоя осадка в цилиндре (Y), см
Y_{01}	2,24
Y_{02}	2,25
Y_{03}	2,22
Y_{04}	2,26
Y_{05}	2,21
Y_{06}	2,22
Среднее значение	2,23333
Квадрат дисперсии (S^2)	0,000387
Дисперсия (S)	0,019664

Таблица 3.5 – Матрица эксперимента

Номер опыта	X_1^*	X_2^{**}	X_1X_2	X_1^2	X_2^2	Y_0^{***}	Y_p^{****}
1	-1	-1	1	1	1	3,4	3,37
2	1	1	1	1	1	1,5	1,44
3	0	0	0	0	0	2,23	2,07
4	-1	1	-1	1	1	2,9	2,93
5	-1	0	-1	1	0	3,2	3,19
6	1	-1	-1	1	1	2,3	2,19
7	1	0	0	1	0	1,7	1,86
8	0	-1	0	0	1	2,2	2,33
9	0	1	0	0	1	1,7	1,73

Примечание: * X_1 – продолжительность СВЧ-обработки, мин; ** X_2 – мощность электромагнитного излучения, кВт; *** Y_0 – высота слоя осадка в цилиндре в момент видимого раздела фаз, см (экспериментальные данные); **** Y_p – расчётная высота слоя осадка в цилиндре в момент раздела фаз, см.

Таблица 3.6 – Коэффициенты уравнения регрессии для переменных в кодированном виде

Коэффициенты	a_{22}	a_{11}	a_{12}	a_2	a_1	a_0
Значения*	-0,04333	0,456667	-0,075	-0,3	-0,66667	2,072222
t-статистика	t_{22}	t_{11}	t_{12}	t_2	t_1	t_0
Значения	-2,756	29,04	-7,63	-31,42	-69,83	172,87

Примечание: *после проверки все коэффициенты оказались значимыми, т.к. критерий Стьюдента для уровня значимости $p=0,05$ и степени свободы $9-2=7$ равен $t(7)=2,365$; все полученные значения по модулю больше табличного.

Таблица 3.7 – Коэффициенты уравнения регрессии для переменных в натуральном масштабе

Коэффициенты	b_{22}	b_{11}	b_{12}	b_2	b_1	b_0
Значения	-1,6927	0,2029	-0,3125	1,229167	-1,4622	5,1389
Стандартные значения ошибок	4,631404	0,052695	0,349322	6,035296	0,38990801	2,00198

Уравнение, описывающее зависимость высоты границы раздела фаз (слоя осадка) от продолжительности обработки и мощности микроволнами:

– в кодированном виде:

$$Y_0 = 2,072 - 0,667 \cdot X_1 - 0,3 \cdot X_2 - 0,075 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,457 \cdot X_1^2 - 0,043 \cdot X_2^2 ; \quad (3.2)$$

– в натуральном масштабе:

$$H = 5,239 - 1,46 \cdot t + 1,22 \cdot N - 0,312 \cdot t \cdot N + 0,203 \cdot t^2 - 1,693 \cdot N^2 \quad (3.3)$$

Проверка адекватности полученной модели производилась по критерию Фишера для уровня значимости $p=0,05$, результаты приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Проверка адекватности полученной модели по критерию Фишера

Показатель	Значение
Коэффициент детерминированности (R^2)	0,977414
Расчётное значение критерия Фишера	25,96504
Регрессионная сумма квадратов	3,650011
Стандартная ошибка для оценки (Y)	0,167675
Степень свободы	3
Остаточная сумма квадратов	0,084344

Табличное значение критерия Фишера при степенях свободы $f_1=3$ и $f_2=9$ равно 3,86. Полученное значение $F=25,96 > 3,86$, поэтому полученную модель (3.2 и 3.3) можно считать адекватно описывающей заданный процесс.

В ходе проведённых опытов и математической обработки результатов было установлено, что СВЧ-обработка значительно интенсифицирует процесс уплотнения смеси осадков. Для достижения максимального уплотнения осадков (высота слоя осадка 1,5 см) необходима микроволновая обработка мощностью 0,8 кВт в течение 4,5 минут.

Серия экспериментов № 4. Влияние мощности и продолжительности микроволновой обработки на высоту границы раздела фаз при уплотнении активного ила.

Порядок и условия проведения экспериментов:

1. Производился отбор проб избыточного активного ила. Объём одной пробы осадков – 200 мл.

2. Осуществлялось уплотнение исходного ила следующим образом: пробы помещались в лабораторные цилиндры, и в момент разделения фаз (осветлённая вода – осадок) фиксировалась высота слоя осадка в цилиндре.

3. Производилась обработка проб микроволнами: пробы активного ила в жаропрочной посуде помещались в СВЧ-печь и обрабатывались, при этом время и мощность излучения варьировались согласно двухфакторному плану эксперимента [6];

4. Пробы активного ила, обработанные микроволновым излучением, помещались в лабораторные мерные цилиндры ($V = 1000$ мл). Затем, в момент разделения фаз после уплотнения, фиксировалась высота слоя осадков ($H = Y_0$).

С целью изучения влияния мощности и продолжительности СВЧ-обработки на высоту границы раздела фаз при уплотнении активного ила использовался метод статистического планирования. В качестве модели описания процесса выбран полином второй степени (формула 3.1).

Результаты экспериментов и математической обработки приведены в таблицах 3.9–3.14.

Таблица 3.9 – Интервалы варьирования

X_i	$X_1 (t, \text{мин})$	$X_2 (N, \text{кВт})$
1	5	0,8
0	3,5	0,48
-1	2	0,16

Таблица 3.10 – Дисперсионный анализ в середине плана

Обозначение H в кодированном виде	Высота слоя осадка в цилиндре (Y), см
Y_{01}	5,8
Y_{02}	6,1
Y_{03}	5,7
Y_{04}	5,8
Y_{05}	6
Y_{06}	6,1
Среднее значение	5,91
Квадрат дисперсии (S^2)	0,17224
Дисперсия (S)	0,0291667

Таблица 3.11 – Матрица эксперимента

Номер опыта	X_1^*	X_2^{**}	X_1X_2	X_1^2	X_2^2	Y_0^{***}	Y_p^{****}
1	-1	-1	1	1	1	9,5	9,405556
2	1	1	1	1	1	5,4	5,538889
3	0	0	0	0	0	5,9	5,988889
4	-1	1	-1	1	1	6,1	6,272222
5	-1	0	-1	1	0	6,9	6,822222
6	1	-1	-1	1	1	7,8	7,672222
7	1	0	0	1	0	5,6	5,588889
8	0	-1	0	0	1	8,1	8,322222
9	0	1	0	0	1	6	5,688889

Примечание: X_1^* – продолжительность СВЧ-обработки, мин; X_2^{**} – мощность электромагнитного излучения, кВт; Y_0^{***} – высота слоя осадка в цилиндре в момент видимого раздела фаз, см (экспериментальные данные); Y_p^{****} – расчётная высота слоя осадка в цилиндре в момент раздела фаз, см.

Таблица 3.12 – Коэффициенты уравнения регрессии для переменных в кодированном виде

Коэффициенты	a_0	a_1	a_2	a_{12}	a_{11}	a_{22}
Значения*	5,9889	-0,61667	-1,3167	0,25	0,216671	1,0167
t -статистика	t_0	t_1	t_2	t_{12}	t_{11}	t_{22}
Значения	56,40	-7,37457	-15,3471	3,483506	1,572938*	8,106532

*Примечание: после проверки все коэффициенты, кроме a_{11} , оказались значимыми, т.к. критерий Стьюдента для уровня значимости $p=0,05$ и степени свободы $9-2=7$ равен $t(7)=2,365$; полученные значения по модулю больше табличного. Коэффициент регрессии a_{11} не значим, его в модели можно не учитывать.

Получены коэффициенты регрессии для натурального масштаба (таблица 3.13).

Таблица 3.13 – Коэффициенты уравнения регрессии для переменных в натуральном масштабе

Коэффициенты	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{22}
Значения	13,745	-1,3352	-15,4688	0,5208	9,928
Стандартные значения ошибок	1,156778	0,635236	2,144806	0,291198	1,930387

Уравнение, описывающее зависимость высоты границы раздела фаз (слоя уплотнённого ила) от продолжительности обработки и мощности микроволнового излучения, представляет собой:

– в кодированном виде:

$$Y_0 = 5,989 - 0,617 \cdot X_1 - 1,317 \cdot X_2 + 0,25 \cdot X_1 \cdot X_2 + 1,017 \cdot X_2^2 ; \quad (3.6)$$

– в натуральном масштабе:

$$H = 13,745 - 1,335 \cdot t - 15,469 \cdot N + 0,521 \cdot t \cdot N + 9,928 \cdot N^2 . \quad (3.7)$$

Проверка адекватности полученной модели производилась по критерию Фишера для уровня значимости $p=0,05$, результаты приведены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Проверка адекватности полученной модели по критерию Фишера

Коэффициент детерминированности R^2	0,984706
Расчётное значение критерия Фишера	38,63033
Регрессионная сумма квадратов	15,09444
Стандартная ошибка для оценки Y	0,27955
Степень свободы	3
Остаточная сумма квадратов	0,234444

Табличное значение критерия Фишера при степенях свободы $f_1=3$ и $f_2=9$ равно 3,86. Полученное значение $F=38,63 > 3,86$, поэтому полученную модель (3.6 и 3.7) можно считать адекватно описывающей заданный процесс.

Анализ серии экспериментов: в ходе опытов и математической обработки результатов было установлено, что микроволновая обработка интенсифицирует процесс уплотнения активного ила. Для достижения максимального уплотнения ила (высота слоя осадка 5,4 см) необходима обработка СВЧ-излучением мощностью в интервале от 0,48 до 0,8 кВт в течение 5 минут. Зависимость влияния продолжительности на степень уплотнения прямо пропорциональная: чем дольше уплотнять ил, тем лучше будет степень его уплотнения. В условиях СВЧ-печи, в сравнении со смесью осадков, активному илу для максимально возможного уплотнения необходима меньшая мощность обработки (0,48 кВт) при равной продолжительности обработки (4,5–5 минут).

3.1.3 Воздействие микроволновой обработки на влагоотдачу осадков

Серия экспериментов № 5. Влияние микроволн на удельное сопротивление фильтрации осадков.

Порядок и условия проведения экспериментов:

1. Производился отбор проб неуплотнённых осадков: смесь сырого осадка и активного ила. Объём одной пробы осадков – 100 см³.

2. Осуществлялось приготовление проб смеси осадков по трём вариантам:

№ 1 – исходная смесь осадков без какой-либо обработки;

№ 2 – смесь осадков, обработанная в СВЧ-печи, мощность излучения 0,8 кВт, продолжительность – 4 минуты;

№ 3 – смесь осадков с добавлением 0,1%-ного раствора флокулянта «Zetag 8165» дозой 25 мг/дм³.

3. Определялась влажность (W) и плотность (p) смеси осадков для каждого варианта обработки по стандартным методикам:

№ 1 – $W_{исх} = 87,89 \%$; $p = 980 \text{ кг/м}^3$;

№ 2 – $W_{СВЧ} = 86,99 \%$; $p = 1020 \text{ кг/м}^3$;

№ 3 – $W_{флок.} = 87,71 \%$; $p = 1020 \text{ кг/м}^3$.

4. При помощи лабораторного стенда для определения удельного сопротивления (см. главу 2) находили параметр b . Определение параметров b , концентрации осадка (C) и удельного сопротивления (r) выполнялось три раза при равных условиях.

Сводные данные экспериментов представлены в таблице 3.15.

Средние значения удельного сопротивления (r):

– исходная смесь осадков – $37,15 \cdot 10^{10}$ см/г;

– смесь осадков после СВЧ-обработки – $6,93 \cdot 10^{10}$ см/г;

– смесь осадков с флокулянтом «Zetag 8165» – $4,55 \cdot 10^{10}$ см/г.

На основании полученных экспериментальных данных построены сравнительные гистограммы удельного сопротивления фильтрации смеси осадков (рис. 3.3).

Таблица 3.15 – Сводные данные для определения удельного сопротивления осадка

Номер опыта	Исходная смесь осадков			Смесь осадков после микроволновой обработки			Смесь осадков с флокулянтom «Zetag 8165» дозой 25 мг/дм ³		
	<i>b</i>	<i>C</i> , г/см ³	$r \cdot 10^{10}$, см/г	<i>b</i>	<i>C</i> , г/см ³	$r \cdot 10^{10}$, см/г	<i>b</i>	<i>C</i> , г/см ³	$r \cdot 10^{10}$, см/г
1	6,83	0,108	38,57	1,62	0,1281	7,71	0,91	0,119	4,66
2	7,04	0,12	35,78	1,47	0,137	6,54	0,872	0,128	4,16
3	7,79	0,1281	37,09	1,43	0,1331	6,55	1,02	0,1292	4,82

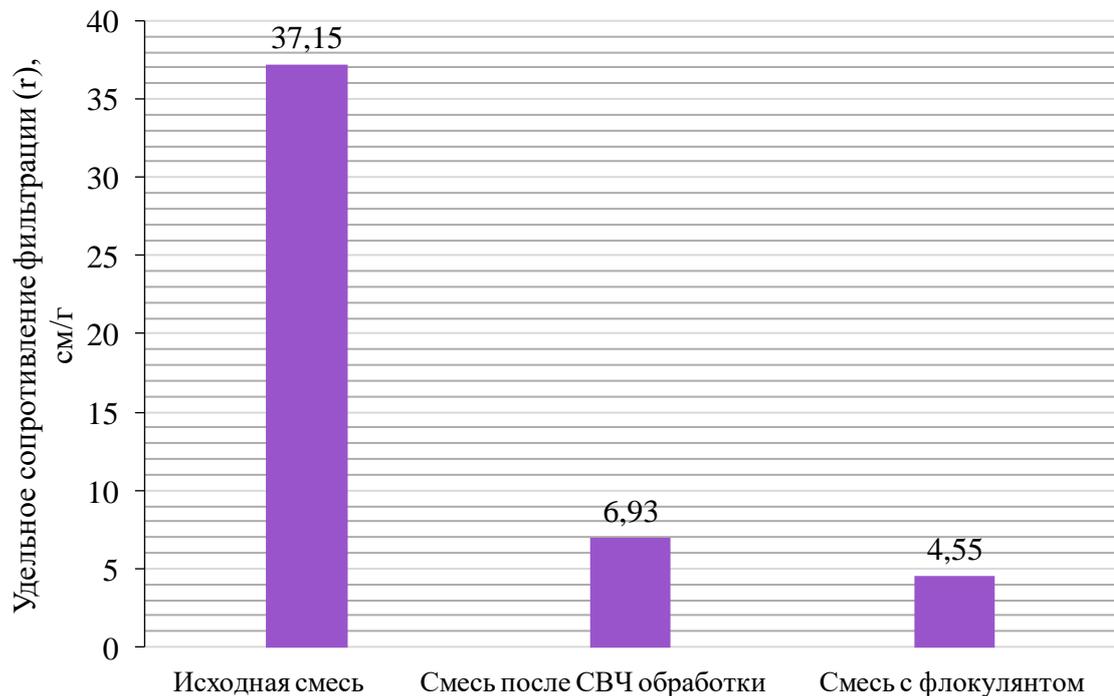


Рисунок 3.3 – Сравнительные гистограммы удельного сопротивления фильтрации смеси осадков

Анализ серии экспериментов показал, что СВЧ-обработка осадков сточных вод значительно снижает удельное сопротивление фильтрации (r): r исходных осадков (среднее) – $37,15 \cdot 10^{10}$ см/г, r осадков после микроволновой обработки (среднее) – $6,93 \cdot 10^{10}$ см/г.

Сравнение полученных значений удельного сопротивления фильтрации при обработке осадков флокулянтom «Zetag 8165» и микроволнами показало, что эффективность предлагаемого способа микроволновой обработки осадков сопоставима с традиционным реагентным методом.

Серия экспериментов № 6. Влияние СВЧ-обработки на время капиллярного всасывания.

Порядок и условия проведения эксперимента:

1. Производился отбор проб смеси неуплотнённых осадков (первичный осадок и активный ил; объём пробы – 500 мл.
2. Оценивалось время капиллярного всасывания исходной смеси осадков и смеси после микроволновой обработки согласно методике [99]. Мощность излучения была постоянна – 0,8 кВт, время обработки – 5 и 8 минут.

Результаты эксперимента представлены в таблице 3.16.

Таблица 3.16 – Изменение времени капиллярного всасывания осадков после СВЧ-обработки

Номер опыта	Время капиллярного всасывания (время продвижения осадков по фильтровальной бумаге на 1 см), с		
	исходная смесь осадков	смесь осадков после СВЧ-обработки (t = 5 мин; N = 0,8 Вт)	смесь осадков после СВЧ-обработки (t = 8 мин; N = 0,8 кВт)
1	40	35	100
2	40	40	90
3	37	33	110
4	42	30	100
5	45	25	95
6	41	33	100

На основании полученных данных построены сравнительные гистограммы времени капиллярного всасывания осадков (рис. 3.4).

В ходе опытов было установлено, что при СВЧ-обработке осадков мощностью 0,8 кВт в течение пяти минут время капиллярного всасывания уменьшается в среднем в 1,2 раза в сравнении с необработанными осадками.

Это можно объяснить тем, что в результате СВЧ-обработки часть связанной воды переходит в свободное состояние и выделяется.

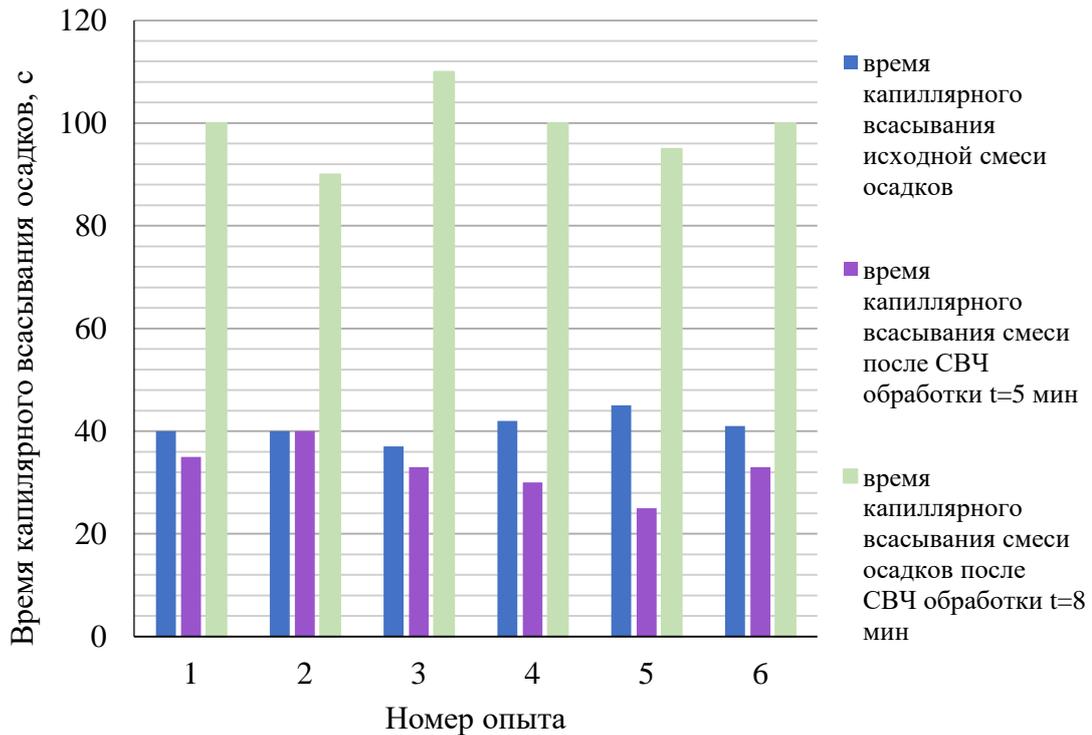


Рисунок 3.4 – Сравнительные гистограммы времени капиллярного всасывания осадков

При обработке более 8 мин время капиллярного всасывания увеличивается в среднем в 2,4 раза. Это можно объяснить тем, что в результате длительной СВЧ-обработки происходит значительное испарение влаги, осадок становится вязким.

