

На правах рукописи

РЯХОВСКИЙ Михаил Сергеевич

**ОЧИСТКА ПРИРОДНЫХ ВОД С ПРИМЕНЕНИЕМ
КОМПЛЕКСНЫХ СОРБЦИОННЫХ ЗАГРУЗОК**

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

АВТОРЕФЕРАТ

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

Санкт-Петербург –2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Феофанов Юрий Александрович

Официальные оппоненты: **Дзюбо Владимир Васильевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Гомский государственный архитектурно-строительный университет», проректор по учебной работе;

Васильев Алексей Львович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра водоснабжения и водоотведения, заведующий

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО «Петербургский Государственный университет путей сообщения Императора Александра I»**

Защита состоится «18» апреля 2016 г. в 15³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.06 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний диссертационного совета (ауд. 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/>

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент Пухкал Виктор Алексеевич

I ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы. Для получения качественной питьевой воды из источников, подверженных антропогенному и техногенному загрязнению, требуется совершенствование технологии водоподготовки, модернизация очистных сооружений с использованием новейших технологий очистки и оборудования.

Средние и мелкие населенные пункты, в особенности сельские поселения, имеют проблемы с обеспеченностью питьевой водой нормативного качества. В сельской местности свыше 1/3 населения использует для питьевых целей воду из децентрализованных источников, качество воды которых остаётся низким вследствие их загрязнения с окружающих территорий.

Особенно остро стоит задача водоподготовки малых поселений, отдельно расположенных и мобильных объектов, в том числе, в условиях ЧС.

В связи с этим становится актуальной задача совершенствования существующих, разработка новых эффективных и экономичных методов и конструкций сооружений для очистки природных вод, особенно для небольших населенных мест, отдельно стоящих и мобильных объектов, а также в условиях ЧС. Для водоподготовки таких объектов применяют различные типы компактных установок, которые должны отвечать следующим требованиям: простота устройства, технологичность, компактность, низкие эксплуатационные затраты, надежность и устойчивость к перегрузкам.

Из всех известных типов малогабаритных водоочистных сооружений этим требованиям наиболее полно соответствуют мобильные установки водоподготовки (МУВ) средств полевого водообеспечения. Между тем, их работа изучена в недостаточной мере, а применяемые технологические схемы и конструкции этих сооружений ограничены традиционными решениями, которые имеют ряд недостатков (низкую эффективность, высокую стоимость, недостаточно высокую надежность в работе и др.). Основным узлом большинства МУВ являются сорбционные фильтры (СФ), применение которых эффективно для извлечения различных растворенных органических примесей (РОП). Конструктивные решения существующих типов СФ различаются, главным образом, в выборе материала загрузки, формы корпуса, количества ступеней фильтрации и в других конструктивных характеристиках. Традиционные сорбционные фильтры с однородной загрузкой из активированных углей (АУ) имеют известные недостатки, в частности, высокую стоимость, ограниченный ресурс и низкую надежность в работе. Кроме того, данные по эффективности применения различных сорбентов для очистки от разных видов органических загрязнений сильно разобщены и неоднозначны.

Перспективным направлением совершенствования метода сорбционной очистки воды является применение комплексных сорбционных загрузок

(КСЗ), которые позволяют увеличить сорбционную емкость фильтров, настраивать их на эффективное устранение различных органических соединений, присутствующих в природной воде. Однако данные о применении комплексных сорбционных загрузок для водоподготовки из загрязненных водоемов в литературе практически отсутствуют, поэтому выявление закономерностей процесса очистки воды на них в условиях высокой степени загрязнения водисточников, получение экспериментальных данных об эффективности их работы, совершенствование технологических схем работы сорбционных фильтров МУВ остается актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования.

