

*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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Вялкова Елена Игоревна**

Официальные оппоненты: **Глушанкова Ирина Самуиловна**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет», г. Пермь, кафедра «Охраны  
окружающей среды», профессор;

**Амбросова Галина Тарасовна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный  
архитектурно-строительный университет»,  
г. Новосибирск, кафедра «Водоснабжение  
и водоотведение», профессор.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Петербургский государственный  
университет путей сообщения Императора  
Александра I».

Защита диссертации состоится «18» июня 2021 г. в 11.00 часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.06** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, (аудитория 220).

Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте: <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/obuhova-marina-vitalevna>.

Автореферат диссертации разослан «28» апреля 2021 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
канд. техн. наук, доцент

 Пухал Виктор Алексеевич

# 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность 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 м<sup>3</sup> 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 они 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, И. С. Туровского, 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.

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

## **Задачи исследования:**

– 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.

**Объект исследования** – осадки сточных вод (смесь первичного осадка и активного ила, активный ил).

**Предмет исследования** – свойства осадков сточных вод.

**Научная новизна исследования:**

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 (натурные) исследования по стандартным методикам, методы математической обработки результатов.

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 проточной 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.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность исследований подтверждается сходимостью результатов лабораторных,

опытно-промышленных (натурных) испытаний и результатов, полученных на основе математического планирования эксперимента. Результаты, полученные автором, сходятся с экспериментальными данными других исследователей.

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 водопользования и экологии 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 водоснабжения и водоотведения ТИУ (2021 г.).

**Премии и гранты:** целевой грант на поддержку реализации научных проектов молодых учёных (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.

*Во введении* кратко изложена актуальность темы диссертационного исследования, определена степень разработанности вопроса, сформулированы цели и задачи исследования, показана её научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации и внедрении результатов работы.

*В первой главе* обоснована актуальность вопроса эффективной обработки осадков сточных вод, проведён анализ современной ситуации в области обращения с осадками в России и за рубежом, охарактеризованы существующие методы и способы обработки, представлены имеющиеся

в научно-технической литературе исследования о возможности использования СВЧ-излучения в области очистки сточных вод и обработки осадков, предложена гипотеза влияния микроволн на влагоотдающие свойства осадков, изложены цели и задачи работы.

*Во второй главе* представлен анализ технологии обработки и утилизации осадков на очистных сооружениях канализации г. Тюмени, дана характеристика объектов, методов и методик исследования, описан принцип действия и приведены технические характеристики разработанной опытно-промышленной установки СВЧ-обработки осадков «ПОТОК ЭМ-1».

*В третьей главе* представлены результаты экспериментальных исследований влияния СВЧ-излучения при порционной обработке в СВЧ-печи на уплотнение, влагоотдачу, содержание тяжёлых металлов, изменение структуры осадков, выполнена математическая обработка полученных данных. Показаны результаты исследования влияния микроволн при обработке на установке «ПОТОК ЭМ-1» в проточном режиме, приведены результаты сравнения эффективности микроволнового излучения и реагентной обработки осадков.

*В четвёртой главе* выполнено сравнение технико-экономических показателей традиционного реагентного метода и способа микроволновой обработки осадков, рассчитан предотвращенный экологический ущерб при внедрении предлагаемого способа, предложены варианты технологических схем обработки осадков и разработан паспорт предлагаемого метода СВЧ-обработки.

*В заключении* изложены основные итоги выполненного исследования, сделаны предложения о его возможных дальнейших направлениях.

## **II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

**1. Результаты экспериментальных исследований влияния СВЧ-излучения на свойства осадков сточных вод (степень уплотнения, объём и влажность, влагоотдающие свойства, содержание тяжёлых металлов, структуру осадков) в условиях порционной обработки.**

*С целью изучения кинетики уплотнения исходного активного ила и ила, обработанного в СВЧ-печи*, были получены графики изменения высоты границы раздела фаз от продолжительности уплотнения, представленные на рисунке 1.

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.

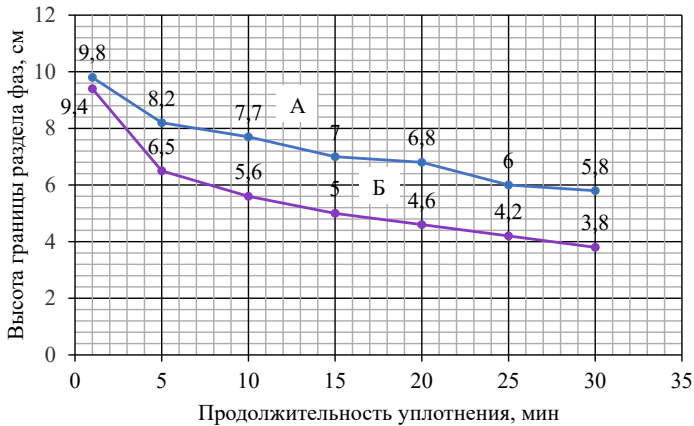


Рисунок 1 – Графики кинетики уплотнения активного ила:  
 А – для исходного активного ила; Б – для активного ила после 5-минутной обработки в СВЧ-печи мощностью 0,8 кВт

С целью сравнения кинетики уплотнения осадков, обработанных в СВЧ-печи и после нагрева электротокком, были получены опытные данные и построены графики, отображающие характеристики процесса уплотнения смеси осадков (рис. 2).