3.1.4 Действие микроволн на объём и влажность осадков сточных вод

Серия экспериментов № 7. Влияние продолжительности обработки микроволнами на объём и влажность смеси осадков сточных вод.

Порядок и условия проведения эксперимента:

1. Производился отбор проб смеси неуплотнённых осадков (первичный осадок и активный ил); объём пробы осадков – 200 мл.
2. Определялась исходная влажность неуплотнённой смеси осадков согласно стандартной методике в трёх параллельных опытах, значение которой составило $W=96,1\pm 0,012\%$.
3. Осуществлялась обработка проб смеси осадков микроволнами в СВЧ-печи, при этом мощность излучения была постоянна – 0,8 кВт, продолжительность обработки варьировалась от 3 до 12 минут.

4. Определялся объём проб смеси осадков после обработки микроволнами: пробы осадков, обработанные в СВЧ-печи, помещались в лабораторные мерные цилиндры ($V=1000$ мл), и визуально, при помощи градуированной шкалы, фиксировался объём уплотнённого осадка в мерном цилиндре (наблюдалось видимое уменьшение объёма осадка).

5. Осуществлялось определение влажности осадков после микроволновой обработки согласно стандартной методике.

Результаты экспериментов по влиянию микроволн на объём осадков представлены в таблице 3.17.

Таблица 3.17 – Динамика изменения объёма смеси осадков после СВЧ-обработки

Номер опыта	Продолжительность обработки СВЧ-обработки, t, мин	Объём пробы осадков после СВЧ-обработки, V, мл	Эффект снижения объёма пробы осадков после СВЧ-обработки, %
1	12	125	37,5
2	11	125	37,5
3	10	130	35
4	9	130	35
5	7	135	32,5
6	6	165	17,5
7	5	180	10
8	3	180	10
9	0	200	0

На основании полученных данных построена графическая зависимость изменения объёма пробы смеси осадков от продолжительности СВЧ-обработки (рис. 3.5).

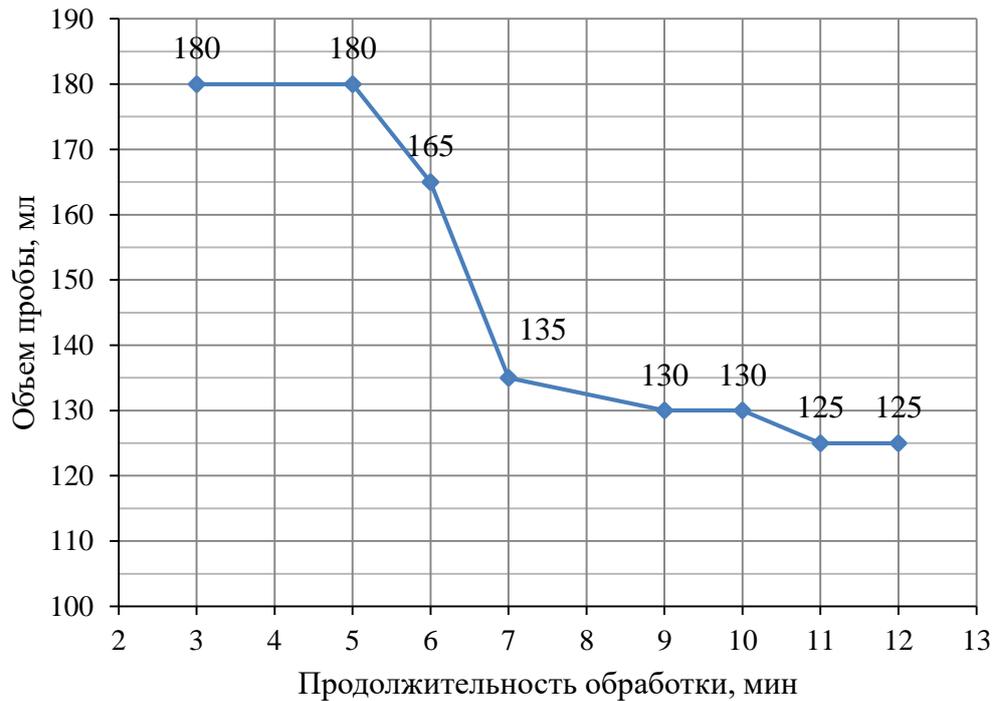


Рисунок 3.5 – График изменения объёма неуплотнённого осадка от продолжительности обработки микроволнами

Уравнение регрессии, описывающее зависимость изменения объёма осадка от продолжительности микроволновой обработки, полученное на основании результатов эксперимента, имеет вид:

$$V = 0,505 \cdot t^2 - 14,867 \cdot t + 200,65, \quad (3.10)$$

где V – объём осадка в цилиндре, мл;

t – продолжительность обработки СВЧ-обработки, мин.

Полученные коэффициенты детерминации ($R^2 = 0,91$) и корреляции (0,933) подтверждают сильную обратно пропорциональную зависимость полиномиального характера.

Расчётная t -статистика Стьюдента составляет по модулю 6,399 – больше табличного значения (2,45), это значит, что между переменными Y (V – объём) и X (t – продолжительность обработки) существует зависимость и коэффициент корреляции значим.

Экспериментальные данные влияния СВЧ-обработки на влажность смеси осадков представлены в таблице 3.18.

Таблица 3.18 – Динамика изменения влажности смеси осадков после СВЧ-обработки

Номер опыта	Продолжительность обработки микроволнами, t, мин	Влажность осадков после СВЧ-обработки, %	Эффект снижения влажности пробы осадков после СВЧ-обработки, %
1	12	91,36	4,93
2	11	91,7	4,58
3	10	91,66	4,62
4	9	92,1	4,16
5	7	93,45	2,76
6	6	93,9	2,29
7	5	94,05	2,13
8	3	94,65	1,5
9	0	96,1	0

На основании полученных данных построена графическая зависимость изменения влажности смеси осадков (рис. 3.6) от продолжительности микроволновой обработки.

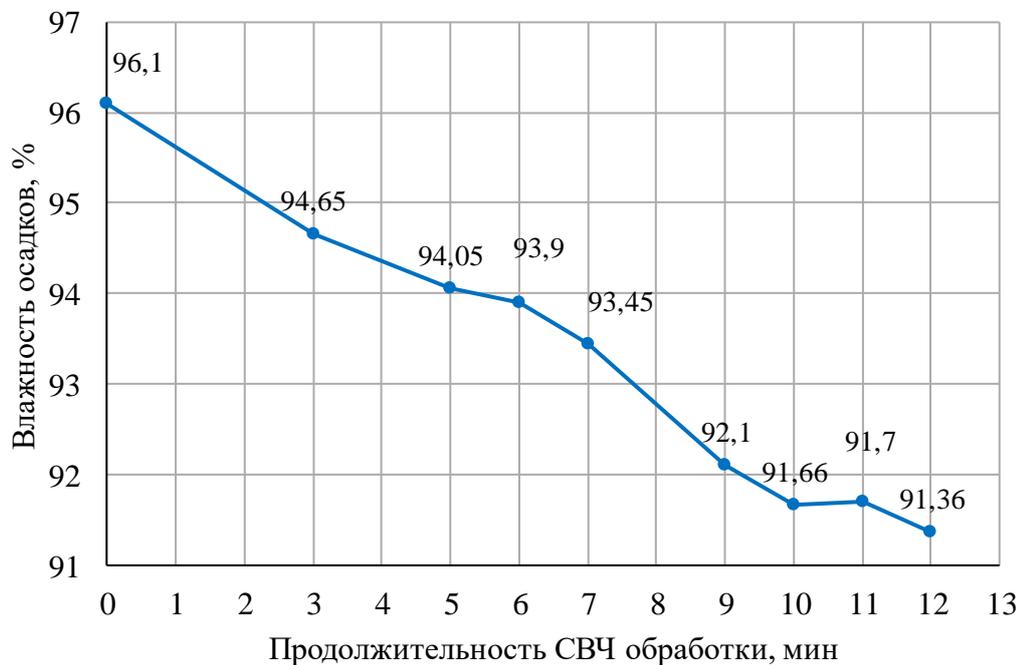


Рисунок 3.6 – График изменения влажности неуплотнённого осадка от продолжительности обработки микроволнами

Уравнение регрессии, полученное на основании результатов эксперимента, имеет вид:

$$W = 96,085 \cdot e^{-0,004t}, \quad (3.11)$$

где W – влажность осадка, %;

t – продолжительность обработки микроволнами, мин.

Адекватность полученного уравнения проверена по значимости критерия Фишера ($6,6 \cdot 10^{-5} < 0,05$).

Полученный коэффициент корреляции (0,982) подтверждает сильную обратно-пропорциональную зависимость экспоненциального характера. Расчётная t -статистика Стьюдента составляет по модулю 12,69 – больше табличного значения (2,45), это значит, что между переменными W (влажность) и t (время обработки) существует зависимость и значим коэффициент корреляции.

В ходе опытов и математической обработки результатов было установлено, что при продолжительности СВЧ-обработки от 1 до 9 мин эффективность снижения объёма пробы осадка составляет 10–35 %, при обработке от 3 до 9 мин эффективность снижения влажности от 1,5 до 4,16 %. При более длительной обработке значения объёма и влажности изменяются незначительно. При максимальном времени обработки (12 мин) объём пробы смеси осадков в результате испарения снижается на 37,5 %, влажность уменьшается на 4,93 %.

3.1.5 Оценка степени прилипания к стенке цилиндра и эффекта стабилизации осадков, обработанных микроволновым излучением

Серия экспериментов № 8. Влияние микроволн на прилипание и стабилизацию осадков сточных вод.

Порядок и условия проведения эксперимента:

1. Производился отбор проб смеси неуплотнённых осадков (первичный осадок и активный ил в пропорции 1:2); объём пробы – 200 мл.

2. Пробы проб осадков помещались в лабораторные цилиндры:

№ 1 – проба исходной смеси осадков (рис. 3.7);

№ 2 – проба смеси осадков после микроволновой обработки мощностью 0,8 кВт и продолжительностью 5 мин (рис. 3.7).

3. Через 24 часа визуально фиксировались степень прилипания осадков к стенкам цилиндров и эффекта стабилизации (рис. 3.8–3.10).



Рисунок 3.7 – Лабораторные цилиндры с осадками в начале эксперимента



Рисунок 3.8 – Степень прилипания исходных осадков к стенкам цилиндра



Рисунок 3.9 – Степень прилипания осадков к стенкам цилиндра после микроволновой обработки

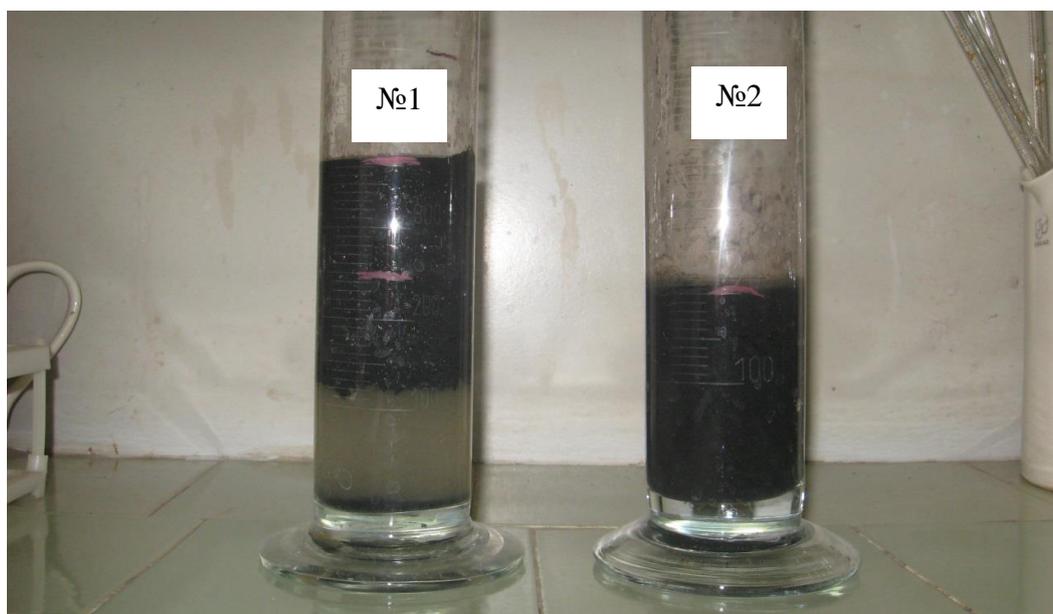


Рисунок 3.10 – Эффект стабилизации осадков через 24 часа: цилиндр № 1 – осадки без обработки; цилиндр № 2 – осадки после СВЧ-обработки

Анализ серии экспериментов: в ходе опытов было установлено, что СВЧ-обработка значительно снижает прилипание осадков к поверхности лабораторного цилиндра. За счёт разрушения органических веществ при воздействии микроволн возникает эффект стабилизации в течение длительного времени – до двух суток.

3.1.6 Влияние СВЧ-обработки на содержание в осадках сточных вод тяжёлых металлов

Серия экспериментов № 9. Воздействие микроволн на содержание тяжёлых металлов в осадках.

В работах Капустина В. И., Ольшанской Л. Н. описано, что микроволновая обработка осадков сточных вод позволяет обеспечить эффективное удаление из них примесей тяжёлых металлов с энергозатратами не более 0,05 кВт час/кг [41, 71].

Автором диссертационной работы были проведены исследования, подтверждающие эти данные.

Порядок и условия проведения эксперимента № 9.1:

1. Производился отбор проб смеси неуплотнённых осадков (первичный осадок и активный ил); объём пробы – 300 мл.
2. Осуществлялась обработка проб смеси осадков микроволновым излучением в печи мощностью 0,8 кВт и продолжительностью 10 минут.
3. Производилась промывка дистиллированной водой проб исходных осадков и осадков после СВЧ-обработки. Объём воды – 700 мл.
4. Выполнялось уплотнение промытых осадков в лабораторных цилиндрах.
5. Для оценки содержания в осадках тяжёлых металлов на исследования направлялась осветлённая вода (таблица 3.19, приложения А и Б).

Таблица 3.19 – Результаты лабораторных испытаний

Наименование показателя	Метод испытания (обозначение НД)	Результат
осветлённая вода без СВЧ-обработки		
Мышьяк, мг/дм ³	МУ 31-09/04	<0,002
Никель, мг/дм ³	МУ 31-14/06	0,011±0,003
Ртуть, мкг/дм ³	ПНД Ф 14.1:2:4.243-07	0,013±0,008
Свинец, мг/дм ³	МУ 31-03/04	0,002±0,001
Цинк, мг/дм ³	МУ 31-03/04	0,091±0,032
Хром (6+), мг/дм ³	МУК 4.1.1513-03	0,114±0,052

Окончание таблицы 3.19

Наименование показателя	Метод испытания (обозначение НД)	Результат
осветлённая вода после СВЧ-обработки		
Мышьяк, мг/дм ³	МУ 31-09/04	0,004±0,002
Никель, мг/дм ³	МУ 31-14/06	0,020±0,006
Ртуть, мкг/дм ³	ПНД Ф 14.1:2:4.243-07	0,017±0,010
Свинец, мг/дм ³	МУ 31-03/04	0,002±0,001
Цинк, мг/дм ³	МУ 31-03/04	0,009±0,002
Хром (6+), мг/дм ³	МУК 4.1.1513-03	0,218±0,100

На основании полученных лабораторных данных были построены сравнительные гистограммы содержания примесей тяжёлых металлов в осветлённой воде (рис. 3.11).

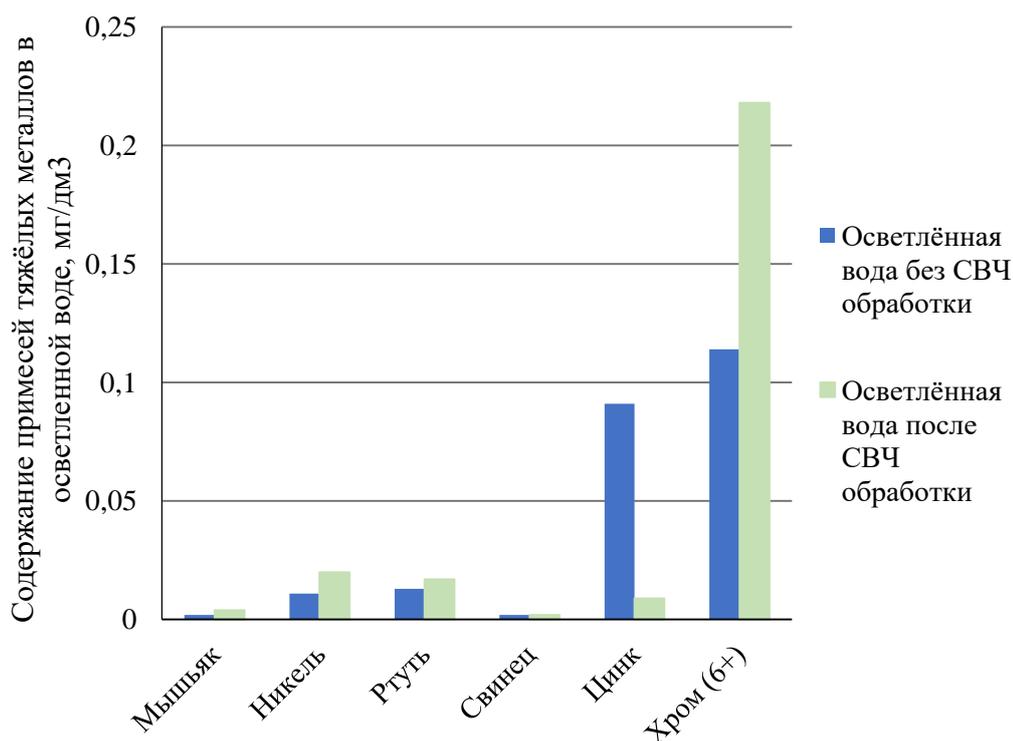


Рисунок 3.11 – Сравнительные гистограммы содержания примесей тяжёлых металлов в осветлённой воде

Анализ лабораторных испытаний показал, что СВЧ-обработка осадков сточных вод интенсифицирует выход примесей мышьяка, никеля, ртути, хрома (6+) в осветлённую воду и, как следствие, количество примесей данных тяжёлых металлов в осадках уменьшается.

Порядок и условия проведения эксперимента № 9.2:

1. Производился отбор проб смеси неуплотнённых осадков (первичный осадок и активный ил). Объём пробы осадков – 300 мл.

2. Приготовление проб смеси осадков осуществлялось по трём вариантам:

№ 1 – промывка дистиллированной водой пробы исходных осадков; СВЧ-обработка промытого осадка в СВЧ-печи в течение 7 минут; промывка дистиллированной водой и отстаивание;

№ 2 – промывка дистиллированной водой пробы исходных осадков и отстаивание;

№ 3 – промывка дистиллированной водой пробы исходных осадков. СВЧ-обработка промытого осадка в СВЧ-печи в течение 7 минут. Затем промывка дистиллированной водой и отстаивание. Повторная СВЧ-обработка промытого осадка в течение 4 мин, промывка дистиллированной водой и отстаивание.

Объём воды для промывки проб – 700 мл, мощность СВЧ-печи – 0,8 кВт.

Для оценки содержания в осадках тяжёлых металлов на лабораторные исследования направлялась осветлённая вода (см. приложение В).

Выписка из протокола испытаний представлена в таблице 3.20.