В ходе исследования за основу приняты работы ученых, изучавших методы очистки природных вод в полевых условиях, а также сорбцию, фильтрование и описание гидравлических процессов, протекающих при фильтровании воды через слои зернистой загрузки: Минц Д. М., Абрамов Н. Н., Кульский Л. А., Николадзе Г. И., Дубинин М. М., Смирнов А. Д., Когановский А. М., Швецов В. Н., Тарасевич Ю. И., Кафаров В. В., Смит С., Экенфельдер В.В., Левеншпиль О., Грег С., Рамм В. М., Брайнес Я. М., Феофанов Ю. А., Дзюбо В. В., Васильев Л. А., Васильев А. Л., Иванов В. Г., Штыков В. И., Лямаев Б. Ф., Мишуков Б. Г., Игнатчик В. С. и др.

Цель исследования заключается в выборе состава и определении эффективности применения комплексной сорбционной загрузки при очистке природных вод с повышенным содержанием органических соединений для применения в мобильных водоочистных установках.

Задачи исследования:

- изучение и оценка различных схем работы и конструкций мобильных установок водоподготовки, видов сорбционных материалов, применяемых в них;
- проведение экспериментальных исследований по выбору оптимального вида и состава комплексных сорбционных загрузок для изъятия разных органических загрязнений (нефтепродуктов и фенолов);
- определение закономерностей процесса сорбции нефтепродуктов и фенолов на однородных и комплексных загрузках из активированных углей в статических и динамических условиях;
- исследование гидродинамических свойств сорбционных фильтров;
- разработка математического описания процесса очистки воды от нефтепродуктов и фенолов на фильтрах с КСЗ;
- совершенствование технологических схем работы мобильных установок водоподготовки с использованием КСЗ;
- разработка рекомендаций по расчету и проектированию МУВ с применением КСЗ.

Основная концепция настоящей работы основана на предположении, что сорбционную загрузку с развитой переходной поверхностью можно создать на комплексе разных сорбционных загрузок (КСЗ), с различной

структурой, объемом и размером пор, гидрофобностью и послойным распределением внутри СФ, что создает развитую переходную поверхность. Активированные угли, используемые на стадии глубокой доочистки, обеспечивают возможность удаления растворенных органических веществ в случае соответствия параметров пористой структуры сорбента размерам молекул примеси. Например, уголь марки БАУ-А хорошо сорбирует нефтепродукты, а уголь марки МАУ-2А хорошо сорбирует ПАВ и фенолы.

Предположение об эффективной работе КСЗ основывается на том, что, учитывая неоднородность пор выбранных АУ, нефтепродукты (усредненный размер молекул 1,8 нм) будут улавливаться на верхнем слое, а фенолы (средний размер молекул - 0,71 нм) - на нижнем слое. За счет этого, адсорбционная емкость загрузки будет увеличиваться. Положительным фактором является и разница насыпных плотностей и структуры гранул (частиц) выбранных АУ в комплексной загрузке, что позволяет производить промывку и регенерацию загрузки без нарушения ее состава. Нижний слой КСЗ в фильтре, должен быть сформирован из МАУ-2А, а верхний из БАУ-А, таким образом, искусственно создается требуемая переходная пористость и поверхность.

Объектом исследования являлись водные растворы с различной концентрацией органических загрязнений: нефтепродуктов и соединений фенольной группы.

Предметом исследования является способ очистки воды от нефтепродуктов и фенолов с применением комплексной сорбционной загрузки.

Научная новизна и значимость проведённых исследований заключается в следующем:

1. На основании экспериментальных исследований сорбционной емкости однородных и комплексной загрузок из активированных углей различных марок в статических условиях установлено, что комплексная загрузка КСЗ (из смеси активированных углей марок МАУ и БАУ) имеет более высокую сорбционную емкость (в сравнении с однородными загрузками из этих же АУ) по нефтепродуктам и фенолам, в частности, при невысоких концентрациях этих загрязнений.