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.

С целью изучения влияния продолжительности СВЧ-обработки ( $t$ ) и мощности ( $N$ ) СВЧ-печи на высоту раздела фаз ( $H$ ) при уплотнении смеси первичного осадка и активного ила пробы смеси осадков помещались в жаропрочной посуде в СВЧ-печь и обрабатывались микроволнами, а затем уплотнялись до момента видимого разделения фаз. При этом продолжительность и мощность СВЧ-излучения варьировались согласно двухфакторному плану эксперимента ( $t = 1 \div 5$  минут;  $N = 0,48 \div 0,8$  кВт).

В ходе математической обработки результатов эксперимента получено уравнение (1), адекватно описывающее зависимость  $H_{\text{см}} = f(t, N)$  для смеси осадков.

$$H_{\text{см}} = 5,239 - 1,46 \cdot t + 1,22 \cdot N - 0,312 \cdot t \cdot N + 0,203 \cdot t^2 - 1,693 \cdot N^2. \quad (1)$$



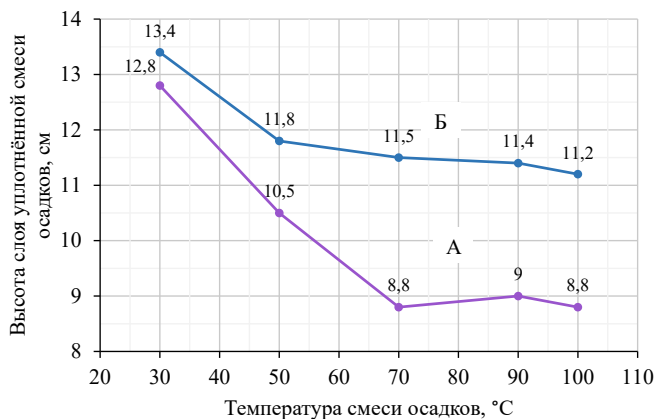


Рисунок 2 – Графики уплотнения смеси осадков: А – для смеси осадков после СВЧ-обработки; Б – для смеси осадков после нагрева электротокком

Подобный эксперимент проводился для активного ила, получено уравнение, адекватно описывающее зависимость  $H_u = f(t, N)$  для активного ила в натуральном масштабе, которое имеет вид:

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

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.

В результате анализа влияния продолжительности СВЧ-обработки на объём и влажность смеси осадков сточных вод получены зависимости, представленные на рисунках 3 и 4.

Уравнение регрессии, описывающее зависимость изменения объёма осадка ( $V$ ) от продолжительности СВЧ-обработки ( $t$ ), полученное на основании результатов эксперимента, имеет вид:

$$V = 0,51 \cdot t^2 - 14,9 \cdot t + 200. \quad (3)$$

Уравнение, адекватно описывающее зависимость изменения влажности ( $W$ ) от продолжительности СВЧ-обработки ( $t$ ), при постоянной мощности (0,8 кВт) следующее:

$$W = 96,1 \cdot e^{-0,004 \cdot t}. \quad (4)$$

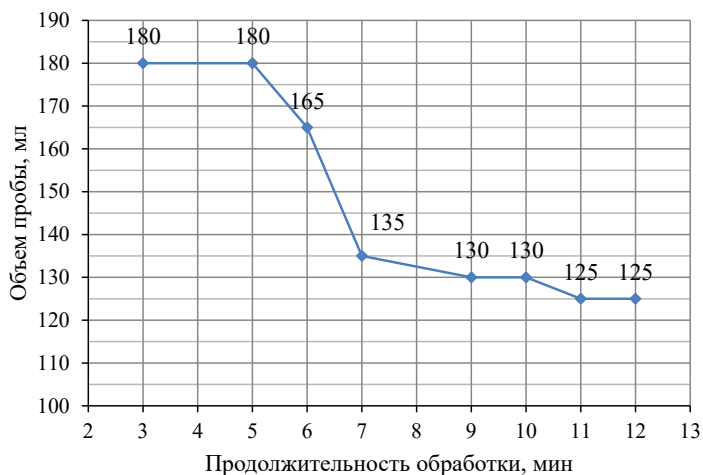


Рисунок 3 – График изменения объёма неуплотнённого осадка от продолжительности обработки микроволнами