Таблица 3.20 – Результаты лабораторных исследований

Наименование определяемого показателя	Результат определения показателя		
	вариант обработки № 1	вариант обработки № 2	вариант обработки № 3
Медь, мг/дм ³	0,024±0,007	0,011±0,003	0,032±0,009
Цинк, мг/дм ³	0,16±0,03	0,15±0,03	0,22±0,04
Никель, мг/дм ³	0,044±0,013	0,040±0,012	0,046±0,014
Свинец, мг/дм ³	0,025±0,006	0,018±0,006	0,024±0,006
Кадмий, мг/дм ³	0,006±0,002	0,004±0,002	0,004±0,002
Хром, мг/дм ³	<0,01	<0,01	<0,01

На основании полученных данных были построены сравнительные гистограммы содержания примесей тяжёлых металлов в осветлённой воде (рис. 3.12).

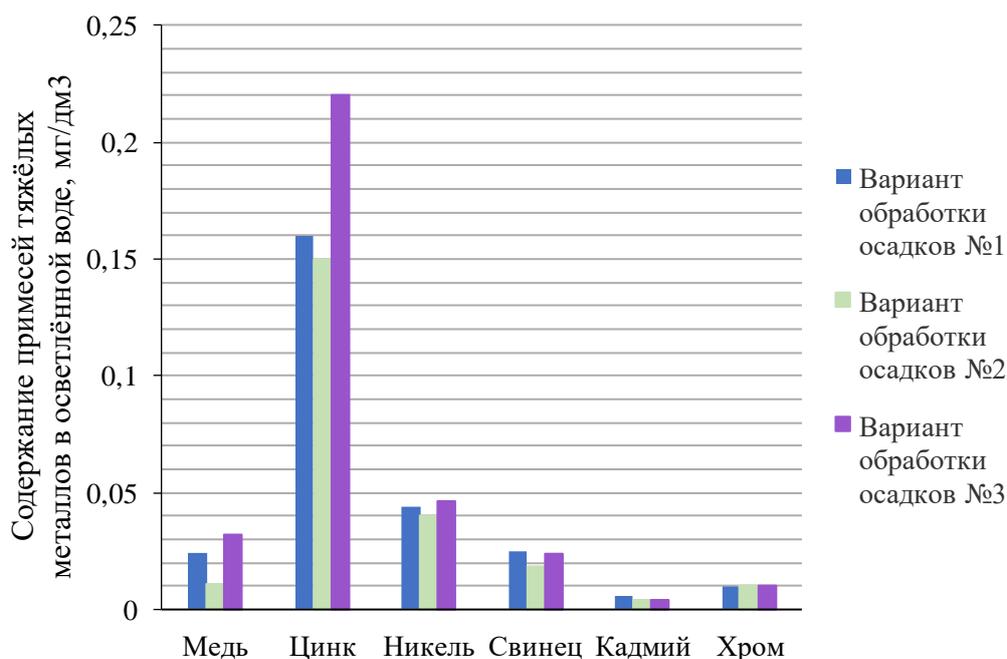


Рисунок 3.12 – Сравнительные гистограммы содержания примесей тяжёлых металлов в осветлённой воде

Анализ показал, что СВЧ-обработка осадков сточных вод интенсифицирует выход примесей меди, цинка, никеля, свинца, кадмия в осветлённую воду – наблюдается повышение содержания примесей тяжёлых металлов в иловой воде. Наиболее эффективна микроволновая обработка осадков в две стадии.

Стоит отметить, что при использовании способа СВЧ-обработки осадков с целью снижения содержания в них тяжёлых металлов в технологической схеме очистной станции необходимо предусмотреть мероприятия по очистке осветленной воды от тяжелых металлов перед ее дальнейшей обработкой или утилизацией.

3.1.7 Изучение структуры и состава осадков после микроволновой обработки

Эксперимент № 10. Оценка воздействия микроволн на структуру и состав осадков.

В ходе микробиологического изучения при помощи электронного микроскопа марки Альтами БИО 8 наблюдалось изменение пространственной структуры проб смеси осадков после СВЧ-обработки.

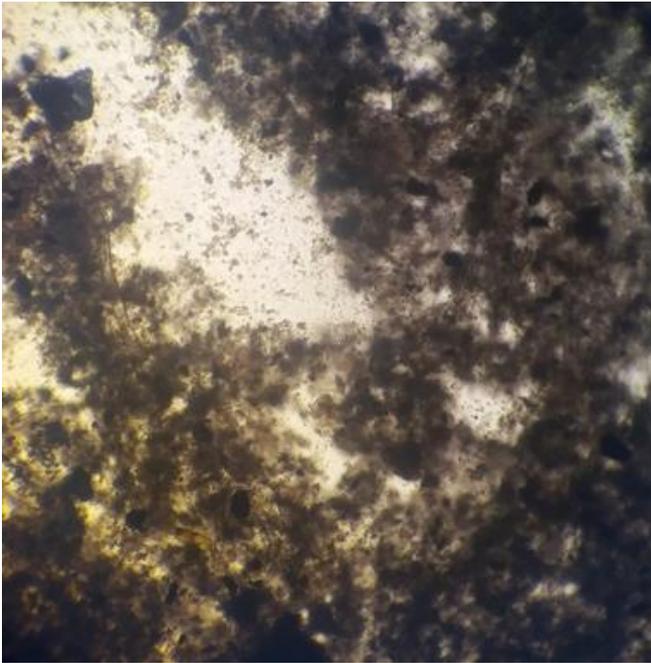


Рисунок 3.13 – Структура исходной смеси первичных осадков и активного ила

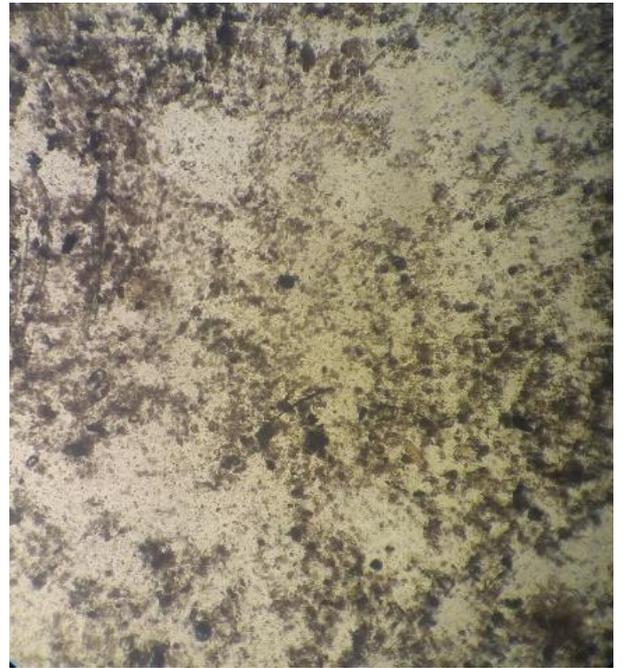


Рисунок 3.14 – Смесь осадков после СВЧ-обработки, $t=75^{\circ}\text{C}$.

На рис. 3.13 приведён снимок увеличенного в 40 раз вида структурного строения пробы смеси осадков сточных вод до обработки излучением.

Структура хлопьев осадка – неравномерная, крупнодисперсная, с отдельными крупными конгломератами, насыщенная простейшими бактериями. Видовой состав образца исходной смеси осадков, следующий: нитчатые бактерии, мелкие бентосные раковинные амёбы, свободноплавающие инфузории, аспидиски, коловратки. Видимых деформаций оболочек нет.

После обработки СВЧ-излучением сделан новый снимок пробы осадков при одинаковом увеличении, представленный на рисунке 3.14.

При анализе снимков проб смеси первичного осадка и активного ила под микроскопом до и после микроволновой обработки при достижении температуры нагрева 75°C визуально определяются значительные изменения пространственной структуры исследуемых образцов. Структура обработанного осадка становится мелкодисперсной, более равномерной, отдельные крупные иловые конгломераты распадаются. При анализе внешнего состояния бактерий наблюдаются видимые деформации их оболочек: раковины арцелл имеют искажённую форму, оболочки коловраток смяты.

Осадок после СВЧ-обработки имеет более равномерную структуру, лучше уплотняется, жизнедеятельность болезнетворных микроорганизмов значительно угнетается.

3.2 Обработка осадков микроволнами на установке «ПОТОК ЭМ-1» в проточном режиме

3.2.1 Влияние микроволновой обработки осадков сточных вод на влажность

Серия экспериментов № 11. Изучение влияния продолжительности СВЧ-обработки смеси осадков на влажность.

Порядок и условия проведения эксперимента:

1. Производился отбор проб смеси неуплотнённых осадков (первичный осадок и активный ил исходной влажностью 98,3 % объёмом 10 л.

2. Система трубопроводов установки «ПОТОК ЭМ-1» заполнялась смесью осадков сточных вод.

3. СВЧ-печи включались на полную мощность (суммарно 1,9 кВт) для предварительного прогрева на 5 минут. Затем открывался запорный вентиль, и смесь осадков проходила через установку с заданной скоростью 0,12 м/с. При этом мощность излучения была постоянной – 1,9 кВт, время обработки варьировалось от 3 до 15 минут.

4. Определялась влажность осадков после СВЧ-обработки согласно стандартной методике [39].

Результаты эксперимента занесены в таблицу 3.21.

Таблица 3.21 – Изменение влажности осадков в результате микроволновой обработки

Номер опыта	Продолжительность микроволновой обработки, t, мин	Влажность смеси осадков после микроволновой обработки, %	Эффект снижения влажности осадков, %
1	0	98,3	0
2	3	97,87	0,44
3	6	97,7	0,61

Окончание таблицы 3.21

Номер опыта	Продолжительность микроволновой обработки, t, мин	Влажность смеси осадков после микроволновой обработки, %	Эффект снижения влажности осадков, %
4	9	97,17	1,15
5	12	96,67	1,66
6	15	96,5	1,83

На основании полученных данных построен график зависимости изменения влажности осадков (рис. 3.15) от продолжительности обработки на установке «ПОТОК ЭМ-1».

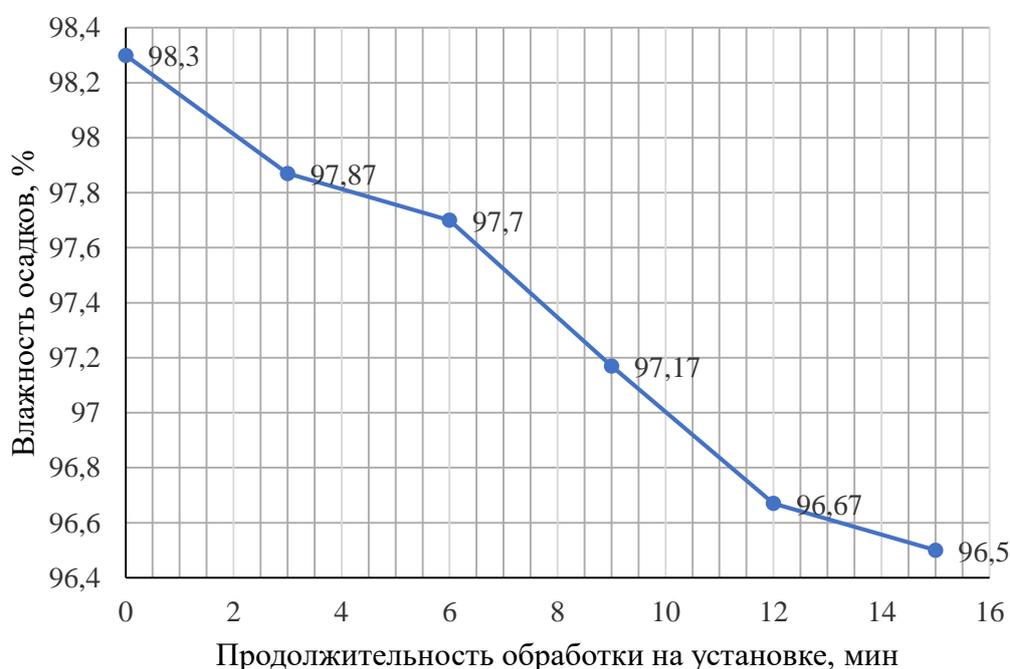


Рисунок 3.15 – График изменения влажности осадков от продолжительности обработки на установке «ПОТОК ЭМ-1»

Экспериментальные данные описывает уравнение экспоненциального вида

$W=f(t)$:

$$W = 98,309e^{-0,001t} \quad (3.12)$$

При этом коэффициент детерминированности равен $R^2=0,98$, и это подтверждает функциональную зависимость влажности осадка (W) от продолжительности микроволновой обработки (t).

В ходе эксперимента было установлено, что обработка на проточной установке «ПОТОК ЭМ-1» влияет на изменение влажности смеси первичного осадка и активного ила. Эффективность снижения влажности за 15 минут обработки составляет 1,83 %. Оптимальное время обработки – 10-12 минут, т.к. при более длительной обработке возрастают энергозатраты, а влажность при этом снижается незначительно.

Это сопоставимо с результатами экспериментов на СВЧ-печи и подтверждает выводы, сделанные на основании исследования порционных обработок осадков сточных вод.

3.2.2 Сравнение эффективности микроволнового излучения и реагентной обработки осадков

Серия экспериментов № 12. Сравнение влияния микроволн и флокулянта «Zetag 8165» на кинетику уплотнения активного ила.

Порядок и условия проведения эксперимента:

1. Производился отбор проб активного ила. Объём одной пробы – 600 мл.
2. Готовился 0,1%-ный раствор флокулянта «Zetag 8165» по стандартной методике.
3. Осуществлялось приготовление проб смеси осадков по трём вариантам:
№ 1 – исходный активный ил без какой-либо обработки;
№ 2 – активный ил, обработанный микроволновым излучением на установке «ПОТОК ЭМ-1», мощностью 1,9 кВт, продолжительность обработки – 7 минут;
№ 3 – активный ил, обработанный СВЧ-излучением в течение 7 минут с добавлением 0,1%-ного раствора флокулянта «Zetag 8165» дозой 2,0 г/кг сухого вещества.
4. Пробы осадков помещались в лабораторные цилиндры. В течение двух часов через каждые 30 минут фиксировался объём уплотнённого осадка, мл.

Результаты экспериментов представлены в таблице 3.22.

Таблица 3.22 – Кинетика уплотнения избыточного активного ила

Продолжительность уплотнения, мин	Объём уплотнённого активного ила, мл, по вариантам		
	№ 1 (исходный активный ил)	№ 2 (активный ил после микроволновой обработки в течение 7 мин)	№ 3 (активный ил после микроволновой обработки в течение 7 мин с добавлением флокулянта «Zetag 8165»)
0	600	580*	580*
2	560	140	120
30	165	130	100
60	140	120	100
90	125	120	100
120	125	120	100

Примечание: *580 – объём пробы активного ила после обработки микроволнами вследствие испарения уменьшается. Начальный объём всех проб – 600 мл.

Были построены графики изменения объёма уплотнённого ила в зависимости от способа обработки (рис. 3.16).

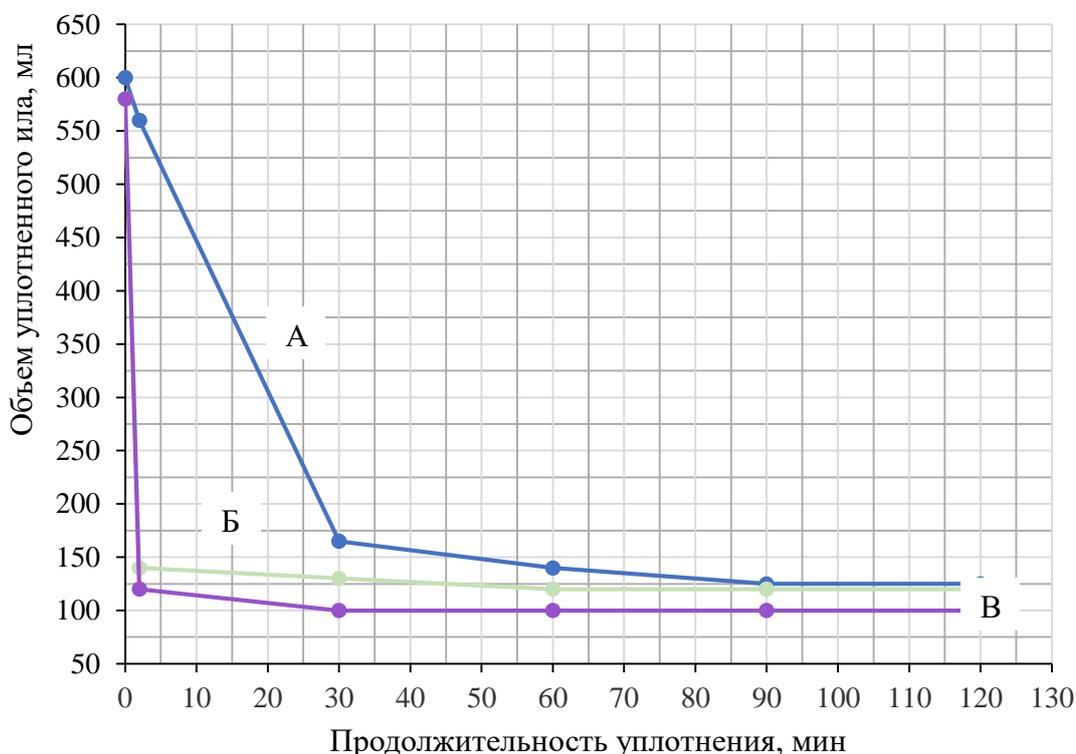


Рисунок 3.16 – Сравнительные графики уплотнения активного ила для различных вариантов обработки: А – исходный активный ил; Б – активный ил после обработки микроволнами в течение 7 мин; В – активный ил после микроволновой обработки продолжительностью 7 мин с добавлением флокулянта

В результате проведённых исследований установлено, что для сокращения продолжительности уплотнения активного ила наиболее эффективными оказались варианты обработок № 2 и 3, в которых использовали микроволновое излучение.

Исходный активный ил без какой-либо обработки достигал необходимой степени уплотнения за первые 60 минут. Пробы после СВЧ-обработки уплотнялись значительно интенсивнее за первые 2-3 минуты. Снижение объёма при двухчасовом уплотнении ила без обработки составило 79,2 %; при использовании только микроволн снижение объёмов произошло на 75,86 %; при использовании комбинированного варианта обработки (микроволновая обработка и флокулянт) на 82,8 %.

Серия экспериментов № 13. Оценка влияния микроволн и флокулянта «Zetag 8165» на кинетику уплотнения смеси осадков сточных вод.

Порядок и условия проведения эксперимента 13.1:

1. Производился отбор проб смеси неуплотнённых осадков (первичный осадок и активный ил влажностью 97÷98 %); объём одной пробы – 1000 мл.

2. Выполнялось приготовление проб смеси осадков по четырём вариантам:

№ 1 – осадки без какой-либо обработки;

№ 2 – осадки с добавлением 0,1%-ного раствора флокулянта «Zetag 8165» дозой 3,5 г/кг сухого вещества;

№ 3 – смесь осадков с добавлением порошкообразной негашеной извести в сухом виде 2 г/дм³;

№ 4 – осадки после 10-минутной обработки на установке «ПОТОК ЭМ-1» при мощности 1,9 кВт.

3. Осуществлялось уплотнение проб в стандартных мерных цилиндрах рабочим объёмом 1000 мл. В течение трёх часов через каждые 30 мин фиксировался объём уплотнённого осадка.

Погрешность результатов проверялась в трёх параллельных опытах и находится в допустимых пределах ($\pm 15 \div 29$ мл).

Результаты исследований занесены в таблицу 3.23.

Таблица 3.23 – Результаты экспериментальных исследований

Продолжительность уплотнения, час	Объёмы уплотнённых осадков, мл			
	№ 1 (без обработки)	№ 2 (с добавлением флокулянта «Zetag 8165» 3,5 г/кг)	№ 3 (с добавлением извести 2 г/дм ³)	№ 4 (обработка микроволнами на установке «ПОТОК ЭМ-1» t = 10 мин)
0	1000	1000	1000	1000
0,5	925	910	950	845
1	890	810	910	740
1,5	855	720	890	650
2	835	670	880	610
2,5	815	650	870	600
3	810	650	870	600

На основании полученных данных были построены сравнительные графики изменения объёма уплотнённых осадков от продолжительности уплотнения для всех четырёх вариантов проб ($V=f(t)$), представленные на рисунке 3.17.