2. Исследованиями работы сорбционных фильтров с комплексными загрузками разного состава установлено, что лучшие показатели имеет комплексная загрузка КСЗ-1, состоящая из равных объемов АУ марки БАУ-А (верхний слой) и марки МАУ-2А (нижний слой); разница в плотности этих сорбентов способствует их послойному распределению в СФ и позволяет использовать в полной мере емкость загрузки.

3. Установлено, что скорость изъятия загрязнений в процессе работы фильтра с комплексной сорбционной загрузкой КСЗ-1 меняется: в 1-ой зоне она постоянна и не зависит от продолжительности работы фильтра; во 2-ой зоне скорость сорбции постепенно снижается. Граница между этими зонами близка к продолжительности работы фильтра до

проскока загрязнений, конец 2-ой зоны наступает при полном исчерпании сорбционной емкости загрузки фильтра.

4. В результате сравнительных исследований эффективности применения однородных и комплексной загрузок в динамическом режиме установлено, что комплексная загрузка КСЗ-1 имела лучшие показатели по сорбции нефтепродуктов, в сравнении с однородной загрузкой из активированных углей марок МАУ-2А, БАУ-А. Сорбция фенолов протекает примерно с одинаковой скоростью на всех испытанных видах загрузок.

5. Определены показатели статической и динамической сорбционной емкости комплексной загрузки КСЗ-1, закономерности процесса сорбции нефтепродуктов и фенолов, удельные скорости изъятия этих загрязнений при очистке воды, установлена возможность применения этой загрузки для мобильных установок водоподготовки.

6. В результате проведенных исследований гидродинамических характеристик сорбционного фильтра с комплексной загрузкой получены данные о фактической продолжительности пребывания жидкости в загрузке сорбционного фильтра и степени перемешивания потока жидкости.

7. Разработаны математическая модель сорбционных фильтров с комплексной загрузкой, метод их расчета и рекомендации по расчету и проектированию мобильных установок водоподготовки с применением сорбционных фильтров с КСЗ.

Теоретическая значимость работы заключается в предлагаемом алгоритме расчета сорбционного фильтра и математическом описании сорбционных емкостей фильтра и продолжительности его работы.

Практическая значимость состоит:

– в результатах исследований по эффективности работы сорбционных фильтров с разными видами однородных и комплексных загрузок в статических и динамических условиях;

– в определении гидродинамических свойств сорбционных фильтров с КСЗ;

– в разработке технологической схемы мобильных установок водоподготовки (МУВ) с КСЗ;

– в разработке рекомендаций по расчету и проектированию МУВ с применением КСЗ;

– в определении экономической эффективности применения КСЗ.

Результаты работы применены в ходе разработки «Системы добровольной сертификации объектов недвижимости – «Зеленые стандарты» для России в 2011г. (Акт внедрения №41 от 04 июля 2013г., выдан НП «Центр экологической сертификации – зеленые стандарты») и внедрены на производстве ООО НПП «Полихим», г. Сосновый Бор (Акт внедрения от 14.07.2014).

Методология и методы исследования. В работе использовались классические положения теории сорбционной очистки природных вод и

современные тенденции их развития, современные методики проведения лабораторных исследований и методы математической обработки данных и анализа результатов исследований.

В диссертации представлены результаты научно-исследовательских работ, полученные автором лично и в сотрудничестве с научными работниками кафедры водопользования и экологии СПбГАСУ, кафедры ХТМИСТ СПбГТИ (ТУ), специалистами лаборатории ООО «ПромЭкоСфера», г. Санкт-Петербург.