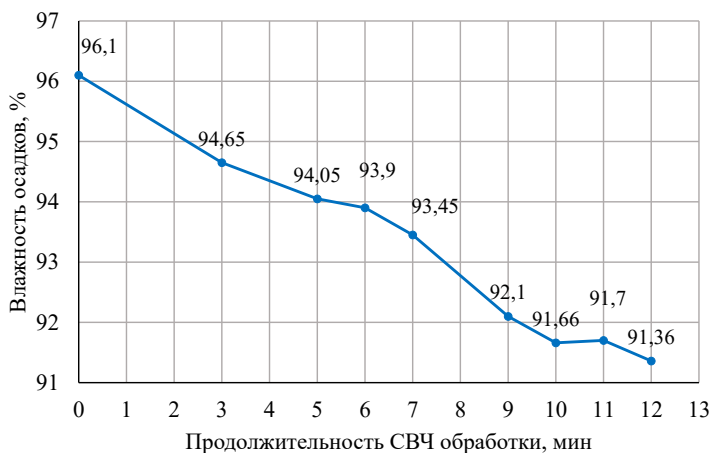


Рисунок 4 – График изменения влажности неуплотнённого осадка от продолжительности обработки микроволнами

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 %.

Оценка воздействия СВЧ-излучения на влагоотдачу осадков (удельное сопротивление фильтрации, время капиллярного всасывания) проводилась на примере смеси первичного осадка и активного ила (рис. 5, 6).

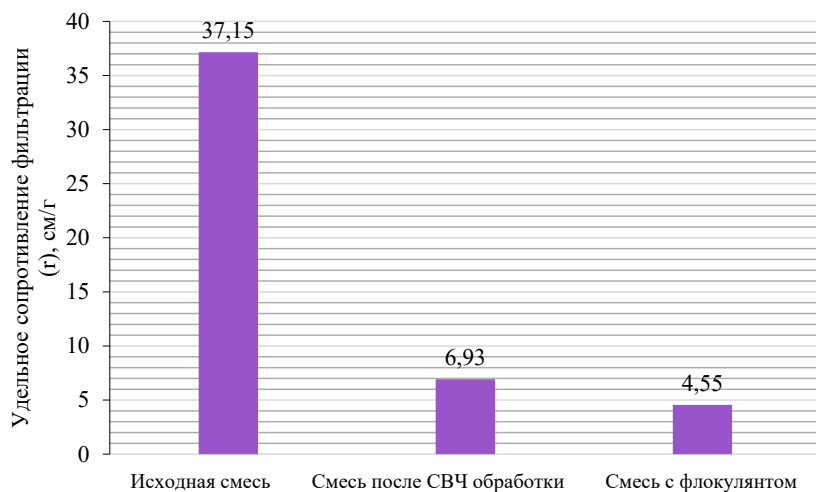


Рисунок 5 – Сравнительные гистограммы удельного сопротивления фильтрации смеси осадков

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.

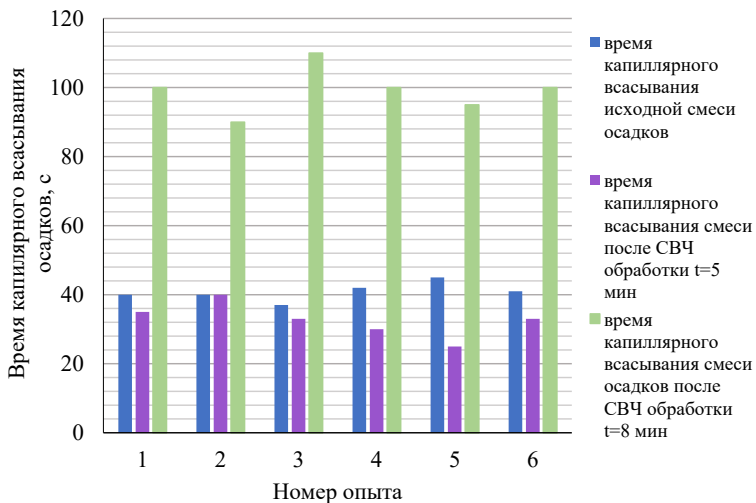


Рисунок 6 – Сравнительные гистограммы времени капиллярного всасывания осадков

В ходе опытов было установлено, что при СВЧ-обработке осадков мощностью 0,8 кВт в течение 5 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.

При обработке продолжительностью более 8 мин время капиллярного всасывания увеличивается в среднем в 2,4 раза, т.к. в результате длительной СВЧ-обработки происходит значительное испарение влаги, осадок становится вязким.