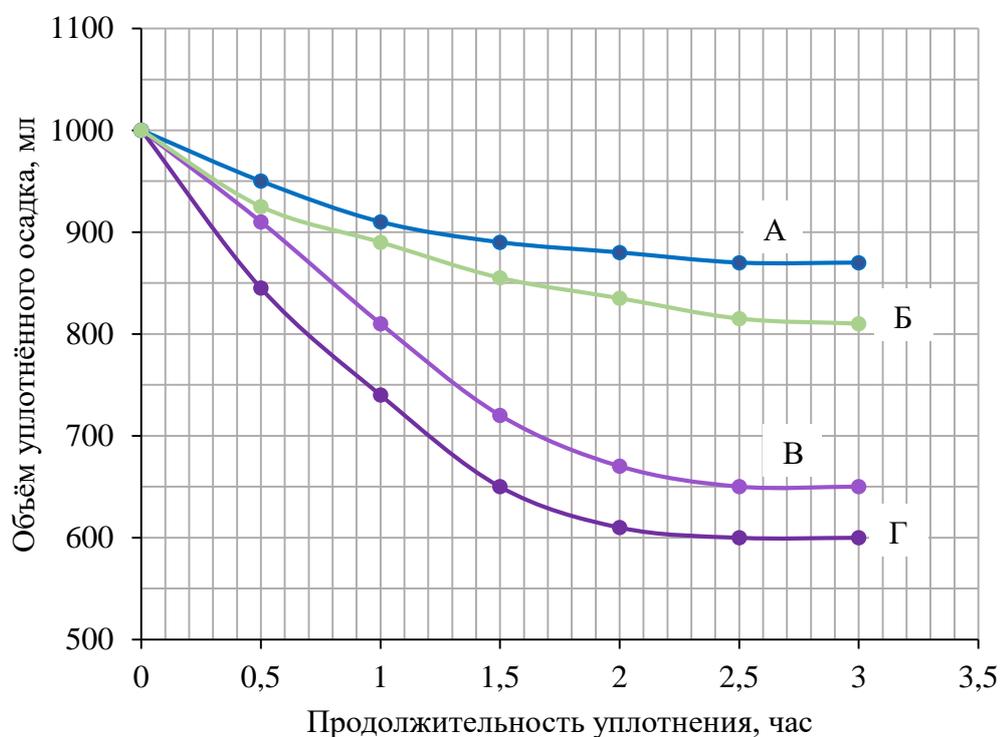


Рисунок 3.17 – Сравнительные графики уплотнения осадков: А – без какой-либо обработки; Б – с добавлением извести дозой 2 г/л; В – с добавлением 0,1%-ного раствора флокулянта «Zetag 8165» дозой 3,5 г/кг; Г – после 10-минутной обработки на установке «ПОТОК ЭМ-1»

Оптимальная продолжительность уплотнения для выбранных методов интенсификации уплотнения осадков приведена в таблице 3.24.

Таблица 3.24 – Оптимальная продолжительность уплотнения с применением различных методов обработки

Показатель	Объёмы уплотнённых осадков, мл			
	№ 1 (без обработки)	№ 2 (с добавлением флокулянта «Zetag 8165» 3,5 г/кг)	№ 3 (с добавлением извести 2 г/дм ³)	№ 4 (обработка микроволнами на установке «ПОТОК ЭМ-1» t=10 мин)
Продолжительность уплотнения, час	3	2,5	3	2
Минимальный объём осадков, мл	810	650	870	610
Уравнения регрессии	$V = 972e^{-0,045t_y}$	$V = 917e^{-0,096t_y}$	$V = 967e^{-0,068t_y}$	$V = 960e^{-0,154t_y}$
Коэффициенты детерминированности	$R^2=0,857$	$R^2=0,876$	$R^2=0,921$	$R^2=0,924$

В ходе анализа результатов эксперимента было установлено, что эффективность уплотнения осадков, обработанных на установке «ПОТОК ЭМ-1» сопоставима с обработкой флокулянтам «Zetag 8165». При этом степень уплотнения выше на 7,6 %.

Также можно сделать вывод, что микроволновая обработка значительно эффективнее обработки негашеной известью (степень уплотнения после обработки микроволнами выше на 25 %).

Оптимальная продолжительность уплотнения после микроволнового воздействия – 2 часа. Это в 1,5 раза меньше, чем для уплотнения исходного необработанного осадка, а степень уплотнения при этом выше на 30 %.

Порядок и условия проведения эксперимента 13.2:

1. Производился отбор проб осадков: смесь осадков из первичных отстойников и избыточного активного ила (исходная влажность 97÷98 %).
2. Готовился 0,1%-ный раствор флокулянта «Zetag 8165» (по стандартной методике).

3. Готовились различные варианты обработки проб смеси осадков:

№ 1 – исходная смесь осадков из первичных отстойников и избыточного активного ила до обработки;

№ 2 – смесь осадков, обработанная СВЧ-излучением в установке «ПОТОК ЭМ-1» мощностью 1,9 кВт, продолжительность обработки – 7 минут;

№ 3 – смесь осадков с добавлением 0,1%-ного раствора флокулянта «Zetag 8165» дозой 3,5 г/кг сухого вещества;

№ 4 – комбинированный вариант: смесь осадков, обработанная микроволнами в течение 5 минут, с добавлением 0,1%-ного раствора флокулянта «Zetag 8165» дозой 2,0 г/кг сухого вещества.

4. Пробы осадков различных вариантов обработки помещались в стандартные цилиндры и уплотнялись в течение двух часов с фиксацией объёмов уплотнённых осадков через равные промежутки времени.

Результаты экспериментов приведены в таблице 3.25 и на рис. 3.18.

Таблица 3.25 – Результаты экспериментальных исследований

Продолжительность уплотнения, мин	Объём уплотнённых осадков, мл, по вариантам:			
	№ 1 (исходная смесь осадков)	№ 2 (смесь осадков после микроволновой обработки, 7 мин)	№ 3 (смесь осадков с добавлением флокулянта «Zetag 8165» 3,5 г/кг)	№ 4 (смесь осадков после микроволновой обработки, 5 минут с добавлением флокулянта «Zetag 8165» 2,0 г/кг)
0	600	530*	590*	515*
30	600	520	585	510
60	600	510	580	500
90	600	500	577	500
120	600	500	575	495

Примечание: * объём пробы осадков после СВЧ-обработки вследствие испарения влаги значительно уменьшается. Начальный объём всех проб – 600 мл.

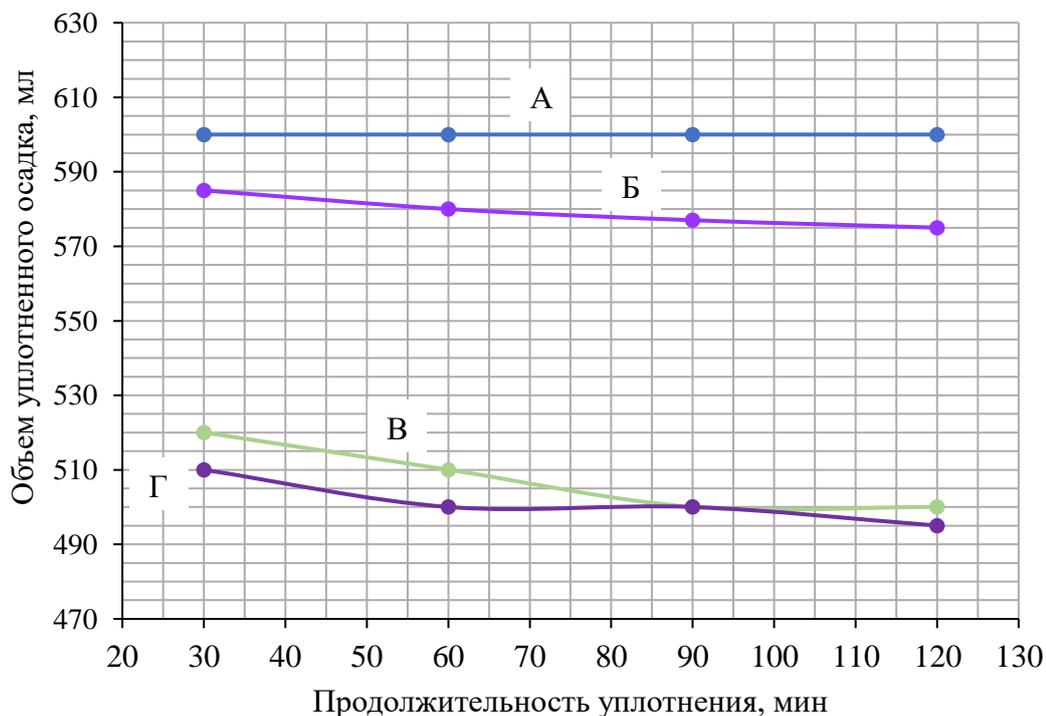


Рисунок 3.18 – Сравнительные графики уплотнения осадков различных вариантов обработки: А – исходная смесь осадков; Б – смесь осадков после микроволновой обработки продолжительностью 7 мин; В – смесь осадков с добавлением флокулянта «Zetag 8165» 3,5 г/кг; Г – смесь осадков после 5-минутной микроволновой обработки с добавлением флокулянта «Zetag 8165» 2,0 г/кг

В результате проведённых исследований установлено, что наиболее эффективными оказались варианты обработки осадков № 2 и 4, в которых использовалась микроволновая обработка. При использовании только микроволновой обработки (вариант № 2) снижение объёмов произошло на 16,6 %. При применении комбинированного варианта обработки (вариант № 4) объёма пробы осадков уменьшался на 17,5 %. Снижение объёма при обработке только реагентами составило 4,16 % (вариант № 3).

Таким образом, в данной серии экспериментов установлено, что для уменьшения объёма осадков и улучшения процесса уплотнения микроволновая обработка не менее эффективна, чем традиционный реагентный способ.

3.3 Выводы по главе 3

1. В ходе экспериментальных исследований при порционной обработке осадков в СВЧ-печи микроволнами установлено, что:

- интенсифицируется процесс уплотнения активного ила в среднем на 34 % в сравнении с илом без обработки;

- повышается степень уплотнения смеси осадков в среднем на 16,3 % при сопоставлении с осадками после нагрева электротоком;

- значительно снижается удельное сопротивление фильтрации, время капиллярного всасывания уменьшается в среднем в 1,2 раза в сравнении с необработанными осадками. При этом эффективность предлагаемого способа микроволновой обработки осадков сопоставима с традиционным реагентным методом;

- при продолжительности СВЧ-обработки осадков от 1 до 9 мин эффективность снижения объёма пробы осадка составляет 10-35 %;

- снижается прилипание осадков к поверхности лабораторного цилиндра. За счёт разрушения органических веществ при воздействии микроволн возникает эффект стабилизации в течение длительного времени;

- интенсифицируется выход примесей меди, цинка, никеля, свинца, кадмия в осветлённую воду – наблюдается повышение содержания примесей тяжёлых металлов в иловой воде. Наиболее эффективна микроволновая обработка осадков в две стадии;

- структура обработанного микроволнами осадка становится мелкодисперсной, более равномерной, отдельные крупные иловые конгломераты распадаются. Наблюдаются видимые деформации оболочек бактерий, а также значительно угнетается жизнедеятельность болезнетворных микроорганизмов. Осадок после СВЧ-обработки имеет более равномерную структуру, лучше уплотняется.

2. В результате обработки осадков микроволнами на установке «ПОТОК ЭМ-1» в проточном режиме установлено, что:

- снижается влажность осадков за 15 минут обработки на 1,83 %;

- эффективность микроволн для сокращения объёмов и улучшения уплотнения осадков сопоставима с традиционной реагентной обработкой. При этом степень уплотнения выше на 7,6 %.

3. Выполненные экспериментальные исследования подтверждают, что использование микроволнового излучения повышает эффективность обработки

осадков сточных вод. Экспериментальные данные, полученные при порционной обработке осадков в СВЧ-печи и на проточной установке «ПОТОК ЭМ-1» сопоставимы.

4 Техничко-экономические расчёты экологической эффективности обработки осадков СВЧ-излучением

Обработка и утилизация осадков сточных вод имеют важное значение для экономики РФ. В настоящее время затраты на строительство канализационных очистных сооружений и их эксплуатацию весьма обременительны для бюджетов городов и промышленных предприятий. Если и в дальнейшем мероприятия по охране водных источников будут направлены только на всё более глубокую очистку сточных вод, то сооружения обработки осадков будут разрастаться и станут преобладать по капитальным вложениям. Выходом из этого положения является создание безотходных производств с эффективной утилизацией как жидких, так и твёрдых отходов [10, 26, 44, 52, 70].

Эффект от утилизации осадков сточных вод складывается из следующих составляющих:

- уменьшения антропогенного загрязнения окружающей среды;
- сокращения (или исключения полностью) объёмов осадков, размещаемых на полигонах, следовательно, уменьшения площади земли, занимаемой жидкими коммунальными отходами;
- включения продуктов переработки осадков в состав сырьевой базы региона;
- уменьшения затрат на перевозку осадков в случае их утилизации в непосредственной близости от КОС.

В данной главе выполнено сравнение технико-экономических показателей традиционного реагентного метода и предлагаемого способа обработки осадков СВЧ-излучением, проведён расчёт предотвращённого экологического ущерба, предложены варианты технологических схем обработки осадков с использованием оборудования для данного способа и разработан паспорт предлагаемого метода обработки осадков (см. приложение Е). В паспорте технологии (метода) отражены

сущность, достоинства и недостатки, рекомендации по внедрению и эксплуатации, факторы воздействия на персонал и окружающую природную среду.

Все расчёты выполнены по типовым методикам определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и определения предотвращённого экологического ущерба [14, 55, 109], а также на основании реальных технологических и экономических данных проекта «Схема водоснабжения и водоотведения для муниципальных нужд пос. Боровский Тюменского района Тюменской области», разработанного ООО «ЛЕКС-Консалтинг» (г. Тюмень) [92].

4.1 Сравнение технико-экономических показателей традиционного реагентного метода и способа обработки осадков микроволновым излучением

Рассмотрим два варианта обработки и утилизации осадков (существующий на очистной станции и внедряемый) и сравним эффективность каждого из них.

Вариант № 1. Утилизация осадков на иловых полях с частичным обезвоживанием с добавлением реагента (существующая схема на КОС МУП «ЖКХ п. Боровский»). Сущность технологии: производительность очистной станции в 2018 году составила 5 620 тыс. м³/год (около 15 400 м³/сут). Объём образующихся осадков – около 40 м³/сут. ОСВ частично подвергаются механическому обезвоживанию с добавлением флокулянта «Zetag 8165». Большая часть (без какой-либо обработки) вывозится на иловые поля. Обезвоживанию подвергается порядка 10 м³/сут осадков. Обезвоженный осадок также самосвалами направляется на иловые поля. Площадь иловых карт 5,0 га. Осадки с иловых полей вывозятся редко – 1 раз в 17 лет.

Вариант № 2. Вторичное использование осадков после микроволновой обработки при биологической рекультивации земель, нарушенных при строительстве и прокладке коммуникаций в районе поселка городского типа Боровский Тюменского района (внедрение предлагаемого метода обработки осадков). Сущность технологии: осадки на специальных установках подвергаются микроволновой

обработке, затем осуществляется механическое обезвоживание. Кек вторично используется для рекультивации нарушенных земель в районе поселка Боровский Тюменского района.

Расчёт затрат по варианту № 1.

Затраты на обработку и утилизацию осадков по существующей схеме на КОС пос. Боровский включают в себя: затраты на электрическую энергию, на реагентное хозяйство, стоимость текущего ремонта, заработную плату персонала, транспортные расходы, амортизационные отчисления и прочие расходы. Расчёт затрат приведён в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Затраты на обработку и утилизацию осадков по существующей схеме на КОС пос. Боровский (уровень цен на 2018 г.)

Наименование	Ед. изм.	Показатель	Примечания
Электроэнергия: годовой расход электроэнергии, потребляемой при работе КОС и обезвреживании осадка	тыс. кВт/год	23,1	Тариф – 3,8 руб. за 1 кВт/ч (по данным энергосбытовой компании АО «ВОСТОК»)
Стоимость электроэнергии	тыс. руб./год	87,8	
Реагентное хозяйство: годовой расход флокулянта «Zetag 8165»	тыс. кг/год	2,774	Стоимость флокулянта «Zetag 8165» – 400 руб./кг
Стоимость флокулянта «Zetag 8165»	тыс. руб./год	1 109,6	
Численность персонала:			
– ИТР	чел.	1	–
– основной технический персонал	чел.	3	
– водители	чел.	1	
– вспомогательные службы	чел.	1	
Заработная плата	тыс. руб./год	3 000,0	
Стоимость топлива	тыс. руб./год	873,6	Стоимость топлива за 1 л – 44 руб.

Окончание таблицы 4.1

Наименование	Ед. изм.	Показатель	Примечания
Амортизационные отчисления [102]	тыс. руб./год	61,3	–
Стоимость текущего ремонта	тыс. руб./год	150	–
Прочие затраты	тыс. руб./год	28,5	–
Всего эксплуатационных расходов	тыс. руб./год	5 310,8	–
Себестоимость обработки и утилизации 1 м ³ осадков	руб./год	363,75	На ОСК пос. Боровский в сутки образуется 40 м ³ осадков; в год – 14,6 тыс. м ³

Расчёт стоимости флокулянта «Zetag 8165» (п. 2). Объём осадков - 40 м³/сут. На 1 м³ осадков требуется около 0,19 кг флокулянта, тогда в сутки расход флокулянта составит: $40 \times 0,19 = 7,6$ кг; в год – 2 774 кг. Стоимость флокулянта «Zetag 8165» – от 400 руб./кг. Годовая стоимость – $2\,774 \times 400 = 1\,109\,600$ рублей.

Расчёт стоимости топлива (п. 5). Перевозка осадка осуществляется специализированными машинами (самосвалами КамАЗ) на иловые карты. Расстояние от ОСК до иловых карт около 3 км. Средний расход топлива на 1 км составит 3,2 л. На холостом ходу (при загрузке и разгрузке осадка) тратится примерно 2 л на 1 км [85]. За рейс от ОСК до иловых полей и обратно расходуется 27,2 л. За день расход составляет $27,2 \times 2 = 54,4$ л, за год – $54,4 \times 365 = 19\,856$ л. При цене дизеля 44 руб./л стоимость топлива составит $19\,856 \times 44 = 873\,664$ рублей.

Расчёт затрат по варианту № 2.

Обработка осадков СВЧ-излучением и утилизация при рекультивации нарушенных земель включают в себя: затраты на электрическую энергию, стоимость текущего ремонта, заработную плату персонала, транспортные расходы, амортизационные отчисления и прочие расходы.

Затраты на обработку осадков приведены в таблице 4.2 (уровень цен на 2018 г.).