Положения, выносимые на защиту:

- на основании результатов проведенных экспериментальных исследований сорбционной емкости однородных и комплексной загрузок из активированных углей различных марок в статических и динамических условиях установлены преимущества комплексной загрузки в сравнении с однородными загрузками из этих же АУ;

- сравнительными исследованиями работы сорбционных фильтров с комплексными загрузками разного состава установлено, что лучшие показатели имеет комплексная загрузка КСЗ-1, состоящая из равных объемов АУ марки БАУ-А (верхний слой) и марки МАУ-2А (нижний слой);

- изучена динамика изъятия загрязнений в процессе работы фильтров с комплексной сорбционной загрузкой КСЗ-1;

- получены экспериментальные данные о статической и динамической сорбционной емкости комплексной загрузки КСЗ-1, установлены закономерности процесса сорбции нефтепродуктов и фенолов, удельные скорости изъятия этих загрязнений при очистке воды;

- экспериментально определены гидродинамические характеристики сорбционного фильтра с комплексной загрузкой;

- разработаны математическая модель сорбционных фильтров с комплексной загрузкой, метод их расчета, технологические схемы и рекомендации по расчету и проектированию мобильных установок водоподготовки с применением сорбционных фильтров с КСЗ.

Область исследования соответствует требованию паспорта научной специальности ВАК 05.23.04 – Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов и заключается в совершенствовании методов сорбционной очистки, математического описания процессов сорбционной очистки, развитии пунктов: 3. Методы очистки природных и сточных вод, аппаратов и механизмов; и 7. Применение коагулянтов, флокулянтов, катализаторов, сорбентов и других реагентов для очистки сточных и природных вод, обработки шламов и осадков.

Степень достоверности и апробация результатов.

Степень достоверности результатов базируется на использовании классических теорий сорбции, фильтрации, и применений современных средств анализа полученных данных. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и других конференциях:

68-я Научная конференция профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета, Санкт-Петербург, 2011 г.; Международный конгресс, посвященный 180-летию СПбГАСУ, Санкт-Петербург, «Наука и инновации в строительстве – 2012», 2012 г.; Политехнический Фестиваль, Конференция «Энергетика, энергосберегающие и экологические технологии», Санкт-Петербург, 2012 г.; Международная конференция «Академические чтения», ПГУПС, 2013 г.; Шестой Невский международный экологический конгресс, Круглый стол №8 «Комплексное управление водными ресурсами: использование и качество воды», Санкт-Петербург, ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга», 22 мая 2013 г.; V Международная конференция «Актуальные проблемы архитектуры и строительства» СПбГАСУ, 2013 г.; 68-ая международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства», посвященная 110-летию Хомуцкого Н.Ф.; международная научно-практическая конференция «Новые достижения в областях водоснабжения, водоотведения, гидравлики и охраны водных ресурсов» ПГУПС, 2015 г.

Результаты научных исследований отмечены Комитетом по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга и субсидированы в рамках Комплексной программы «Наука. Промышленность. Инновации» в 2012 г. (Диплом Правительства Санкт-Петербурга серия ПСП № 12473).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 10 научных статьях общим объемом 9,24 п.л., лично автором 1,50 п.л., из них 6 статей общим объемом 5,44 п.л., лично автором 1,50 п.л. в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК.

Материалы исследований вошли в книгу «Обеспечение войск водой в полевых условиях. Учебно-методическое пособие. –СПб.: ВАМТО, 2012. – 330 с. (Военная академия материально-технического обеспечения имени генерала армии А.В. Хрулева)» и внедрены в учебный процесс.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами по каждой из глав, общих выводов. Диссертация изложена на 178 страницах машинописного текста, содержит 13 таблиц, 55 формул, 71 рисунок, 17 приложений, и список литературы из работ отечественных и зарубежных авторов, состоящий из 105 наименований.

Во введении обоснована актуальность и сформулирована проблема выбранного направления исследований, сформулированы цель и задачи, научная новизна и практическая значимость проводимых исследований.

В первой главе представлен обзор и анализ научно-технической литературы, посвященный особенностям очистки природных вод на МУВ в полевых условиях, состоянию вопроса сорбционной очистки природных вод. Представлен обзор существующих технологий очистки природных вод на МУВ, обзор методов математического описания сорбционных процессов. Определены задачи исследования.