*Изучение действия СВЧ-излучения на содержание тяжёлых металлов в осадках.* Результаты экспериментальных исследований, представленные на рисунке 7, показали, что обработка СВЧ-излучением осадков интенсифицирует выход примесей мышьяка, никеля, ртути, хрома (6+) в осветлённую воду – наблюдается повышение содержания примесей тяжёлых металлов в воде, и, как следствие, количество примесей данных металлов в осадках уменьшается. При использовании способа СВЧ-обработки осадков с целью снижения содержания в них тяжёлых металлов, необходимо предусмотреть мероприятия по очистке осветлённой воды от тяжёлых металлов перед её дальнейшей обработкой или утилизацией.

Для оценки изменения структуры и состава осадков после СВЧ-обработки было проведено микробиологическое исследование проб смеси

первичного осадка и активного ила до и после микроволновой обработки, при достижении температуры нагрева 75 °С (рис. 8, 9).

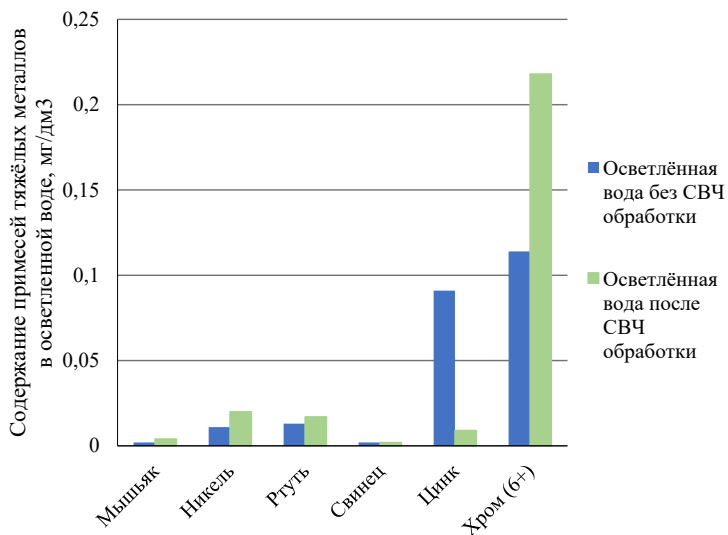


Рисунок 7 – Сравнительные гистограммы содержания примесей тяжёлых металлов в осветлённой воде

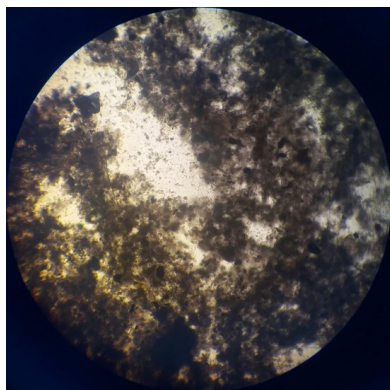


Рисунок 8 – Структура исходной смеси первичных осадков и активного ила

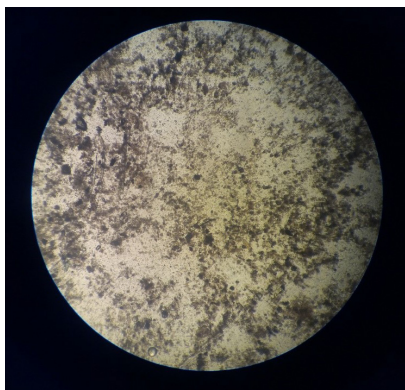


Рисунок 9 – Смесь осадков после СВЧ-обработки,  $t = 75\text{ °C}$

Визуально определяются значительные изменения пространственной структуры СВЧ-обработанного осадка (рис. 9), она 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, угнетается жизнедеятельность микроорганизмов, в том числе болезнетворных.

## **2. Результаты сравнительных исследований СВЧ-обработки осадков на проточной установке с традиционной реагентной обработкой.**

*Результаты сравнения эффективности методов обработки смеси осадков сточных вод с использованием СВЧ-излучения и с применением реагентов (флокулянта «Zetag 8165» и негашёной извести) в процессе их уплотнения представлены в таблице 1 и на рисунке 10.*

**Таблица 1 – Результаты сравнения эффективности методов обработки смеси осадков**

Продолжительность уплотнения, часы	Объёмы уплотнённых осадков, мл			
	с добавлением флокулянта «Zetag 8165» 3,5 г/кг	СВЧ-обработка на установке «Поток ЭМ-1»	с добавлением извести 2 г/дм <sup>3</sup>	без обработки
0	1000	1000	1000	1000
0,5	910	845	950	925
1	810	740	910	890
1,5	720	650	890	855
2	670	610	880	835
2,5	650	600	870	815
3	650	600	870	810

В ходе анализа результатов эксперимента было установлено, что эффективность уплотнения осадков, обработанных на установке «ПОТОК ЭМ-1», сопоставима с обработкой флокулянтом «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 %.