Таблица 4.2 – Затраты на обработку и утилизацию осадков при внедрении способа обработки осадков СВЧ-излучением

Наименование	Ед. изм.	Показатель	Примечание
Электроэнергия: годовой расход электроэнергии, потребляемой при работе КОС и обезвреживании осадка	тыс. кВт/год	10,50	Тариф – 3,8 руб. за 1 кВт/ч (по данным энергосбытовой компании АО «ВОСТОК»)
Стоимость электроэнергии	тыс. руб./год	39,9	
Электроэнергия: годовой расход электроэнергии на метод обработки осадков СВЧ-излучением	тыс. кВт/год	21,9	Три установки микроволновой обработки осадков мощностью 2 кВт каждая, время работы в сутки 10 ч
Стоимость электроэнергии	тыс. руб./год	83,22	
Численность персонала:			
– ИТР	чел.	1	
– основной технический персонал	чел.	1	
– водители	чел.	1	
– вспомогательные службы	чел.	1	
Заработная плата	тыс. руб./год	2 040,0	
Стоимость топлива	тыс. руб./год	219,6	Стоимость топлива за 1 л – 44 руб.
Амортизационные отчисления [102]	тыс. руб./год	22,5	Стоимость оборудования для микроволновой обработки осадков входит в амортизационные отчисления
Стоимость текущего ремонта	тыс. руб./год	105,0	
Прочие затраты	тыс. руб./год	20,0	
Всего эксплуатационных расходов	тыс. руб./год	2 530,22	

Окончание таблицы 4.2

Наименование	Ед. изм.	Показатель	Примечание
Себестоимость обработки и утилизации 1 м ³ осадков	руб./год	173,3	На ОСК пос. Боровский в сутки образуется 40 м ³ осадков; в год – 14,6 тыс. м ³ .

Расчёт стоимости топлива (п. 5). Затраты на перевозку – это существенная часть расходов на утилизацию осадков. Расстояние от КОС пос. Боровский до мест рекультивации почв – около 2 км. Перевозка обезвоженного осадка осуществляется самосвалами КамАЗ. Средний расход топлива на 1 км составляет 3,2 л. На холостом ходу (при загрузке и разгрузке осадка) тратится примерно 2 л на 1 км [85]. За рейс от КОС до мест рекультивации и обратно расходуется 10,4 л. За день расход составляет $10,4 \times 2 = 20,8$ л, за год – $20,8 \times 240 = 4\,992$ л. При цене дизеля 44 руб./л стоимость топлива составит $4\,992 \times 44 = 219\,648$ рублей в год.

4.2 Предотвращённый экологический ущерб в результате внедрения способа СВЧ-обработки осадков и их вторичном использовании

Эффективность природоохранных мероприятий определяется как соотношение результата от проведения мероприятий по охране окружающей среды и затрат на их осуществление.

В данном расчёте в качестве результата будет рассматриваться предотвращённый экологический ущерб, который рассчитывается по действующей методике [55].

При размещении осадков сточных вод по существующей технологии на иловых площадках ежегодно необходимо отчуждать около 1,0 га, тогда как при вторичном применении в среднем за год будет отчуждаться менее 0,2 га (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Распределение площади ежегодно отчуждаемых земель при размещении осадков на иловых площадках и при вторичном использовании

Варианты размещения осадков	Площадь ежегодно отчуждаемых земель, га	Площадь земель, сохранённых от деградации при вторичном использовании осадков, га	Площадь земель, на которых удалось уменьшить площади объектов для размещения отходов
Иловые площадки	1,5	–	–
Вторичное использование при рекультивации земель	менее 0,2	1,3	1,5

Расчёт предотвращённого экологического ущерба от деградации земель и в результате уменьшения площади объектов для размещения отходов выполнен по формулам:

$$y_{\text{пр}d}^n = y_{\text{уд}r}^n \cdot \sum_j S_j \cdot K_{nj}, \quad (4.1)$$

$$y_{\text{пр}c}^n = y_{\text{уд}r}^n \cdot \sum_j S_j \cdot K_{nj}, \quad (4.2)$$

где $y_{\text{уд}r}^n$ – показатель удельного ущерба;

S_j – площадь земель j -го типа, сохранённых от деградации в результате природоохранной деятельности, га;

K_{nj} – коэффициент природно-хозяйственной значимости почв и земель j -го типа.

Значения $y_{\text{уд}r}^n$ и K_{nj} приняты из источника [58].

Тогда:

$$y_{\text{пр}d}^n = 26 \text{ (тыс. руб./га)} \cdot 1,5 \text{ (га)} \cdot 2,2 = 85,8 \text{ (тыс. руб.)},$$

$$y_{\text{пр}c}^n = 26 \text{ (тыс. руб./га)} \cdot 1,3 \text{ (га)} \cdot 2,2 = 74,36 \text{ (тыс. руб.)}.$$

Суммарный предотвращённый экологический ущерб в результате осуществления данного природоохранного мероприятия (вторичное использование осадков) ($Y_{\text{пр}}^n$):

$$Y_{\text{пр}}^n = Y_{\text{пр}d}^n + Y_{\text{пр}c}^n, \quad (4.3)$$

$$Y_{\text{пр}}^n = 85,8 + 74,36 = 160,16 \text{ (тыс. руб.)}.$$

Эффективность природоохранных мероприятий рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{Y_{\text{пр}}^n}{Z}, \quad (4.4)$$

где $Y_{\text{пр}}^n$ – суммарный предотвращённый экологический ущерб в результате осуществления данного природоохранного мероприятия;

Z – затраты на его осуществление.

Эффективность утилизации осадка при вторичном использовании для рекультивации нарушенных земель будет равна:

$$\mathcal{E} = \frac{160,16 \text{ (тыс. руб.)}}{173,3 \text{ (тыс. руб.)}} = 0,92 = 92 \%$$

Приведённые расчёты и полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что утилизация осадков сточных вод при рекультивации нарушенных земель приносит МУП ЖКХ «п. Боровский» выгоду. Расчёты показали, что на 1 рубль вложенных затрат приходится до 92 рубля эффекта (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – ТЭП двух вариантов обработки и утилизации осадков сточных вод

Наименование	Ед. изм.	Метод обработки осадков СВЧ-излучением и вторичное использование	Существующая схема обработки и утилизации осадков на ОСК п. Боровский
Себестоимость обработки и утилизации 1 м ³ ОСВ	руб./год	173,3	363,75
Затраты на обработку и утилизацию ОСВ	тыс. руб./год	2 530,22	5 310,8

Окончание таблицы 4.4

Наименование	Ед. изм.	Метод обработки осадков СВЧ-излучением и вторичное использование	Существующая схема обработки и утилизации осадков на ОСК пос. Боровский
Затраты на обработку и утилизацию ОСВ с учётом предотвращённого экологического ущерба	тыс. руб./год	2 370,06	–
Площадь ежегодно отчуждаемых земель	га	менее 0,2	1,5
Площадь земель, сохранённых от деградации при вторичном использовании осадков	га	1,3	0
Предотвращённый экологический ущерб от деградации земель и в результате уменьшения площади объектов для размещения отходов	тыс. руб.	160,16	0
Эффективность природоохранных мероприятий	%	92	0

4.3 Варианты технологических схем обработки осадков с использованием метода микроволнового излучения

Применение предлагаемого способа обработки осадков и установок типа «ПОТОК ЭМ-1» зависит от многих факторов: производительности станции, количества и качества образующихся осадков, от местных условий и ресурсов, возможности вторичного использования и требований к утилизации отходов. Для реализации способа обработки осадков СВЧ-излучением предлагается два возможных варианта технологических схем обработки осадков:

№ 1 – для КОС производительностью не более 200 м³/сут, с количеством образующегося осадка не более 4 м³/сут (рисунок 4.1);

№ 2 – для КОС производительностью более 200 м³/сут, с количеством образующегося осадка более 4 м³/сут (рисунок 4.2).

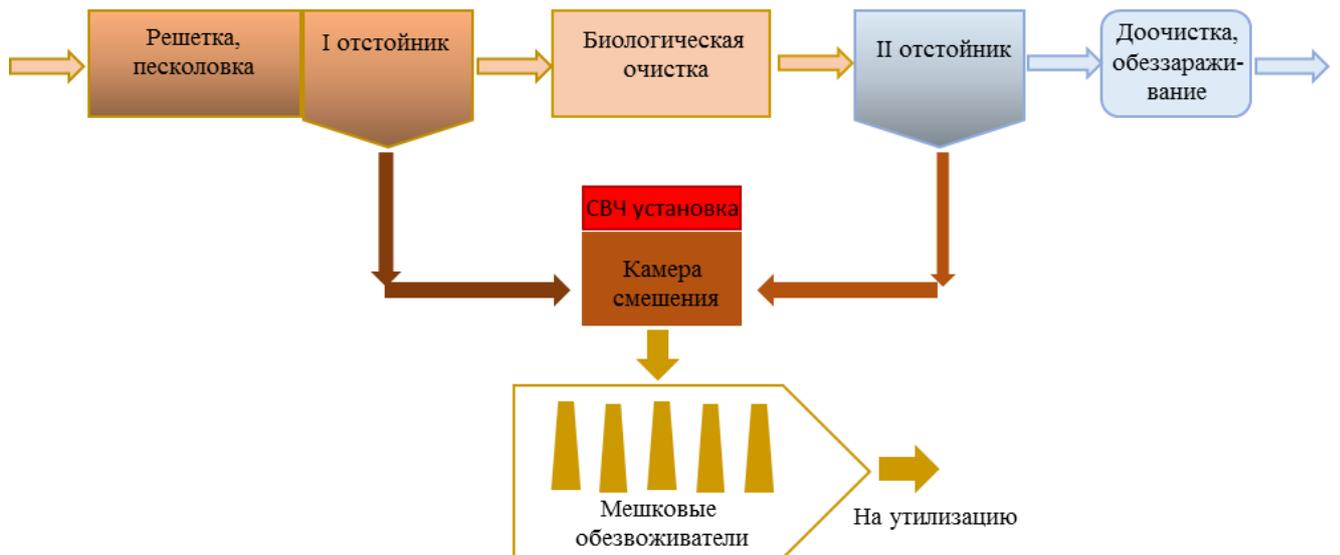


Рисунок 4.1 – Вариант № 1. Технологическая схема обработки осадков сточных вод для станций производительностью до $200 \text{ м}^3/\text{сут}$ с количеством осадка не более $4 \text{ м}^3/\text{сут}$

Для станций производительностью не более $200 \text{ м}^3/\text{сут}$ предлагается использование конструкции установки типа «ПОТОК ЭМ-1» в качестве одной из основных единиц оборудования для обработки осадков сточных вод. В данной технологической схеме предполагается микроволновая обработка смеси первичных осадков и избыточного активного ила.

Далее осадок, прошедший обработку, будет обезвоживаться в специальных иловых мешках, затем складироваться на иловых площадках или в шламонакопителях с целью обезвоживания и сокращения объёмов. Осадки после обезвоживания могут вторично использоваться, например, при рекультивации земель.

Для станций производительностью более $200 \text{ м}^3/\text{сут}$ предлагается использование конструкции установки типа «ПОТОК ЭМ-1», но с большей производительностью. Для этого необходимо усовершенствовать конструкцию разработанной установки, увеличив её пропускную способность.

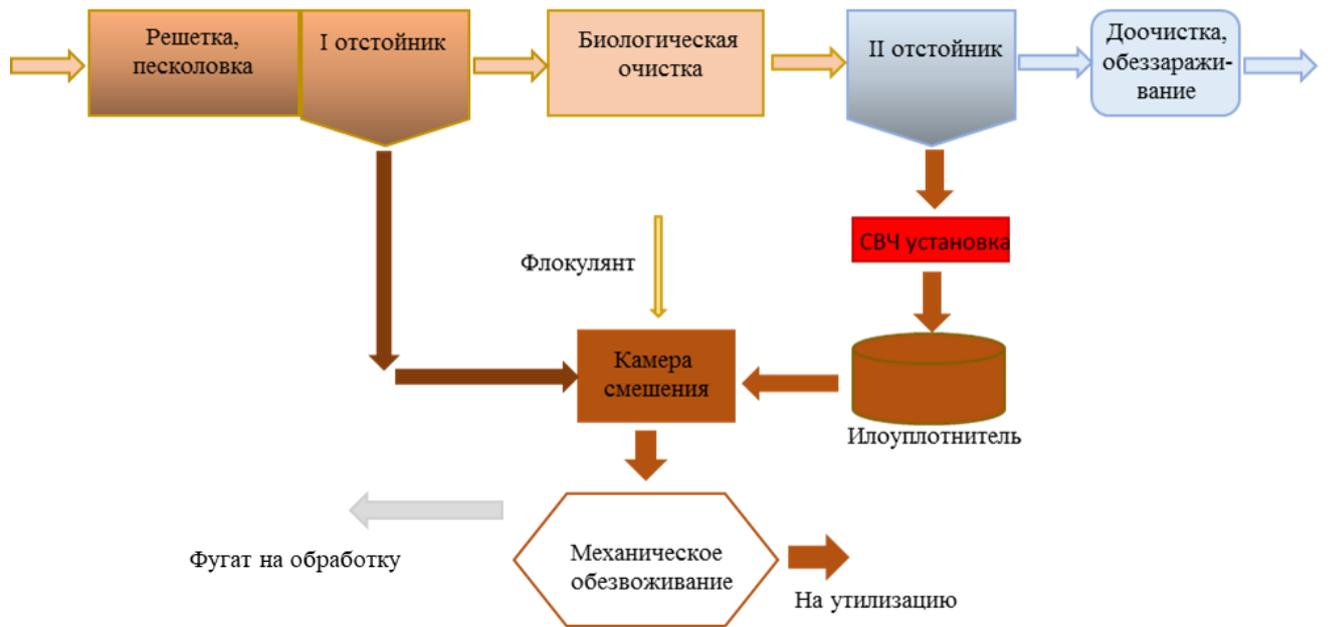


Рисунок 4.2 – Вариант № 2. Технологическая схема обработки осадков сточных вод для станций производительностью более 200 м³/сут с количеством осадка более 4 м³/сут

В предлагаемой схеме микроволновой обработке подвергается избыточный активный ил, далее смесь первичного осадка и активного ила после обработки реагентом направляется на механическое обезвоживание. Осадок, прошедший обработку, будет складироваться на специальных площадках или в шламонакопителях. Вода (фугат), образующаяся в процессе обезвоживания, для снижения содержания тяжёлых металлов, обрабатывается реагентами и возвращается в «голову» сооружений.

При экономическом обосновании возможен вариант обработки СВЧ-излучением смеси первичных осадков и избыточного активного ила. В этом случае осадки могут быть пригодны для вторичного использования.

4.4 Выводы по главе 4

1. На основании технико-экономических расчётов сравнения двух вариантов обработки и утилизации осадков сточных вод – существующего сегодня на КОС пос. Боровский и предлагаемого метода обработки осадков СВЧ-излучением –

можно сделать вывод о том, что внедрение предлагаемого метода обработки является эффективным природоохранным мероприятием и экономически наиболее выгодным. При этом предотвращённый экологический ущерб равен 160,16 тыс. рублей, себестоимость обработки и утилизации 1 м³ осадков составляет 173,3 руб./год, что в 2 раза меньше, чем при существующей схеме обработки осадков с использованием флокулянтов.

2. Для внедрения СВЧ-способа предложены два варианта технологических схем обработки осадков сточных вод поселений с использованием установок типа «ПОТОК ЭМ-1» (на станциях производительностью по воде – не более 200 м³/сут и осадку – не более 4 м³/сут) и для станций производительностью более 200 м³/сут с количеством осадка более 4 м³/сут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально доказана эффективность применения СВЧ-излучения для обработки осадков сточных вод в условиях порционной обработки, а именно:

– интенсифицируется процесс уплотнения активного ила после микроволновой обработки в среднем на 34 % в сравнении с илом без обработки;

– повышается степень уплотнения смеси осадков в среднем на 16,3 % при сопоставлении с осадками после нагрева электротоком;

– при продолжительности СВЧ-обработки осадков от 1 до 9 мин эффективность снижения объёма пробы осадка составляет 10-35 %, при обработке от 3 до 9 мин эффективность снижения влажности от 1,5 до 4,16 %;

– значительно снижается удельное сопротивление фильтрации, время капиллярного всасывания уменьшается в среднем в 1,2 раза в сравнении с необработанными осадками;

– интенсифицируется выход примесей мышьяка, никеля, ртути, хрома (6+) в осветлённую воду – наблюдается повышение содержания примесей тяжёлых металлов в иловой воде;

– структура обработанного микроволнами осадка становится мелкодисперсной, более равномерной, отдельные крупные иловые конгломераты распадаются. Наблюдаются видимые деформации оболочек бактерий, а также значительно угнетается жизнедеятельность болезнетворных микроорганизмов.

2. Разработана и запатентована конструкция проточной установки СВЧ-обработки осадков «ПОТОК ЭМ-1». При помощи натурного эксперимента доказана работоспособность предлагаемого технического решения. В результате расчётов и экспериментов определены оптимальные конструктивные и технологические параметры.

Принцип действия установки позволяет осуществлять СВЧ-обработку непосредственно на трубопроводе подачи осадков, что значительно удешевляет технологию и сокращается продолжительность обработки. К преимуществам данной установки можно отнести: отсутствие сложного оборудования, высокую мобильность, компактность, независимость от климатического фактора. Все это позволяет использовать её при новом строительстве, реконструкции существующей очистной станции, на очистных станциях в северной климатической зоне.

3. В результате сравнения СВЧ-обработки осадков на проточной установке и традиционной реагентной обработки определено, что эффективность этих двух методов сопоставима, при этом степень уплотнения при СВЧ-обработке выше на 7,6 %.

4. Выполнены сравнительные технико-экономические расчёты существующей технологии обработки и утилизации осадков и предлагаемого метода обработки осадков СВЧ-излучением для канализационной очистной станции пос. Боровский Тюменского района. Доказано, что метод СВЧ-обработки является эффективным природоохранным мероприятием и экономически наиболее выгодным. При этом предотвращённый экологический ущерб равен 160,16 тыс. рублей, себестоимость обработки и утилизации 1 м³ осадков составляет 173,3 руб./год, что в 2 раза меньше, чем при существующей схеме обработки осадков с использованием флокулянтов.

5. Предложены варианты технологических схем канализационных очистных станций малой и средней производительности с применением способа СВЧ-обработки осадков.

6. Разработан паспорт технологии (метода), в котором отражены сущность, достоинства и недостатки, рекомендации по внедрению и эксплуатации, факторы воздействия на персонал и окружающую природную среду.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Исследование возможности использования осадков сточных вод, обработанных СВЧ-излучением в качестве удобрений.
2. Изучение влияния микроволнового излучения на свойства осадков водопроводных станций.
3. Расчёт и обоснование технических характеристик установки СВЧ-обработки осадков большей производительности, чем «ПОТОК ЭМ-1».

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- БПК – биологическое потребление кислорода
- КЕК – обезвоженный осадок сточных вод
- КОС – канализационные очистные сооружения
- ЛФП – ленточный фильтр-пресс
- НД – нормативный документ
- ОГСВ – осадки городских сточных вод
- ОСВ – осадки сточных вод
- ОСК – очистные сооружения канализации
- ПДК – предельно допустимая концентрация
- ПДУ – предельно допустимый уровень
- СВЧ – сверхвысокочастотное
- СПАВ – синтетические поверхностно-активные вещества
- ТБО – твёрдые бытовые отходы
- ТУ – технические условия
- УФО – ультрафиолетовое облучение
- ХПК – химическое потребление кислорода
- ЦМОО – цех механического обезвоживания осадков
- ЦОГШ – центрифуга осадительная горизонтальная шнековая
- КВЧ – электромагнитное излучение коротковолновой частоты

Список литературы

1. Авторское свидетельство 1456379 СССР. Иловая площадка : опубл. в Б. И., 1989. № 5 / Г.С. Кучеренко. – Текст : непосредственный.
2. Аграноник, Р. Я. Проблемы обработки и утилизации осадков сточных вод / Р. Я. Аграноник. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 1995. – № 1. – С. 2–3.
3. Аграноник, Р. Я. Технология обработки осадков сточных вод с применением центрифуг и ленточных фильтр-прессов / Р.Я. Аграноник. – Москва : Стройиздат, 1985. – 144 с. – Текст : непосредственный.
4. Алексеев, С. В. Гигиена труда / С. В. Алексеев, В. Р. Усенко. – Москва : Медицина, 1988. – 576 с. – Текст : непосредственный.
5. Ахмадеев, В. В. Применение метода ультрафиолетового облучения для обеззараживания сточных вод / В. В. Ахмадеев. – Текст : непосредственный // Вода и экология : проблемы и решения. – 2000. – № 2. – С. 33–42.
6. Ахназарова, С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии : учеб. пособие для химико-технологических вузов / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – Москва : Высшая школа, 1978. – 319 с. – Текст : непосредственный.
7. Аэробная стабилизация осадка / К. Барак, Ж. Бебен, Ж. Бернар [и др.] // Технические записки по проблемам воды : в 2 т. Т. 1 ; под ред. Т. А. Карюхиной, И. Н. Чурбановой. – Москва : Стройиздат, 1983. – С. 454–481.
8. Баскина, Н. М. Утилизация осадка городских сточных вод в качестве удобрения / Н. М. Баскина, М. Ф. Кузнецов – Текст : непосредственный // Научно-практическая конференция «Человек и окружающая среда» : тезисы докладов. – Ижевск, 1989. С. 55–56.
9. Белицкий, Б. И. Изучение действия СВЧ-поля на микроорганизмы в импульсном и непрерывном режиме / Б. И. Белицкий, А. И. Педенко, И. В. Лерина. – Текст : непосредственный // Биофизика. – 1982. – Т. 27, вып. 5. – С. 923–927.