Во второй главе приведены результаты исследований по определению сорбционной емкости однородных и комплексных загрузок из разных АУ в статических условиях, опытным путем доказано, что КСЗ обладает более высокой сорбционной емкостью по нефтепродуктам и соединениям фенольной группы в сравнении с однородными загрузками.

В третьей главе приводится методика проведения исследований, описаны результаты исследований по определению сорбционной емкости однородных и комплексных загрузок из разных АУ в динамических условиях, показано, что КСЗ имела лучшие показатели по сорбции нефтепродуктов, в сравнении с однородной загрузкой из активированных углей марок МАУ-2А, БАУ-А, сорбция фенолов протекала примерно с одинаковыми скоростями на всех испытанных видах загрузок.

В четвертой главе приведены результаты гидродинамических исследований структуры потока жидкости в СФ, установлена зависимость величины фактической продолжительности пребывания жидкости в загрузке от скорости фильтрования, а также величины параметров, характеризующих структуру потока жидкости в загрузке фильтра.

Пятая глава содержит результаты обработки экспериментальных данных, рекомендации по применению КСЗ на МУВ, математическое описание процесса сорбции нефтепродуктов и фенолов на СФ с КСЗ, дан алгоритм расчета этих фильтров, представлены технико-экономические показатели применения СФ с КСЗ, приведены общие выводы.

В заключении приведены итоги исследований и основные выводы по результатам работы.

II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. На основании исследований сорбционной емкости однородных и комплексной загрузок из активированных углей различных марок в статических условиях установлено, что комплексная загрузка КСЗ (из смеси активированных углей марок МАУ и БАУ) имеет более высокую сорбционную емкость по нефтепродуктам и фенолам, в частности, при невысоких концентрациях этих загрязнений, в сравнении с однородными загрузками из этих же АУ

При проведении исследований были выбраны наиболее распространенные, эффективные отечественные марки АУ: БАУ и МАУ. Изучались следующие виды сорбционных загрузок:

1) Однородные, загрузки из АУ марок: БАУ-А; БАУ-М; МАУ-2А.

2) Комплексная загрузка КСЗ - из смеси углей марок БАУ-М и МАУ-2А в соотношении 1:1.

Рабочий раствор готовился на основе дистиллированной воды с применением загрязняющих примесей: нефтепродуктов (легкое моторное масло, ориентировочная $M_r = 300 \div 600$ а.е.м.) и фенолов (гидрохинон, ориентировочная $M_r = 110$ а.е.м.). Водный раствор нефтепродуктов получали перемешиванием

нагретого раствора моторного масла с дистиллированной водой, с последующим длительным отстаиванием (5 суток) и удалением всплывших нефтепродуктов с поверхности раствора. Температура раствора при проведении экспериментов была постоянной - 20 °С, что исключает ее влияние на результаты экспериментов. Методика определения предельной статической сорбционной емкости сравниваемых сорбентов в 1-ом и 2-ом циклах опытов заключалась в следующем: для определения изотерм сорбции навески сорбента, масса которых варьировалась в зависимости от концентрации загрязнений воды (от 0,01 до 10,0 г) заливались раствором с известной начальной концентрацией в количестве 1 дм³ и выдерживались при периодическом перемешивании в течение 7 дней до установления равновесия. В исследованиях статической сорбционной емкости сравниваемых сорбентов было проведено три цикла опытов при разной исходной концентрации загрязнений по нефтепродуктам 10, 100 и 148,0 мг/дм³, по фенолам - 10, 100 и 948,0 мг/дм³.

На рисунке 1 приведены результаты исследований 2-го цикла по определению сорбционной емкости по нефтепродуктам сравниваемых видов загрузок из раствора, содержащего смесь нефтепродуктов и соединений фенольной группы, которые показывают, что комплексная загрузка КСЗ имела наибольшую сорбционную емкость по нефтепродуктам в сравнении с однородными загрузками из АУ марок БАУ и МАУ практически во всем диапазоне изменения концентраций C_p , в том числе и большую предельную сорбционную емкость.