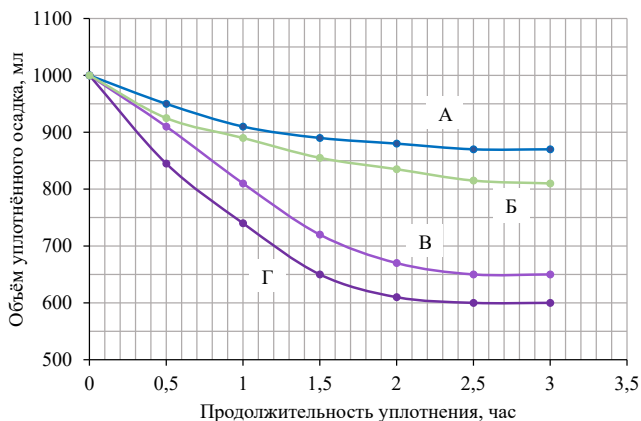


Рисунок 10 – Сравнительные графики уплотнения осадков: А – без какой-либо обработки; Б – с добавлением извести дозой 2 г/л; В – с добавлением 0,1%-ного раствора флокулянта «Zetag 8165» дозой 3,5 г/кг; Г – после 10-минутной обработки на установке «ПОТОК ЭМ-1»

*Сравнение влияния микроволн и флокулянта «Zetag 8165» на кинетику уплотнения активного ила.* Результаты выполненных экспериментов представлены в таблице 2 и на рисунке 11.

**Таблица 2 – Кинетика уплотнения избыточного активного ила**

Продолжительность уплотнения, мин	Объем уплотнённого активного ила, мл, по вариантам обработки		
	№ 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 – объем пробы активного ила после обработки микроволнами вследствие испарения уменьшается. Начальный объем всех проб – 600 мл.

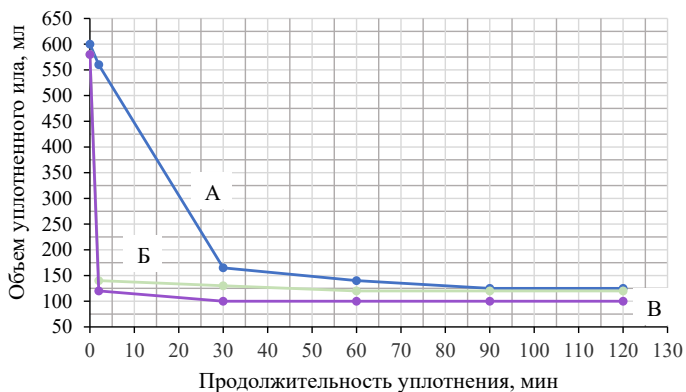


Рисунок 11 – Сравнительные графики уплотнения активного ила для различных вариантов обработки: А – исходный активный ил; Б – активный ил после обработки микроволнами в течение 7 мин; В – активный ил после микроволновой обработки продолжительностью 7 мин с добавлением флокулянта

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 %.

### 3. Конструкция и технологические характеристики установки СВЧ-обработки осадков.

Принципиальная схема конструкции опытной проточной установки «ПОТОК ЭМ-1» показана на рисунке 12.

Установка для обработки осадков сточных вод включает: две камеры (1) и (2) со встроенными в них одним СВЧ-генератором (не показано), подводящий трубопровод (3) и отводящий трубопровод (4), трубопроводы обрабатываемой жидкой 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 (манометром) (14), средством контроля температуры (термометром) (15). Отводящий трубопровод (4) оборудован средством контроля температуры (термометром) (16).

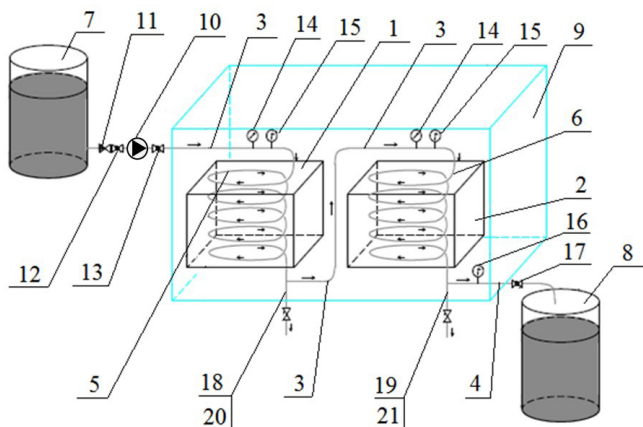


Рисунок 12 – Принципиальная схема установки «ПОТОК ЭМ-1»

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.