10. Беляева, С. Д. Управление осадками сточных вод – важнейшая экологическая проблема / С. Д. Беляева, Л. И. Гюнтер. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 2007. – № 1. – С. 5–9.
11. Васильев, Б. В. Обработка и утилизация осадков сточных вод в Санкт-Петербурге / Б. В. Васильев, Ж. Л. Григорьева. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006. – № 9. Часть 1. – С. 58–62.
12. Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Финансы и статистика, 1981. – 263 с. – Текст : непосредственный.
13. Вопросы теории и практики магнитной обработки воды и водных систем. Сборник второго всесоюзного совещания. – Москва : Цветметинформация, 1971. – 316 с. – Текст : непосредственный.
14. Временная типовая методика определения экономической эффективности осуществления природоохранных мероприятий и оценки экономического ущерба, причиняемого народному хозяйству загрязнением окружающей среды / А.С. Быстров, В.В. Варанкин, М.А. Виленский [и др.]. – Москва : Экономика, 1986. – 96 с. – Текст : непосредственный.
15. Вялкова, Е. И. К вопросу обработки и утилизации осадков сточных вод / Е. И. Вялкова. – Текст : непосредственный // Сборник материалов научно-практической конференции «Актуальные проблемы строительства и экологии в Западной Сибири». – Тюмень : Изд-во Тюм. гос. архит.-строит. ун-та. – 2005. – С. 20–23.
16. Гамов, В. И. Обезвоживание осадков сточных вод на фильтр-прессах с применением присадочных материалов : 05.23.04 Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов : автореферат диссертации на соиск. учен. степени канд. техн. наук / Валентин Игоревич Гамов.; ВНИИ водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инж. гидрогеологии. – Москва, 1987. – 26 с.

17. Гапоненков, И. А. СВЧ-обработка осадков сточных вод пищевых производств / И. А. Гапоненков, О. А. Фёдорова. – Текст : непосредственный // Вестник МГТУ. – 2013. – Т. 16. № 4. – С. 681–686.
18. Гольдфарб, Л. Я. Опыт утилизации осадков городских сточных вод в качестве удобрения / Л. Я. Гольдфарб, И. С. Туровский, С. Д. Беяева. – Москва : Стройиздат, 1986. – 58 с. – Текст : непосредственный.
19. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2018 году». – Москва : НИА-Природа, 2019. – 290 с. – Текст : непосредственный.
20. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». – Москва : Минприроды России ; НПП «Кадастр», 2019. – 844 с. – Текст : непосредственный.
21. Гумен, С. Г. Обработка осадков сточных вод на центральной станции аэрации Санкт-Петербурга / С. Г. Гумен, Я. А. Большепенников, К. В. Марич. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 1998. – № 10. – С. 13–15.
22. Гюнтер, Л. И. Метантенки / Л. И. Гюнтер, Л. Л. Гольдфарб. – Москва : Стройиздат, 1991. – 129 с. – Текст : непосредственный.
23. Девятков, Н. Д. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн на биологические объекты / Н.Д. Девятков. – Текст : непосредственный // Успехи физических наук. – 1973. – Т. 110, вып. 3. – С. 453–454.
24. Действие мощного ЭМП с частотой 2375 МГц на микроорганизмы / В. И. Панасенко, О. А. Садчикова, В. В. Игнатов [и др.]. – Текст : непосредственный // Биологическое действие электромагнитных полей. – Пушкино, 1982. – С. 26–27.
25. Дзюбо, В. В. Водоотведение и очистка сточных вод на промышленных предприятиях: учебное пособие / В. В. Дзюбо, Л. И. Алферова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2005. – 263 с. – Текст : непосредственный.

26. Довгань, С. А. Экологические, технологические и экономические аспекты использования осадков сточных вод / С. А. Довгань. – Текст : непосредственный // Экология и промышленность России. – 2012. – № 5. – С. 28–30.
27. Дрозд, Г. Я. О возможности переработки осадков сточных вод в строительные материалы / Г. Я. Дрозд, В. И. Браиун, Г. Ф. Литвинов– Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 1992. – № 4. – С. 8–9.
28. Евилевич, А. З. Утилизация осадков сточных вод / А. З. Евилевич, М. А. Евилевич. – Ленинград : Стройиздат, Ленингр. отделение, 1988. – 248 с. – Текст : непосредственный.
29. Жилищное хозяйство в России. 2016 : статистический сборник / Росстат ; под ред. И. Д. Масакова, Н. А. Власенко. – Москва, 2016. – 63 с. – Текст : непосредственный.
30. Захаров, С. Д. Физика химико-биологических процессов / С. Д. Захаров, В. И. Поротиков. – Москва : Знание, 1981. – 64 с. – Текст : непосредственный.
31. Землянова, М. В. Изучение влияния сверхвысокочастотного электромагнитного излучения на свойства осадков сточных вод / М. В. Землянова, Е. И. Вялкова. – Текст : непосредственный // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Стратегические проекты освоения водных ресурсов в XXI веке: правовые, социально-экономические и экологические аспекты». – Тюмень: Изд-во Тюм. гос. архит.-строит. ун-та. – 2013. – С. 110–114.
32. Землянова, М. В. Новый способ улучшения водоотдающих свойств осадков сточных вод / М. В. Землянова. – Текст : электронный // Сборник докладов международной конференции «Обработка и утилизация осадка сточных вод в коммунальном хозяйстве и промышленности». – 2015. – URL : <https://onedrive.live.com/redirect?resid=423D4F47E402C445%212908>. (дата обращения : 10.05.2015).

33. Землянова, М. В. Обоснование экономической эффективности применения сверхвысокочастотного электромагнитного излучения в процессах обработки осадков городских сточных вод / М. В. Землянова, Е. И. Вялкова. – Текст : непосредственный // Сборник материалов XIII научно-практической конференции молодых учёных, аспирантов и соискателей. – Тюмень : Изд-во Тюм. гос. архит.-строит. ун-та. – 2014. – С. 142–146.

34. Землянова, М. В. Оценка антропогенной нагрузки на водные объекты в бассейне р. Иртыш (на примере юга Тюменской области) / М. В. Землянова, Е. И. Вялкова. – Текст : непосредственный // Труды II Всероссийской научной конференции с международным участием «Водные и экологические проблемы Сибири Центральной Азии». – Барнаул, 2014. – С. 144–150.

35. Землянова, М. В. Применение сверхвысокочастотного электромагнитного излучения для обработки и обезвреживания осадков городских сточных вод / М. В. Землянова. – Текст : непосредственный // Экология и промышленность России. – 2015. – № 4. – С. 47–49.

36. Землянова, М. В. Эффективность применения электромагнитного излучения в технологиях обработки осадков сточных вод / М. В. Землянова, Е. И. Вялкова. – Текст : непосредственный // Экология и промышленность России. – 2015. – № 6. – С. 47–49.

37. Исмаилов, Э. Ш. Биофизическое действие СВЧ-излучений / Э.Ш. Исмаилов – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 144 с. – Текст : непосредственный.

38. Исмаилов, Э. Ш. Вопросы биовоздействия микроволн / Э. Ш. Исмаилов. – Текст : непосредственный // Вопросы биовоздействия физических факторов внешней среды. – Махачкала, 1970. – Вып. 1. – С. 10–21.

39. Калицун, В. И. Лабораторный практикум по канализации: учеб. пособие для вузов / В. И. Калицун, Ю. М. Ласков ; под ред. С. В. Яковлева. – Москва : Стройиздат, 1978. – 125 с. – Текст : непосредственный.

40. Канализация населенных мест и промышленных предприятий. Справочник проектировщика ; под ред. В.Н. Самохина. – Москва : Стройиздат, 1981. – 638 с. – Текст : непосредственный.

41. Капустин, В. И. Новая безреагентная технология для очистки питьевой воды и осадков сточных вод / В. И. Капустин, А. П. Коржавый. – Текст : непосредственный // Состояние и охрана окружающей среды в Калуге. Информационный обзор. – Калуга, 2009. – С. 29–31.

42. Кармазинов, Ф. В. Сжигание осадков сточных вод – решение проблемы их утилизации / Ф. В. Кармазинов, Б. В. Васильев, Ж. Л. Григорьева. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 2008. – № 9. – С. 19–25.

43. Касатиков, В.А. Агрохимические свойства осадков городских сточных вод и торфоиловых комплексов / В. А. Касатиков. – Текст : непосредственный // Агрохимия. – 1996. – № 8–9. – С. 87–96.

44. Киселев А. В. Решение проблемы утилизации осадка сточных вод в терминах «зеленой экономики» с использованием современных инструментов привлечения частных инвестиций / А. В. Киселев. – Текст : непосредственный // XII Международная конференция «Российские регионы в фокусе перемен» 16–18 ноября 2017 г. : сборник докладов. – Екатеринбург : Издательство УМЦ УПИ, 2018. – Ч. 2. – С. 388–394.

45. Кичигин, В. И. Водоотводящие системы промышленных предприятий: учебное пособие / В. И. Кичигин. – Москва : Изд-во «АСВ», 2011. – 654 с. – Текст : непосредственный.

46. Кичигин, В. И. Обработка и утилизация осадков природных и сточных вод: учебное пособие / В. И. Кичигин, Е. Д. Палагин. – Самара: Самарский гос. арх.-строит. ун-т, 2008. – 204 с. – Текст : непосредственный.

47. Классен, В. И. Омагничивание водных систем / В. И. Классен. – Москва : Химия, 1978. – 240 с. – Текст : непосредственный.

48. Крауфорд, Ф. Волны : серия «Берклевский курс физики» в 5 т. Т. 3. / Ф. Крауфорд. – 2-е изд. – Москва : Наука, 1976. – 527 с. – Текст : непосредственный.
49. Кудряшов, Ю. Б. Биофизические основы действия микроволн / Ю. Б. Кудряшов, Э. Ш. Исмаилов, С. М. Зубкова. – Москва : Изд-во МГУ, 1980. – 160 с. – Текст : непосредственный.
50. Кудряшов, Ю. Б. Радиационная биофизика: радиочастотные и микроволновые электромагнитные излучения : учебник для вузов / Ю. Б. Кудряшов, Ю. Ф. Перов, А. Б. Рубин. – Москва : Физматлит, 2008. – 184 с. – Текст : непосредственный.
51. Ландау, Л. Д. Теория поля (Теоретическая физика): в 10 т. Т. 2. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 6-е изд. – Москва : Наука, 1973. – 504 с. – Текст : непосредственный.
52. Лобовников, А. О. Эколого-экономическая эффективность использования наилучших доступных технологий утилизации осадков сточных вод / А. О. Лобовников, Ю. В. Завизион. – Текст : электронный // Научная электронная библиотека «КиберЛенинка» : [сайт]. – 2013. – URL : <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologo-ekonomicheskaya-effektivnost-ispolzovaniya-nailuchshih-dostupnyh-tehnologiy-utilizatsii-osadkov-stochnyh-vod/viewer> (дата обращения : 11.03.2019).
53. Львовский, Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул : учеб. пособие / Е. Н. Львовский. – Москва : Высшая школа, 1982. – 224 с. – Текст : непосредственный.
54. Макаров, П. О. Биофизические основы действия ультрафиолетового и ультразвукового излучений и сверхвысокочастотного электромагнитного поля. Лекции по биофизике / П. О. Макаров, Э. Ш. Исмаилов, Н. Э. Швинка. – Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1968. – С. 209–233. – Текст : непосредственный.
55. Методика определения предотвращённого экологического ущерба / Л. В. Вершков. – Москва, 1999. – 71 с. – Текст : непосредственный.

56. Микроволновка превратит мусор в топливо. – Текст : электронный // Всероссийский экологический портал : [сайт]. – 2012. – URL : <https://ecoportal.su/news/view/66373.html> (дата обращения : 23.01.2019).

57. Минаев, Б. Ф. Механизм влияния микроволнового излучения на скорость химической реакции в водном растворе / Б. Ф. Минаев, А. Г. Францева. – Текст : непосредственный // Вопросы химии и химической технологии. – 2005. – № 3. – С. 20–35.

58. Миненко, В. И. Магнитная обработка водно-дисперсных систем / В. И. Миненко. – Киев : Техника, 1970, 165 с. – Текст : непосредственный.

59. Минин, Б. А. СВЧ и безопасность человека / Б. А. Минин. – Москва : Советское радио, 1974. – 348 с. – Текст : непосредственный.

60. Миннигалимов, Р. З. Разработка технологии переработки нефтяных шламов с применением энергии ВЧ и СВЧ электромагнитных полей : 25.00.17 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Раис Зигандарович Миннигалимов ; Башкирский государственный университет. – Уфа, 2010. – 46 с. – Текст : непосредственный.

61. Налимов, В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – Москва ; Ленинград : Наука, 1965. – 341 с. – Текст : непосредственный.

62. Неженская, М. М. Экологически чистые технологии очистки сточных вод и утилизации илового осадка / М. М. Неженская, Ю. А. Степкина, Г. К. Лобачёва. – Текст : непосредственный // Альманах – 2009 : Международная академия авторов научных открытий и изобретений ; под научной редакцией Г.К. Лобачёвой. – Волгоград : Изд-во Волгоградского гос. ун-та, 2009. – С. 23–31.

63. Нижарадзе, Т. С. Электромагнитное излучение и его воздействие на биообъекты / Т. С. Нижарадзе, А. В. Фирсов. – Текст : непосредственный // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2006. – № 3. – С. 67–68.

64. Низкотемпературная сушка и возможности дальнейшего использования осадка сточных вод / М. Томалла, И. Нойберт, И. М. Панова [и др.]. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 2008. – № 3 (Ч. 2). – С. 29–33.

65. Никифорова, Л. О. Интенсификация работы сооружений биологической очистки сточных вод с использованием электромагнитных полей : 03.00.16 «Экология» : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Лидия Осиповна Никифорова ; МГУПП. – Москва, 2003. – 406 с. – Текст : непосредственный.

66. Обработка и утилизация осадков производственных сточных вод / С.В. Яковлев, Л. С. Волков, Ю. В. Воронов, В. Л. Волков. – Москва : Химия, 1999. – 448 с. – Текст : непосредственный.

67. Орловский, З. А. Механическое обезвоживание осадков городских сточных вод / З. А. Орловский ; под ред. С.Н. Строганова. – Москва ; Ленинград : Изд-во Наркомхоза РСФСР, 1939. – 103 с. – Текст : непосредственный.

68. Обработка и удаление осадков сточных вод : в 2. Т. 1. ; пер. с англ. Т. А. Карюхиной, И. Н. Чурбановой, И. Х. Заена. – Москва : Стройиздат, 1985. – 236 с. – Текст : непосредственный.

69. Об утверждении Критериев отнесения отходов к I-V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду : Приказ Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 04.12.2014 № 536 : зарегистрирован в Минюсте РФ 29 декабря 2015 года. – Текст : электронный. – URL : <http://docs.cntd.ru/document/420240163> (дата обращения : 20.01.2018).

70. Об утверждении схем водоснабжения и водоотведения муниципального образования городской округ город Тюмень до 2040 года : Постановление Администрации города Тюмени № 295-пк (с изменениями на 26 октября 2020 года). – Тюмень. – 82 с. Текст : непосредственный.

71. Ольшанская, Л. Н. Влияние энергии внешних физических полей на кинетику и механизм фиторемедиации ионов металлов из загрязненных стоков / Л. Н. Ольшанская, Н. А. Собгайда, Р. Ш. Валиев. – Текст : непосредственный // Экология и промышленность России. – 2014. – № 1. – С. 13–17.

72. Парселл, Э. Электричество и магнетизм : серия «Берклевский курс физики» в 5 т. Т. 2. / Э. Парселл. – 2-е изд., испр. – Москва : Наука, 1975. – 439 с. – Текст : непосредственный.

73. Патент 2123477 Российская Федерация, МПК C02F 1/48. Способ обеззараживания промышленных сточных вод : № 96112694/25 : заявл. 25.06.1996 : опубл. 20.12.1998 / Журавлев С. Г., Титуренко С. Г., Теплов И. В. ; патентообладатель Акционерное общество «АВТОВАЗ». – Текст : непосредственный.

74. Патент 2376247 Российская Федерация, МПК C02F1/48. Способ антибактериальной обработки потока жидкой среды и устройство для его осуществления : № 2007119789/15 : заявл. 28.05.2007 : опубл. 20.12.2009 / Лаптев А. Б., Абдуллин И. Г., Ахияров Р. Ж., Бугай Д. Е., Латыпов О. Р. ; патентообладатель Лаптев А. Б. – 10 с. – Текст : непосредственный.

75. Патент 2431610 Российская Федерация, МПК C02F 9/12, C02F 1/28, C02F 1/32, C02F 1/46, C02F 1/74, C02F 1/78, C02F 11/00. Комплексный способ безреагентной очистки сточных вод и брикетирования ила : № 2009121957/05 : заявл. 08.06.2009 : опубл. 20.10.2011 / Сенкус В. В., Стефанюк Б. М., Сенкус В. В., Сенкус В. В., Часовников С. Н., Гридасов И. С., Богатырев А. А., Конакова Н. И., Кисель А. Ф. ; патентообладатель Сенкус В. В., Стефанюк Б. М., Сенкус В. В., Сенкус В. В., Часовников С. Н., Гридасов И. С., Богатырев А. А., Конакова Н. И., Кисель А. Ф. – 18 с. – Текст : непосредственный.

76. Патент 2569533 Российская Федерация, МПК C02F 11/00, C02F 1/30. Безреагентный способ обработки и обеззараживания осадков сточных вод : № 2014135074/05 : заявл. 25.08.2014 : опубл. 27.11.2015 / Землянова М. В., Вялкова Е. И., Обухов Л. В. ; патентообладатель Федеральное

государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет» (ТюмГАСУ). – Текст : непосредственный.

77. Патент 2582415 Российская Федерация, МПК C02F 11/00, C02F 1/30, A61L 2/12, H05B 6/64. Установка СВЧ-обработки осадков сточных вод : № 2014123835/05 : заявл. 10.06.2014 : опубл. 20.12.2015 / Левин Е. В. ; патентообладатель Левин Е. В. – Текст : непосредственный.

78. Патент 2687415 Российская Федерация, МПК C02F 9/14, C02F 11/04, C02F 3/28, F24C 7/02, H05B 6/64, B02C 13/12. Способ и установка для анаэробной переработки жидких органических отходов : № 2018123744 : заявл. 29.06.2018 : опубл. 13.05.2019 / Ковалёв Д. А., Ковалёв А. А., Собченко Ю. А. ; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ). – Текст : непосредственный.

79. Патент 2693783 Российская Федерация, МПК C02F1/30 (2006.01). Способ обработки и обезвреживания сточных вод и их осадков и устройство для осуществления способа : № 2014135074/05 : заявл. 13.02.2018 : опубл. 04.07.2019 / Землянова М. В., Вялкова Е. И., Обухов Л. В. ; патентообладатели Землянова М. В., Вялкова Е. И., Обухов Л. В. – Текст : непосредственный.