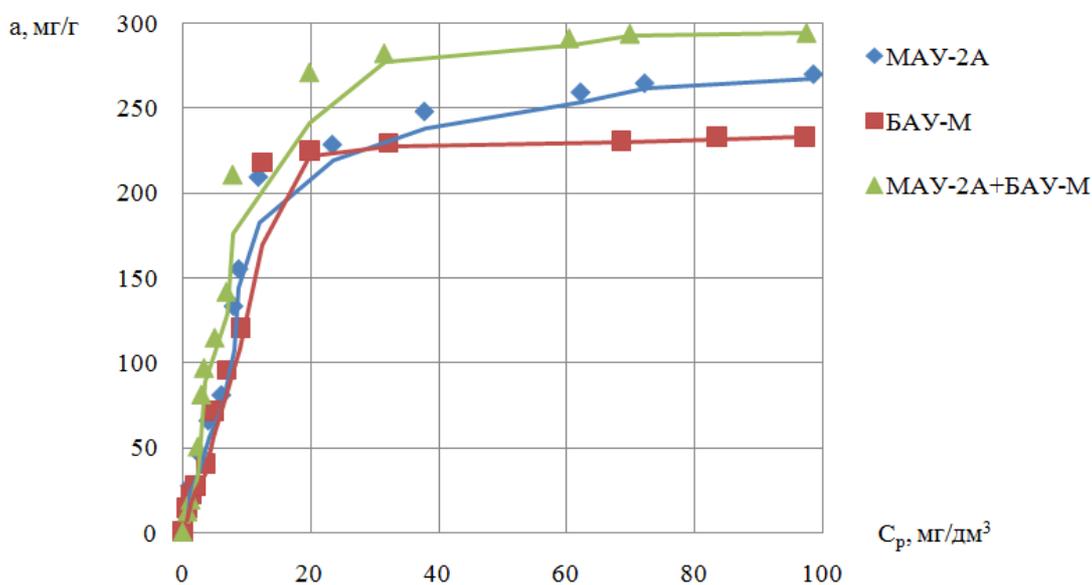


Рисунок 1 – Изотермы сорбции нефтепродуктов из раствора «нефтепродукты + фенол» различными АУ

Экспериментальные данные по полной статической сорбционной емкости комплексной загрузки КСЗ показывают, что полная СУС зависит также и от начальной концентрации загрязняющего вещества в растворе $C_{исх}$ (таблица 1).

Таблица 1 – Полная статическая сорбционная емкость комплексной загрузки КСЗ

Цикл опытов	$S_{исх}$ нефтепродуктов, мг/ дм ³	Полная СУС _{нф} по нефтепродуктам, мг/г	$S_{исх}$ по фенолу мг/ дм ³	Полная СУС _ф по фенолу, мг/г
1	148	304	948	683
2	100	294	100	129
3	10	58	10	21

Изотермы сорбции загрязнений (нефтепродуктов и фенолов) на комплексной загрузке КСЗ-1, полученные в статических условиях, относятся к разному типу изотерм, и могут описываться уравнениями, схожими по форме с уравнениями Фрейндлиха, или Генри.

2. Исследованиями работы сорбционных фильтров с комплексными загрузками разного состава установлено, что лучшие показатели имеет комплексная загрузка КСЗ-1, состоящая из равных объемов АУ марки БАУ-А (верхний слой) и марки МАУ-2А (нижний слой); разница плотности этих сорбентов способствует их послойному распределению в СФ и позволяет использовать в полной мере емкость загрузки.