Технические характеристики установки «ПОТОК ЭМ-1»:

- 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 м<sup>3</sup>/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/см<sup>2</sup>.

*Достоинства конструкции установки:* проточный принцип действия, т. е. отсутствует сложное и малоэффективное ёмкостное оборудование, сокращение продолжительности обработки, компактность, мобильность, простота в эксплуатации, низкие рабочие температуры, независимость от климатического фактора.

#### **4. Техничко-экономические расчёты экологической эффективности предлагаемого способа обработки осадков СВЧ-излучением.**

Эффективность обработки и утилизации осадков рассматривается по двум вариантам:

I вариант – утилизация осадков на иловых полях с частичным обезвоживанием с добавлением флокулянта «Zetag 8165» (существующая схема на КОС МУП «ЖКХ п. Боровский»).

II вариант – 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).

Затраты на обработку и утилизацию осадков по существующей схеме на КОС п. Боровое включают в себя: затраты на электрическую энергию и реагентное хозяйство, стоимость текущего ремонта, заработную плату персонала, транспортные расходы, амортизационные отчисления и прочие расходы. При расчёте затрат при внедрении способа обработки осадков СВЧ-излучением исключены затраты на реагентное хозяйство, сокращена численность персонала, уменьшены затраты на транспортные расходы. Результаты технико-экономических расчётов представлены в таблице 3.

**Таблица 3 – Техничко-экономические показатели двух вариантов обработки и утилизации осадков сточных вод на ОСК п. Боровский**

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 <sup>3</sup> осадков	руб./год	173,3	363,75
Затраты на обработку и утилизацию осадков	тыс. руб./год	2 530,22	5 310,8

Наименование	Ед. изм.	Метод обработки осадков СВЧ-излучением и вторичное использование	Существующая схема обработки и утилизации осадков на ОСК п. Боровский
Затраты на обработку и утилизацию осадков 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

### **5. Рекомендуемые технологические схемы обработки осадков для канализационных очистных станций малой и средней производительности с использованием СВЧ-метода.**

Предложены два варианта технологических схем обработки осадков сточных вод с использованием принципиальной схемы установки «ПОТОК ЭМ-1»:

№ 1 – для КОС производительностью не более 200 м<sup>3</sup>/сут, с количеством образующегося осадка не более 4 м<sup>3</sup>/сут (рисунок 13);

№ 2 – для КОС производительностью более 200 м<sup>3</sup>/сут, с количеством образующегося осадка более 4 м<sup>3</sup>/сут (рисунок 14).

Для первого варианта технологической схемы предлагается микроволновая обработка смеси первичных осадков и избыточного активного ила. Затем осадки обезвоживаются в специальных иловых мешках, далее складываются на иловых площадках или в шламонакопителях. Осадки после обезвоживания могут вторично использоваться, например, при рекультивации земель.

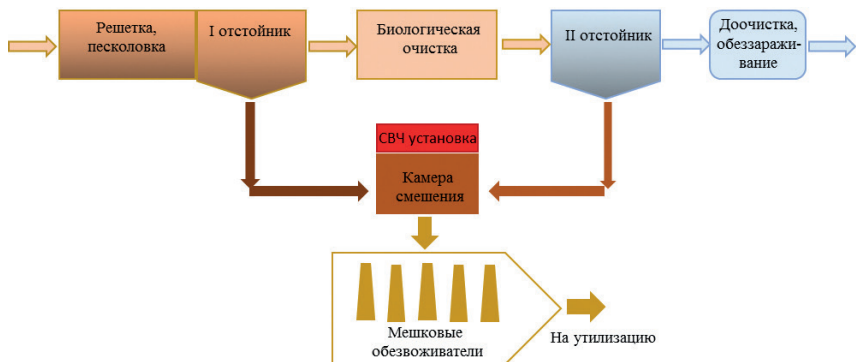


Рисунок 13 – Вариант № 1. Технологическая схема обработки осадков сточных вод для станций производительностью до 200 м<sup>3</sup>/сут с количеством осадка не более 4 м<sup>3</sup>/сут