80. Повышение эффективности локальных очистных сооружений сточных вод за счет применения комбинированных электрофизических методов воздействия / О. О. Ахмедова, С. Ф. Степанов, А. Г. Сошинов, К. Н. Бахтиаров. – Текст : непосредственный // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 5. – С. 27–32.

81. Покровская, С. Ф. Использование осадков городских сточных вод в сельском хозяйстве / С. Ф. Покровская, В. А. Касатиков. – Москва : ВНИИТЭИагропром, 1987. – 59 с. – Текст : непосредственный.

82. Пресман, А. С. Электромагнитные поля и живая природа / А. С. Пресман. – Москва : Наука, 1968. – 288 с. – Текст : непосредственный.

83. Применение КВЧ-излучения биомассы углеводородокисляющих бактерий *Rhodococcus erythropolis* E-15 / Т. И. Комарова, Л. Д. Гапочка, В. В. Ильинский, М. Г. Гапочка. – Текст : непосредственный // Экологические системы и приборы. – 2013. – № 4. – С. 48–51.

84. Российская Федерация. Законы. Об отходах производства и потребления : Федеральный закон № 89-ФЗ : Принят Государственной Думой 22 мая 1998 года : одобрен Советом Федерации 10 июня 1998 года : с изм. и доп., вступ. в силу с 14 июня 2020 года. – Текст : электронный. – URL : <http://www.kremlin.ru/acts/bank/12555> (дата обращения : 04.05.2020).

85. Самосвалы КАМАЗ 65115. – Текст : электронный // ООО «Стар Импекс» : [сайт]. – URL : <http://www.starimpex.ru/trucks/dumptruck/65115.html> (дата обращения : 23.03.2018).

86. Сапунов, Г. С. Влияние СВЧ излучения на биологические объекты / Г. С. Сапунов // Elremont.ru : Микроволновые печи. – 2007. – URL : http://www.elremont.ru/svch/bt_rem19.php (дата обращения 05.11.2017).

87. Сгустительное оборудование : каталог / составители В. Ю. Липманович, Л. Л. Смиренномудренская. – Москва : ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1991. – 9 с. – Текст : непосредственный.

88. Смирнов, В. Б. Использование осадков сточных вод для биологической рекультивации / В. Б. Смирнов, Т. И. Попова, С. Д. Беляева, М. И. Петров // Журнал «Вода Magazine», 2017. – № 6. – С. 12–15. – Текст : непосредственный.

89. Совещание «О практических аспектах утилизации прошедших обработку осадков сточных вод». – Текст : электронный // Комитет Совета Федерации по аграрно-продовольственной политике и природопользованию : официальный сайт. – 2017. – URL : http://agrarian.council.gov.ru/activity/activities/other_activities/79450/ (дата обращения : 27.02.2018).

90. СП 30.13330.2012 Канализация. Наружные сети и сооружения : утвержден приказом Министерства регионального развития Российской

Федерации (Минрегион России) от 29 декабря 2011 г. № 635/11 : введен в действие 01 января 2013 года. – Москва : Минрегион России, 2012. – 92 с. – Текст : непосредственный.

91. Стукалов, П. С. Магнитная обработка воды / П. С. Стукалов, Е. В. Васильев, Н. А. Глебов. – Ленинград : Судостроение, 1969. – 190 с. – Текст : непосредственный.

92. Схема водоснабжения и водоотведения для муниципальных нужд п. Боровский Тюменского района Тюменской области. ООО «ЛЕКС- Консалтинг». – Текст : электронный // Муниципальное образование поселок Боровский : официальный сайт. – 2020. – URL : http://www.borovski-adm.ru/sites/default/files/documents/shema_vodosnabzheniya_p._borovskiy_kor.doc (дата обращения 20.07.2020).

93. Тихонов, М. Н. Механизм влияния естественных и техногенных электромагнитных полей на безопасность жизнедеятельности / М. Н. Тихонов, В. В. Довгуша, Л. В. Довгуша. – Текст : непосредственный // Экология промышленного производства. – 2011. – № 4. – С. 24–32.

94. Тупицына, О. В. Освоение природно-техногенных систем градостроительных агломераций: монография / О. В. Тупицына, К. Л. Чертес, Д. Е. Быков. – Самара : Издательство «Ас Гард», 2014. – 336 с. – Текст : непосредственный.

95. Туровский, И. С. Механическое обезвоживание осадков сточных вод на ленточных фильтр-прессах / И. С. Туровский, Р. Я. Аграноник, А. С. Керин. – Москва : ВНИИ информации по строительству и архитектуре. – 1981. – 44 с. – Текст : непосредственный.

96. Туровский, И. С. Обезвоживание осадков сточных вод на барабанных вакуум-фильтрах / И. С. Туровский. – Москва : Стройиздат, 1980. – 180 с. – Текст : непосредственный.

97. Туровский, И. С. Обработка осадка сточных вод / И. С. Туровский. – Москва : Стройиздат, 1988. – 256 с. – Текст : непосредственный.

98. Туровский, И. С. Осадки сточных вод. Обезвоживание и обеззараживание / И. С. Туровский. – Москва : ДеЛи принт, 2008. – 376 с. – Текст : непосредственный.
99. Удаление металлов из сточных вод. Нейтрализация и осаждение ; под ред. Кушни Дж. К. ; пер. с англ. С. А. Маслова. – Москва : Metallurgia, 1987. – 176 с. – Текст : непосредственный.
100. Утилизация осадков сточных вод в качестве материалов для изоляции ТБО / К. Л. Чертес, А.К. Стрелков, Д. Е. Быков, М. П. Седогин, Д. И. Тараканов. – Текст : непосредственный // Водоснабжение и санитарная техника. – 2001. – № 6. – С. 36–38.
101. Физика : Большой энциклопедический словарь / под ред. А. М. Прохорова. – 4-е изд. – Москва : Большая Российская энциклопедия, 1998. – 944 с. – Текст : непосредственный.
102. Филина, Ф. Н. В помощь бухгалтеру: амортизация транспортных средств / Ф. Н. Филина. – Текст : электронный // Российский бухгалтер. – 2006. – URL : <http://rosbuh.ru/?page=article&item=246> (дата обращения : 24.01.2018).
103. Фильтр-прессы камерные автоматические ЧМ. – Текст : электронный // Производственно-коммерческая фирма «Механик» : [сайт]. – URL : <http://www.mechanik.spb.ru/voda/chm/chm.htm> (дата обращения : 12.01.2018).
104. Холодов, Ю. А. Влияние электромагнитных и магнитных полей на центральную нервную систему / Ю. А. Холодов. – Москва : Наука, 1966. – 284 с. – Текст : непосредственный.
105. Холодов, Ю. А. Магнетизм в биологии / Ю. А. Холодов. – Москва : Наука, 1970. – 96 с. – Текст : непосредственный.
106. Центрифуги осадительные горизонтальные со шнековой выгрузкой осадка типа ОГШ. – Текст : электронный // Сумское НПО : [сайт]. – URL : http://snpo.ua/wp-content/uploads/2017/09/sumy_npo_centrifuges_OGSh.pdf (дата обращения : 10.06.2019).

107. Чертес, К. Л. Предкомпостная механизированная обработка осадков сточных вод с использованием отходов лесопромышленного комплекса: специальность 05.23.04 «Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов»: автореферат диссертации кандидата технических наук / К. Л. Чертес; Таллинский политехнический институт. – Таллин, 1988. – 16 с.

108. Яковлев, С. В. Водоотведение и очистка сточных вод: учебное пособие для вузов / С. В. Яковлев, Ю. В. Воронов. – Москва: АСВ, 2002. – 704 с. – Текст: непосредственный.

109. Яндыганов, Я. Я. Технология рационального природопользования: учеб. пособие / Я. Я. Яндыганов, Е. Я. Власова, Е. В. Курилова. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. экон. ун-та, 2006. – 299 с. – Текст: непосредственный.

110. Impacts of sterilization, microwave and ultrasonication pretreatment on hydro-gen producing using waste sludge / Liang Guo, Xiao-Ming Li, Xie Bo [et al]. – Direct text // Bioresour. Technol. – 2008. – № 99. – P. 3651–3658.

111. Menendez, J.A. Microwave-induced pyrolysis of sewage sludge / J. A. Menendez, J. Minguanzo, J.J. Pis. – DOI 10.1016/S0043-1354(02)00017-9. – Direct text // Water research. – 2002. – № 36. – P. 3261–3264.

112. Microwave-acid pretreatment: A potential process for enhancing sludge dewaterability / Jibao Liu, Yuansong Wei, Kun Li [et al]. DOI 10.1016/j.watres.2015.12.012. – Direct text // Water research. – 2016. – № 90. – P. 225–234.

113. Microwave in Environmental Technologies and Synthesis of Nanomaterials: The Georgian Experience / P. J. Kervalishvili, A. Chirakadze, Z. Buachidze [et al]. DOI 10.1007/978-94-017-7468-0_8. – Direct text // Nuclear Radiation Nanosensors and Nanosensory Systems. – 2016. – P. 91–150.

114. Nuno, M. G. C. Evaluation of continuous mesophilic, thermophilic and temperature phased anaerobic digestion of microwaved activated sludge / Nuno Miguel Gabriel Coelho, Ronald L Droste, Kevin J Kennedy. – DOI 10.1016/j.watres.2011.02.032. – Direct text // Water research. – 2011. – № 45. – P. 2822–2834.

115. Patent CN203668049U, IPC C02F1/30; C02F1/72. Microwave water treatment equipment ; application 31.12.2013 ; publication 25.06.2014 / Huang Liyan, Li Kangbai, Luo Xiaodong, Luo Zhezhu, Tan Yanlai, Wu Yan, Yao Chuang, Ye Junjun, Yue Jianxiong ; applicants guangdong Engineering Technology Inst. – Direct text.

116. Patent CN203402944U, IPC C02F1/30; C02F1/463. 124. Water treatment device capable of utilizing microwave-reinforced micro-current to conduct electrolysis sterilization and remove suspended matter ; application 16.08.2013 ; publication 22.01.2014 / Chen Jin, Lin Li, Xie Weijing, Zhao Liangyan ; applicants Changjiang Waterway Inst Planning Design & Res. – Direct text.

117. Patent CN207061894U, IPC C02F1/00; C02F1/30. Microwave low treatment temperature sewage device ; application 14.06.2017 ; publication 02.03.2018 / Dai Linqing, Deng Jianying, Guo Shenghui, Han Chaohui, Peng Jinhui, Wu Qingtian, Xia Hongying, Xu Lei, Zhang Libo, Zhuo Juwen ; applicants Univ Kunming Science & Tech. – Direct text.

118. Physical and chemical properties of waste-activated sludge after microwave treatment / Qiang Yu, Hengyi Lei, Zhong Li [et al.]. – Direct text // Water research. – 2010. – № 44. – P. 2841–2849.

119. Sewage sludge nutrient solubilization using a single-stage microwave treatment / Winnie I. Chan, Wayne T. Wong, Ping H. Liao, Kwang V. Lo. – Direct text // Journal of Environmental Science and Health Part A. 42(1) – 2007. – P. 59–63.

120. Wojciechowska, E. Application of microwaves for sewage sludge conditioning / E. Wojciechowska. – Direct text // Water research. – 2005. – № 39. – P. 4749–4754.

121. Zou, T. Electromagnetic and microwave absorbing properties of multi-walled carbon nanotubes filled with Ni nanowire / T. Zou, H. Li, N. Zhao, C. Shi. – Direct text // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – Vol. 496, № 1. – P. 22–24.

Приложение А

Протокол № 218 испытательной лаборатории ФГБУ ГСАС «Тюменская»

Испытательная лаборатория ФГБУ ГСАС «Тюменская»
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
 ГОСУДАРСТВЕННАЯ СТАНЦИЯ АГРОХИМИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
 «ТЮМЕНСКАЯ»

625041 г. Тюмень, ул. Рошинское шоссе 2 кор.10, а/я 3084, тел/факс: 62-56-72
 Аттестат № РОСС RU. 0001.21ПЧ37 действителен до 03.06.2015г.

Протокол № 218 от 26.02.2014г.

(один лист)

1. Объект анализа – Вода сточная.
2. Место отбора – ГОСК г. Тюмень.
3. Предъявитель (заказчик) – ФБУ ВПО «ТюмГАСУ».
4. Адрес предъявителя (заказчика) тел.- г. Тюмень.
5. Количество образцов (масса) – 1 образец (0,7дм³).
6. Упаковка, маркировка – пластиковая бутыль.
7. Шифр образца – № 1 (лабор.23в).
8. Сопроводительный документ (акт отбора, направление) – акт отбора от 12.02.2014г.
9. Дата и время отбора – 07.02.2014г.
10. Дата получения образцов – 12.02.2014 г.
11. Время проведения испытания – 12.02.2014 г.-17.02.2014г.
12. На соответствие требованиям – по согласованию с заказчиком.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

№ п/п	Показатель	Ед.изм.	НД на метод испытания	Результат
1	Мышьяк	мг/дм ³	МУЗ1-09/04	<0,002
2	Никель	мг/дм ³	МУЗ1-14/06	0,011±0,003
3	Ртуть	мкг/дм ³	ПНД Ф 14.1:2:4.243-07	0,013±0,008
4	Свинец	мг/дм ³	МУЗ1-03/04	0,002±0,001
5	Цинк	мг/дм ³	МУЗ1-03/04	0,091±0,023
6	Хром (6+)	мг/дм ³	МУК 4.1.1513-03	<u>1,14</u> 0,114±0,052(10)

Настоящий протокол не может быть скопирован без разрешения испытательной лаборатории.
 Результаты испытаний распространяются только на представленный образец.
 Пробоотбор выполнен заказчиком.

Примечание: Результаты испытаний с указанием погрешности, выходящие за верхнюю границу рабочего диапазона методики, даны на разведенную пробу и выделены курсивом. Кратность разбавления указана в скобках. В числителе указано общее содержание показателя.

Начальник испытательной лаборатории _____



А.А.Заваруев

Приложение Б

Протокол № 219 испытательной лаборатории ФГБУ ГСАС «Тюменская»

Испытательная лаборатория ФГБУ ГСАС «Тюменская»
 ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
 ГОСУДАРСТВЕННАЯ СТАНЦИЯ АГРОХИМИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
 «ТЮМЕНСКАЯ»
 625041 г. Тюмень, ул. Рошинское шоссе 2 кор.10, а/я 3084, тел/факс: 62-56-72
 Аттестат № РОСС RU. 0001.21ПЧ37 действителен до 03.06.2015г.

Протокол № 219 от 26.02.2014г. (один лист)

1. Объект анализа – Вода сточная.
2. Место отбора – ГОСК г. Тюмень.
3. Предъявитель (заказчик) – ФБУ ВПО «ТюмГАСУ».
4. Адрес предъявителя (заказчика) тел.- г. Тюмень.
5. Количество образцов (масса) – 1 образец (0,8дм³).
6. Упаковка, маркировка – пластиковая бутылка.
7. Шифр образца – № 2 (лабор.24в).
8. Сопроводительный документ (акт отбора, направление) – акт отбора от 12.02.2014г.
9. Дата и время отбора – 07.02.2014г.
10. Дата получения образцов – 12.02.2014 г.
11. Время проведения испытания – 12.02.2014 г.-17.02.2014г.
12. На соответствие требованиям – по согласованию с заказчиком.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

№ п/п	Показатель	Ед.изм.	НД на метод испытания	Результат
1	Мышьяк	мг/дм ³	МУ31-09/04	0,004±0,002
2	Никель	мг/дм ³	МУ31-14/06	0,020±0,006
3	Ртуть	мкг/дм ³	ПНД Ф 14.1:2:4.243-07	0,017±0,010
4	Свинец	мг/дм ³	МУ31-03/04	0,002±0,001
5	Цинк	мг/дм ³	МУ31-03/04	0,009±0,002
6	Хром (6+)	мг/дм ³	МУК 4.1.1513-03	0,436 0,218±0,100(2)

Настоящий протокол не может быть скопирован без разрешения испытательной лаборатории.
 Результаты испытаний распространяются только на представленный образец.
 Пробоотбор выполнен заказчиком.

Примечание: Результаты испытаний с указанием погрешности, выходящие за верхнюю границу рабочего диапазона методики, даны на разведенную пробу и выделены курсивом. Кратность разбавления указана в скобках. В числителе указано общее содержание показателя.

Начальник испытательной лаборатории



А.А.Заваруев

Приложение В

Протокол испытаний № 122 ООО «Тюмень Водоканал»

**Общество с Ограниченной Ответственностью
«Тюмень Водоканал»
Центральная аналитическая лаборатория**

Адрес: 625007, г.Тюмень,
ул. 30 лет Победы, 31
Телефон/Факс 8(3452)333-155, 540-937
Аттестат аккредитации № РОСС RU. 0001.22 ПВ 08 от 11 июля 2011 г.
Аттестат аккредитации действителен до 11 июля 2016 г.

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ЦАЛ ООО «ТЮМЕНЬ ВОДОКАНАЛ»
 С.Б. Хованова
МП «21» апреля 2014 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 122 от 21 апреля 2014 г.

Лист № 1, всего листов: 1

Наименование объекта: вода сточная
Заявитель: ФГБОУ ВПО «ТюмГАСУ»
Дата и время отбора пробы: 17.04.2014г. 10³⁰ час.
Дата поступления на испытание: 18.04.2014г. 13⁰⁰ час.
Место отбора пробы: пробы №1, №2, №3 – ОСК г.Тюмень цех ЦМОО
Цель испытания: содержание в испытуемой воде тяжёлых металлов
Сроки проведения испытаний: 18.04.2014г. – 21.04.2014 г.

Результаты испытаний:

№ п/п	Наименование определяемого показателя	Результат определения показателя, проба №1, мг/дм ³ $\Delta \pm, P = 0,95$	Результат определения показателя, проба №2, мг/дм ³ $\Delta \pm, P = 0,95$	Результат определения показателя, проба №3, мг/дм ³ $\Delta \pm, P = 0,95$	НД на метод испытания
1	2	3	4	5	6
1	Медь	0.024 ± 0.007	0.011 ± 0.003	0.032 ± 0.009	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98
2	Цинк	0.16 ± 0.03	0.15 ± 0.03	0.22 ± 0.04	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98
3	Никель	0.044 ± 0.013	0.040 ± 0.012	0.046 ± 0.014	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98
4	Свинец	0.025 ± 0.006	0.018	0.024 ± 0.006	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98*
5	Кадмий	0.006 ± 0.002	0.004	0.004	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98*
6	Хром	< 0.01	< 0.01	< 0.01	ПНД Ф 14.1:2:4.52-96

Примечания:

- Настоящий протокол распространяется только на пробы, подвергнутые испытаниям.
- Передача протокола или его копий другим лицам и организациям без разрешения Заявителя и Руководителя ЦАЛ не допускается.
- * Метод измерений не входит в область аккредитации.
- **Лаборатория не несёт ответственности за отбор проб и доставку их в лабораторию.

Испытания проводили:

инженер-химик

 Н.Н. Фирсова

Приложение Г

Обоснование технических характеристик установки электромагнитной обработки сточных вод и осадков «ПОТОК ЭМ-1»

Г.1 Исходные данные для расчётов

Обрабатываемая жидкость – смесь первичных осадков и активного ила в пропорции 1:2, влажностью 98-99%.

Диаметр трубопровода: наружный $D_n=28$ мм; внутренний $D_{вн}=20$ мм=0,02 м. Принят конструктивно в зависимости от объёма обрабатываемых осадков.

Объем смеси осадков, обрабатываемый на установке $V_1 = 15$ л = 0,015 м³.

Продолжительность обработки $t=8$ мин=480 с. Принята экспериментально.

Температура смеси – 20 °С.

Обработка осадков предусмотрена в две ступени. Данное техническое решение принято на основании экспериментов и информации из научно-технических источников об более высокой эффективности СВЧ-обработки жидкости в две стадии.