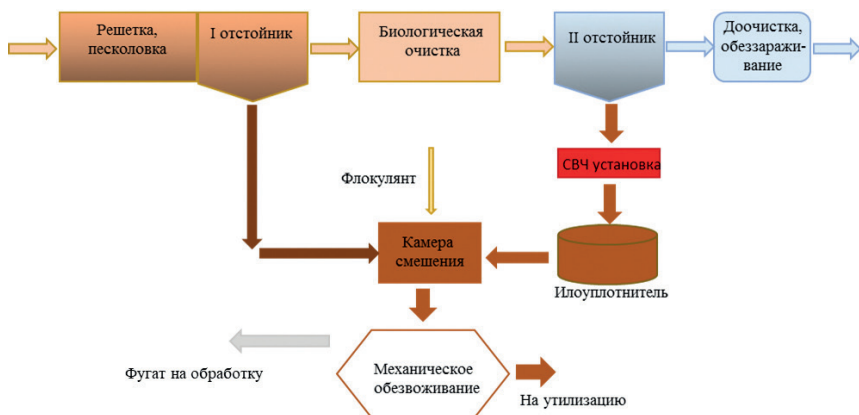


Рисунок 14 – Вариант № 2. Технологическая схема обработки осадков сточных вод для станций производительностью более 200 м<sup>3</sup>/сут с количеством осадка более 4 м<sup>3</sup>/сут

Для второго варианта технологической схемы предполагается использование установок типа «ПОТОК ЭМ-1», но с большей производительностью. Для этого необходимо усовершенствовать конструкцию разработанной установки, увеличив её пропускную способность. 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.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

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 электротокком;

- 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 натурального 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 м<sup>3</sup> 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.

### **III ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:**

#### **Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ**

1. 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. – Т. 19. – № 4. – С. 47–49. (0,2 п.л.).

2. 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. – Т. 19. – № 6. – С. 47–49. (0,13 п.л.).

3. Землянова, М. В. Влияние электромагнитной обработки на влагоотдающие свойства осадков сточных вод / М. В. Землянова. – Текст : непосредственный // Научное обозрение. – 2015. – № 18. – С. 74–78. (0,31 п.л.).

4. Землянова, М. В. Исследование комбинированного действия сверхвысокочастотного электромагнитного излучения на свойства осадков сточных вод / М. В. Землянова, Е. И. Вялкова. – DOI 10.18412/1816-0395-2018-4-20-25. – Текст :

непосредственный // Экология и промышленность России. – 2015. – Т. 22. – № 4. – С. 20–25. (0,19 п.л.).

5. Кичигин, В. И. Исследование возможности использования СВЧ-излучения для обработки жидких коммунальных отходов / В. И. Кичигин, М. В. Землянова, Е. И. Вялкова. – DOI 10.17673/Vestnik.2018.01.8. – Текст : непосредственный // Градостроительство и архитектура. – 2018. – Т. 8. – № 1(30). – С. 44–49. (0,19 п.л.)

6. Обухова, М. В. Интенсификация процесса уплотнения осадков природных и сточных вод микроволновым излучением / М. В. Обухова. – Текст : непосредственный // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2021. – № 1(16). – С. 50–56. (0,5 п.л.)

### **Публикации в изданиях, индексируемых в SCOPUS и Web of Science**

1. Vialkova, E. Effective sediment treatment of urban sewage by microwave radiation / E. Vialkova, M. Zemlyanova, A. Pesheva. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.871.223. – Text : electronic // Materials Science Forum. – 2016. – Vol. 871. – P. 223–232. – URL : <https://www.scientific.net/MSF.871.223> (date of application : 05.12.2019). (0,19 п.л.)

2. Conceptual approach to the creation of «smart» sewerage system for city surface runoff / E. Vialkova, S. Maksimova, E. Malyshkina [et al.]. – DOI 10.1088/1757-899X/365/2/022001. – Text : electronic // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – Vol. 365. – 2018. – URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/365/2/022001> (date of application : 03.12.2018). (0,1 п.л.)

3. Vialkova, E. Treatment and utilization of liquid communal waste in the cities / E. Vialkova, M. Zemlyanova, A. Fugaeva. – DOI 10.1051/mateconf/201821203005. – Text : electronic // MATEC Web of Conferences. – Vol. 212. – 2018. – URL : [https://www.matec-cofeences.org/articles/mateconf/abs/2018/71/mateconf\\_icre2018\\_03005/mateconf\\_icre2018\\_03005.html](https://www.matec-cofeences.org/articles/mateconf/abs/2018/71/mateconf_icre2018_03005/mateconf_icre2018_03005.html) (date of application : 03.12.2018). (0,19 п.л.)

4. The protection of urban areas from surface wasterwater pollutions / E. Vialkova, M. Zemlyanova (Obuhova), A. Vorotnikova [et al.]. – DOI 10.1051/mateconf/201710607008. – Text : electronic // MATEC Web of Conferences, SPbWOSCE-2016. – Vol. 106. – 2017. – URL : [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/20/mateconf\\_spbw2017\\_07008.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/20/mateconf_spbw2017_07008.pdf) (date of application : 20.01.2020). (0,19 п.л.).