Г.2 Определение расхода и скорости потока жидкости по трубопроводу

Объемный расход потока жидкости по трубопроводу:

$$Q = V/t, \text{ м}^3/\text{с} \quad (\text{Г.1})$$

где Q — объёмный расход жидкости, м³/с;

V – объём жидкости, проходящий через поперечное сечение потока за время (продолжительность) t , м³. $V = 15$ л = 0,015 м³;

t – продолжительность прохождения жидкости объёмом V через поперечное сечение потока, с. $t = 480$ с.

Тогда

$$Q = 0,015/480 = 0,00003125 \text{ м}^3/\text{с} = 0,113 \text{ м}^3/\text{ч} = 2,7 \text{ м}^3/\text{сут.}$$

Объемный расход потока жидкости по трубопроводу

$$Q = S \cdot V_{\text{ск}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (\text{Г.2})$$

где S - площадь сечения трубы:

$$S = \pi \cdot (D_{\text{вн}}/2)^2, \text{ м}^2 \quad (\text{Г.3})$$

здесь $D_{\text{вн}}$ – внутренний диаметр трубопровода, $D_{\text{вн}} = 0,02$ м;

π – математическая постоянная, 3,14;

$V_{\text{ск}}$ - скорость течения жидкости, м/с.

Тогда

$$S = 3,14 \cdot (0,02/2)^2 = 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Из зависимости (2) получаем скорость течения жидкости:

$$V_{\text{ск}} = Q/S, \text{ м/с} \quad (\text{Г.4})$$

$$V_{\text{ск}} = 3,12 \cdot 10^{-5} / 3,14 \cdot 10^{-4} = 0,1 \text{ м/с.}$$

Г.3 Определение требуемого напора

Требуемый напор

$$H_{\text{тр}} = h_{\text{под}} + h_l + h_m + h_{\text{зап}}, \text{ м}, \quad (\text{Г.5})$$

где $h_{\text{под}}$ – геометрическая высота подъема трубопровода между 1-й и 2-й ступенью, м. $h_{\text{под}} = 1,5$ м;

h_l – потери напора по длине:

$$h_l = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}, \text{ м} \quad (\text{Г.6})$$

L - длина трубопровода:

$$L = l_0 + n \cdot l + l_k, \text{ м} \quad (\text{Г.7})$$

l_0 - длина начального прямого участка гибкого трубопровода на входе в установку, 1,5 м;

n - количество витков спирали, 5 шт.; в двух СВЧ-печах всего 10 витков;

l_k - длина конечного прямого участка гибкого трубопровода на выходе из установки, 1,5 м;

l - длина одной спирали, м. Если диаметр витка до средней линии трубы D , которая выбирается конструктивно, исходя из ширины установки, то $l = \pi \cdot D$.

Здесь D – диаметр витка спирали равная 0,315 м. $l = 3,14 \cdot 0,315 = 0,989$ м = 1,0 м.

Тогда:

$$L = 1,5 + 5 \cdot 1 \cdot 2 + 1,5 = 13 \text{ м.}$$

$D_{\text{вн}}$ - внутренний диаметр трубопровода, 0,02 м;

V - скорость потока жидкости, 0,1 м/с;

g - ускорение свободного падения, 9,81 м/с²;

λ - коэффициент гидравлического трения.

Находим число Рейнольдса (Re) по формуле:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}, \quad (\text{Г.8})$$

где V - скорость потока жидкости, 0,1 м/с.

D - внутренний диаметр трубы или диаметр потока жидкости, 0,02 м.

ν - кинематическая вязкость, м²/с.

Осадки сточных вод относятся к аномально вязким неньютоновским жидкостям. Но т.к. обрабатываемая смесь осадков имеет высокую влажность (около 99%), то в расчетах кинематическая вязкость принята как вязкость воды при температуре 0 °С – $1,787 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Тогда:

$$Re = \frac{0,1 \cdot 0,02}{1,787 \cdot 10^{-6}} = 1119,19.$$

Определим зависимость для нахождения коэффициента гидравлического трения по таблице Г.1.

Режим движения смеси осадков в трубопроводе принят как турбулентный, т.к. в СВЧ-печах трубопровод уложен в виде спиралей. Тогда коэффициент гидравлического трения найдем по формуле Альтшуля для турбулентного режима 2-й области, т. к. $Re = 1119,19$

$$\lambda_T = 0,11 \left(\frac{49}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (\text{Г.9})$$

где $\Delta_э$ - эквивалент шероховатости труб. Для цельнотянутых полиэтиленовых, винилпластовых $0,0015 \div 0,005$;

d - внутренний диаметр трубы, 0,02 м.

Таблица Г.1 – Определение коэффициента гидравлического трения

Режим движения		Число Рейнольдса	Определение λ
Ламинарный		$Re < 2300$	$\lambda = \frac{64}{Re}$ или $\lambda = \frac{75}{Re}$
Переходный		$2300 < Re < 4000$	Проектирование трубопроводов не рекомендуется
Турбулентный	1-я область	$4000 < Re < 10 \frac{d}{\Delta_э}$	$\lambda_T = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$ (ф-ла Блазиуса) $\lambda_T = \frac{1}{(1,8 \lg Re - 1,5)^2}$ (ф-ла Копакова)
	2-я область	$10 \frac{d}{\Delta_э} < Re < 560 \frac{d}{\Delta_э}$	$\lambda_T = 0,11 \left(\frac{\Delta_э}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$ (ф-ла Альтшуля)
	3-я область	$Re > 560 \frac{d}{\Delta_э}$	$\lambda_T = 0,11 \left(\frac{\Delta_э}{d} \right)^{0,25}$ (ф-ла Альтшуля) $\frac{1}{\sqrt{\lambda_T}} = -2 \lg \left(\frac{\Delta_э}{3,71d} \right)$ (ф-ла Никурадзе)

Тогда

$$\lambda_T = 0,11 \left(\frac{0,003}{0,002} + \frac{68}{1119,19} \right)^{0,25} = 0,0745.$$

где $h_{зап}$ – запас на излив, 1-2 м.

Определим потери напора по длине

$$h_l = 0,0745 \frac{13}{0,02} \frac{0,1^2}{2 \cdot 9,81} = 0,025 \text{ м.}$$

Потери напора на местные сопротивления, h_m , примем 30% от h_l ; $h_m = 0,00075$.

Тогда

$$H_{тр} = 1,5 + 0,025 + 0,00075 + 1,0 = 2,5 \text{ м.}$$

Г.4 Результаты расчётов

Технические характеристики установки:

- производительность	- 0,113 (2,7) м ³ /ч (м ³ /сут);
- суммарная потребляемая мощность установки	- 2,0 кВт;
- мощность СВЧ-излучения (одна ступень)	- 1,0 кВт;
- частота СВЧ-излучения	- 2450 МГц;
- температура жидкой среды	- 20 ... 85°С;
- скорость движения	- 0,1 м/с;
- влажность обрабатываемой жидкой среды	- 98 ... 100%;
требуемый напор	- 2,5 м;
плотность потока СВЧ-излучения	- 0 ... 0,03 Вт/см ² .

Приложение Д

Внешний вид опытно-промышленного образца установки СВЧ-обработки осадков, антенны измерительной П6-59 и анализатора спектра

Установка СВЧ-обработки осадков (вид А)



Установка СВЧ-обработки осадков (вид Б)

Установка СВЧ-обработки осадков
(вид В)

Антенна измерительная П6-59 и анализатор спектра R&S FSH8

Приложение Е

Паспорт предлагаемой технологии (способа) СВЧ-обработки осадков

№ п/п	Критерий	Описание
1	Наименование	Способ обработки осадков сточных вод с помощью СВЧ-излучения и устройство для осуществления способа
2	Цель технологии (способа)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Улучшение показателей качества осадков сточных вод, а именно: сокращение объёма, интенсификация уплотнения, улучшение влагоотдающих свойств, снижение влажности, снижение содержания тяжёлых металлов в осадках, уменьшение прилипания к поверхностям, эффект стабилизации. 2. Сокращение эксплуатационных затрат, продолжительности и упрощение процессов обработки осадков. 3. Получение безопасного для окружающей природной среды продукта с возможности вторичного использования
3	Общее техническое описание	<p><i>3.1 Техническое описание способа, включая специфику процесса и основные технологические особенности.</i></p> <p>Основой способа является использование СВЧ-излучения для улучшения показателей качества осадков.</p> <p>Обработка осадков микроволнами осуществляется в условиях порционной обработки и в проточном режиме. Возможен вариант обработки непосредственно на трубопроводе подачи осадков.</p> <p><i>3.2 Указание основных отличий способа от других известных решений.</i></p> <p>Отсутствует необходимость использовать реагенты для улучшения показателей качества осадков сточных вод.</p> <p>СВЧ-обработка осуществляется в проточном режиме, отсутствуют трудоёмкие этапы загрузки – выгрузки осадков.</p> <p>Комплексный метод, позволяет одновременно улучшать несколько показателей качества осадков.</p> <p>Значительно сокращается продолжительность процессов обработки осадков.</p> <p>Мобильность оборудования.</p> <p>Эффективность реализации способа СВЧ-обработки осадков не зависит от климатических факторов.</p> <p><i>3.3 Основные требования к оборудованию, необходимому для применения способа.</i></p>

		<p>Для реализации способа требуются СВЧ-установки с генераторами низкой мощности.</p> <p>Рекомендуется двухстадийная обработка осадков.</p> <p>Рекомендуется использовать материалы, устойчивые к длительному нагреванию.</p> <p>Остальное оборудование является стандартным, широко используемым.</p> <p>Комплектность установки для осуществления способа зависит от требуемой производительности.</p>
4	Обобщенная характеристика метода, с оценкой преимуществ и недостатков по отношению к другим методам	<p><i>4.1. Технологическая эффективность.</i></p> <p>Внедрение способа СВЧ-обработки осадков позволяет достигнуть сокращения объемов, интенсифицировать процессы уплотнения, улучшить влагоотдачу, снизить содержание тяжёлых металлов в осадках, снизить прилипание к поверхностям, получить эффект стабилизации.</p> <p>Для достижения эффективной обработки не требуются СВЧ-генераторы высокой мощности.</p> <p>Низкие рабочие температуры процесса являются критерием безопасности способа.</p> <p>Простота в эксплуатации оборудования.</p> <p><i>4.2. Энерго- и ресурсопотребление.</i></p> <p>За счет улучшения влагоотдающих свойств осадков снижается энергопотребление оборудования механического обезвоживания осадков.</p> <p>При внедрении способа СВЧ-обработки на ОСК снижается себестоимость обработки осадков за счет сокращения эксплуатационных затрат (в т.ч. затрат на реагентное хозяйство, транспортные расходы, заработную плату).</p> <p>За счет возможности вторичного использования осадков после микроволновой обработки значительно сокращаются площадь ежегодно отчуждаемых земель для устройства иловых полей.</p> <p><i>4.3. Затраты на период жизненного цикла.</i></p> <p>За счет отсутствия необходимости в реагентном хозяйстве, сокращении продолжительности процессов обработки осадков, а также, отсутствие сложного емкостного оборудования, расходы на эксплуатацию значительно снижаются, в сравнении с традиционным реагентным методом обработки.</p>
5	Оценка побочных действий и рисков, с оценкой преимуществ и недостатков (в том числе в сопоставлении	<p><i>5.1 Преимущества метода СВЧ-обработки осадков.</i></p> <p>Отсутствие сложного емкостного оборудования, проточный режим работы позволяют внедрять предлагаемый метод не только на вновь строящихся очистных станциях, но и при реконструкции существующих.</p>

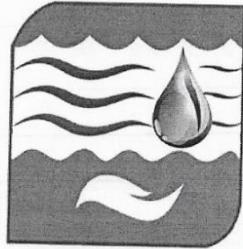
<p>со стандартными современными методами)</p>	<p>Независимость процессов от климатических факторов, что позволяет использовать данный метод в северном климатическом поясе.</p> <p>Отсутствие необходимости в дорогостоящих реагентах и реагентном хозяйстве.</p> <p>Осадки после СВЧ-обработки становятся экологически безопасными, что позволяет их вторично использовать.</p> <p>Простота в эксплуатации, нет необходимости специального обучения персонала.</p> <p>Мобильность и компактность оборудования.</p> <p><i>5.2 Недостатки технологии.</i></p> <p>На данный момент промышленностью не выпускаются установки для реализации способа, что тормозит его реальное распространение.</p> <p>В ряде случаев использование метода может быть нецелесообразным из-за нехватки энергоресурсов.</p> <p><i>5.3 Побочные действия (воздействие на окружающую среду).</i></p> <p>При работе оборудования происходит испарение влаги из осадков, неприятные запахи. Необходимо предусматривать мероприятия по сбору конденсата и вентиляции в помещении.</p> <p><i>5.4 Межсредовые воздействия (на образование отходов и т.п.).</i></p> <p>Отсутствует.</p> <p><i>5.5 Риски применения метода (надежность по достижению целевых показателей, в том числе в условиях значительного колебания параметров входящего потока, разного рода перебоев в работе).</i></p> <p>Для обеспечения надежной работы оборудования необходимы резервные установки микроволновой обработки осадков, резервные питающие электрические линии.</p> <p><i>5.6 Аварии и техногенные катастрофы.</i></p> <p>Возможность аварии имеет низкую вероятность, т.к. при работе оборудования не применяются высокие температуры, давление и другие опасные факторы.</p> <p>В случае выхода из строя оборудования прекращается подача электроэнергии к установке, подача осадка перекрывается запорно-регулирующей арматурой (в автоматическом или ручном режиме), система опорожняется.</p> <p><i>5.7 Негативное воздействие на персонал.</i></p>
---	---

		<p>С целью предотвращения негативного воздействия СВЧ-излучения на обслуживающий персонал оборудование устанавливается в экранирующей кожухе. Работники обязаны соблюдать правила безопасной работы с СВЧ-оборудованием.</p> <p><i>5.8 Зависимость от работы автоматики.</i> Установки СВЧ-обработки осадков малой производительности могут работать без автоматики. Для установок большей производительности автоматическое регулирование технологических параметров рекомендуется.</p>
6	<p>Применимость технологии в зависимости от местных условий. Факторы, влияющие на возможность реализации</p>	<p>Рекомендуемая влажность обрабатываемых осадков не менее 95 %.</p> <p>Метод и оборудование микроволновой обработки осадков рекомендуется к внедрению на ОСК малой и средней производительности.</p> <p>Возможна реализация способа как для вновь строящихся станций, так и для реконструкции существующих.</p> <p>Метод может успешно использоваться на очистных станциях, расположенных в суровых климатических условиях, на удаленных объектах.</p> <p>Необходимо наличие энергоресурсов.</p> <p>Оборудование может использоваться при стесненных условиях производства.</p>
7	<p>Сочетание технологии с другими</p>	<p>Способ СВЧ-обработки осадком может применяться как самостоятельный, так и в сочетании с другими методами обработки осадков.</p>
8	<p>Описание фактического устройства и эксплуатационных данных установок, рассматриваемых в качестве примеров</p>	<p>Подробное описание установки и конструктивная схема представлены в главе 2 п. 2.2.</p>
9	<p>Литературные ссылки</p>	<p>Патент 2569533 Российская Федерация, МПК C02F 11/00, C02F 1/30. Безреагентный способ обработки и обеззараживания осадков сточных вод : № 2014135074/05 : заявл. 25.08.2014 : опубл. 27.11.2015 / Землянова М. В., Вялкова Е. И., Обухов Л. В. ; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тюменский государственный архитектурно-строительный университет» (ТюмГАСУ). – Текст : непосредственный.</p> <p>Патент 2693783 Российская Федерация, МПК C02F1/30 (2006.01). Способ обработки и обезвреживания сточных вод и их осадков и устройство для осуществления способа : №</p>

		<p>2014135074/05 : заявл. 13.02.2018 : опубл. 04.07.2019 / Землянова М. В., Вялкова Е. И., Обухов Л. В. ; патентообладатели Землянова М. В., Вялкова Е. И., Обухов Л. В. – Текст : непосредственный.</p> <p>Землянова, М. В. Изучение влияния сверхвысокочастотного электромагнитного излучения на свойства осадков сточных вод / М. В. Землянова, Е. И. Вялкова. – Текст : непосредственный // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Стратегические проекты освоения водных ресурсов в XXI веке: правовые, социально-экономические и экологические аспекты». – Тюмень: Изд-во Тюм. гос. ар-хит.-строит. ун-та. – 2013. – С. 110–114.</p> <p>Землянова, М. В. Применение сверхвысокочастотного электромагнитного излучения для обработки и обезвреживания осадков городских сточных вод / М. В. Землянова. – Текст : непосредственный // Экология и промышленность России. – 2015. – № 4. – С. 47–49. Пат. 2693783 Российская Федерация, МПК С02F1/30 (2006.01). Способ обработки и обезвреживания сточных вод и их осадков, и устройство для осуществления способа / М.В. Землянова, Е.И. Вялкова, Л.В. Обухов. – 2018 г.</p>
--	--	--

Приложение Ж

Акт о проведении опытно-промышленных (натурных) испытаний по обработке осадков городских сточных вод на пилотной установке «ПОТОК ЭМ-1»



www.ishimvodokanal.ru

«ВОДОКАНАЛ»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

627750, Россия, Тюменская обл.,
г. Ишим, ул. Коркинская, 58
тел.: 8 (34551) 2-36-40
факс.: 8 (34551) 2-37-59
бухгалтерия: 8 (34551) 2-38-53
e-mail: ishimvodokanal@gmail.com
voda-ishim@rambler.ru

р/с 40702810967440100342
Западно-Сибирский банк
ПАО Сбербанк г. Тюмень
к/с 30101810800000000651
БИК 047102651
ИНН 7205010267
ОГРН 1027201229263

АКТ

о проведении опытно-промышленных испытаний по обработке осадков
городских сточных вод на пилотной установке «ПОТОК ЭМ-1»

В период с 05.02.2018 по 09.02.2018 сотрудниками предприятия АО «ВОДОКАНАЛ» г. Ишим для подтверждения эффективности обработки осадков городских сточных вод СВЧ электромагнитным излучением выполнены опытно-промышленные испытания на пилотной установке электромагнитной обработки осадков «ПОТОК ЭМ-1» производительностью 0,1 м³/ч.

Испытания проводились на осадках сточных вод: смесь первичного осадка и избыточного активного ила (1:2). Место отбора: действующие канализационные очистные сооружения г. Ишима.

Анализы проводились в лаборатории АО «ВОДОКАНАЛ» г. Ишим.
Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Смесь первичного осадка и активного ила в пропорции 1:2

№ п/п	Показатели	Исходная смесь осадков	Смесь осадков после обработки на установке «ПОТОК ЭМ-1»	Примечания
1	Объем уплотненных осадков, мл	300,0	256,0	Продолжительность уплотнения – 120 мин
2	Время капиллярного всасывания, сек	48	36	Экспресс-метод оценки фильтруемости осадков

3	Влажность, %	98,4	97,5	Продолжительность обработки на установке - 9 мин.
4	Железо общее, мг/дм ³	0,6	0,51	
5	Медь	0,023	0,02	
6	Цинк	0,13	0,09	
7	Свинец	0,021	0,02	

Выводы: проведенные опытно-промышленные испытания подтвердили эффективность обработки осадков сточных вод СВЧ электромагнитным излучением: повышается степень уплотнения смеси осадков, улучшается влагоотдача, повышается выход соединений тяжелых металлов в осветленную воду. Внедрение технологии и оборудования обработки осадков СВЧ электромагнитным излучением позволит получить безопасный продукт для вторичного использования, например в качестве удобрения, почвоулучшителя.

Генеральный директор
АО «ВОДОКАНАЛ»

Начальник канализационных
очистных сооружений

Инженер-эколог
И.о. технолог канализационных
очистных сооружений



Филимонов Е.И.

Зайцев В.Ф.

Ситникова О.А.