5. Energy efficiency in municipal waste treatment / E. Vialkova, M. Zemlyanova, O. Danilov. – DOI 10.1051/mateconf/201817004020. – Text : electronic // MATEC Web of Conferences. – Vol. 170. – 2018. – URL : <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817004020> (date of application : 10.05.19). (0,25 п.л.).

6. Sidorenko, O. Investigation of the prebiotic agent influence on the sewage quality and active sludge properties / O. Sidorenko, M. Zemlyanova, E. Vialkova. – DOI 10.1088/1757-899X/451/1/012209. – Text : electronic // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – Vol. 451. – 2018. – URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/451/1/012209/pdf> (date of application : 23.07.2020). (0,13 п.л.).

7. Integrated design approach to small sewage systems in the arctic climate / E. Vialkova, S. Maksimova, M. Zemlyanova [et al.]. – DOI : 10.1007/s40710-020-00427-6. – Text : electronic // Environmental Processes. – Vol. 7. – 2020. – URL : [https://www.researchgate.net/publication/339985573\\_Integrated\\_Design\\_Approach\\_to\\_Small\\_Sewage\\_Systems\\_in\\_the\\_Arctic\\_Climate](https://www.researchgate.net/publication/339985573_Integrated_Design_Approach_to_Small_Sewage_Systems_in_the_Arctic_Climate) (date of application : 15.06.2020). (0,1 п.л.).

### Статьи в других изданиях

1. 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. (0,2 п.л.).

2. Вялкова, Е. И. К вопросу обработки и утилизации осадков сточных вод / Е. И. Вялкова, М. В. Землянова. – Текст : непосредственный // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы строительства и экологии в Западной Сибири». – Тюмень. – 2005. – С. 20–23. (0,13 п.л.).

3. Вялкова, Е. И. К вопросу применения физических методов интенсификации процессов очистки сточных вод и осадков / Е. И. Вялкова, М. В. Землянова. – Текст : непосредственный // Сборник материалов XII научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей ТюмГАСУ. – 2013. – С. 135–142. (0,13 п.л.).

4. 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/redir?resid=423D4F47E402C445%212908> (дата обращения : 10.05.2015). (0,31 п.л.).

5. Землянова, М. В. Обоснование экономической эффективности применения СВЧ электромагнитного излучения в процессах обработки осадков городских сточных вод / М. В. Землянова, Е. И. Вялкова. – Текст : непосредственный // Сборник материалов XIII научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и соискателей ТюмГАСУ. – Тюмень, 2014. – С. 142–146. (0,25 п.л.).

6. 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. (0,31 п.л.).

7. Землянова, М. В. Безреагентный способ обработки и обезвреживания осадков городских сточных вод с помощью сверхвысокочастотного электромагнитного излучения / М. В. Землянова. – Текст : непосредственный // Водочистка. – 2016. – № 1. – С. 39–49. (0,68 п.л.).

8. Vialkova, E. Using of microwave electromagnetic radiation for treatment of wastewater and sludge / E. Vialkova, M. Zemlyanova, A. Pesheva. – Text : electronic // Ecology & Safety Journal of International Scientific Publications. – Vol. 10. – 2016. – P. 121–129. – URL :



<https://www.scientific-publications.net/get/1000017/1465309281721879.pdf> (date of application : 10.05.2017). (0,1 п.л.).

9. Вялкова, Е. И. Обработка высококонцентрированных коммунальных сточных вод электромагнитным излучением СВЧ диапазона / Е. И. Вялкова, А. В. Пешева, М. В. Землянова. – Текст : непосредственный // Сборник докладов XVIII Международной научно-практической конференции «Водосбережение, мелиорация и гидротехнические сооружения как основа формирования агрокультурных кластеров России в XXI веке». – Тюмень : РИО ТюмГАСУ, 2016. – С. 49–55. (0,14 п.л.).

10. Землянова, М. В. Перспективный способ и оборудование для решения задач обработки сточных вод и осадков в Арктической зоне РФ / М. В. Землянова. – Текст : непосредственный // Материалы Международной научно-практической конференции «Арктика: современные подходы к производственной и экологической безопасности в нефтегазовом секторе». – Тюмень : ТИУ, 2019. – Т. 2. – 106–110 с. (0,31 п.л.).

### **Патент РФ на изобретение**

1. 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.

2. 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.

### **Монографии**

1. Водоотведение объектов инфраструктуры нефтегазовых месторождений Западной Сибири : монография / Е. И. Вялкова, С. В. Максимова, М. В. Землянова [и др.]. – Тюмень : ТИУ, 2017. – 175 с. – Текст : непосредственный. (3,25 п.л.).

---

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 06.04.2021. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 21.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.  
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.