Исследования проводились с целью сравнения эффективности работы сорбционных фильтров с комплексными загрузками разного состава по их сорбционной емкости и надежности их работы в СФ на лабораторной установке (рисунок 2), которая состояла из трех фильтровальных колонок с разными видами сорбционных загрузок. Были испытаны следующие виды КСЗ: 1) КСЗ - 1 – двухслойная загрузка сорбционного фильтра: нижний слой – МАУ – 2А, верхний слой – БАУ – А; с равным распределением объемов; 2) КСЗ-3 – с распределением объемов – 62,5 % БАУ-А/ 37,5 % МАУ-2А и 3) КСЗ - 4 – с распределением объемов – 70 % БАУ-А/ 30 % МАУ-2А.

При выборе состава комплексной двухслойной загрузки сорбционного фильтра принималось во внимание различие в насыпной плотности БАУ и МАУ, что позволяло использовать в полной мере пористость сорбентов путем послойного их распределения. Объем сорбционной загрузки во всех фильтрах составил – 0,66 дм³, скорость фильтрации варьировалась в диапазоне 1,71 –3,26 м/ч.

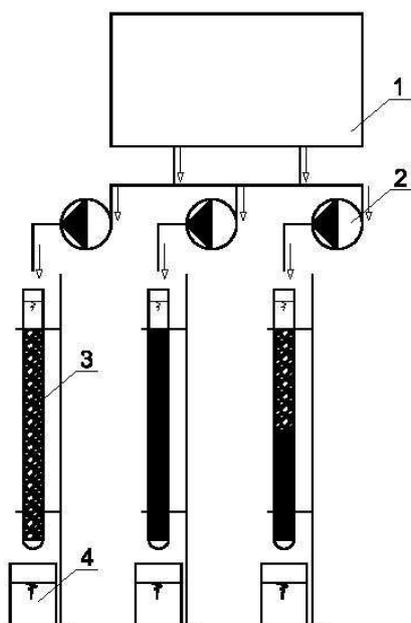


Рисунок 2 – Схема и вид опытной установки: 1 – резервуар (емкость) с модельным раствором; 2 – насос АНП-10М; 3 – фильтровальная колонка; 4 – сосуд для проб

Опыты проводились при начальной концентрации РОП в растворе: по нефтепродуктам – 0,20 и 2,80 мг/дм³, по фенолам – 0,31 и 0,90 мг/дм³. Анализы проб исходной и очищенной воды выполнялись в специализированной лаборатории по стандартным методикам.

Результаты проведенных исследований показали, что процесс сорбции нефтепродуктов на комплексных загрузках КСЗ-1, КСЗ-3 и КСЗ-4 протекал с примерно одинаковыми скоростями, которые определялись, прежде всего, начальной концентрацией загрязнений $C_{исх}$. Соединения фенольной природы сорбировались всеми испытанными видами комплексных загрузок практически одинаково. Предпочтение отдано комплексной загрузке КСЗ-1 с меньшим объемом АУ марки БАУ, ввиду повышенной зольности, неоднородности частиц и низкой прочности этого сорбента по сравнению с АУ марки МАУ-2А.

3. Установлено, что скорость изъятия загрязнений в процессе работы фильтра с комплексной сорбционной загрузкой КСЗ-1 меняется: в 1-ой зоне она постоянна и не зависит от продолжительности работы фильтра; во 2-ой зоне скорость сорбции постепенно снижается. Граница между этими зонами близка к продолжительности работы фильтра до проскока загрязнений, конец 2-ой зоны наступает при полном исчерпании сорбционной емкости загрузки фильтра.

Обработкой экспериментальных данных сорбционной емкости в динамических условиях получены зависимости изменения скорости сорбции загрязнений в процессе работы СФ с комплексной загрузкой КСЗ-1. Характер изменения скорости сорбции во времени работы фильтра показан на рисунке 3

(а - по нефтепродуктам, б – по фенолам). Как видно из рисунка 3 в динамической картине работы сорбционного фильтра можно выделить две зоны: 1-ая зона, где скорость изъятия загрязнений постоянна и не зависит от продолжительности работы фильтра T ; во 2-ой зоне скорость сорбции меняется во времени T , постепенно снижаясь от максимальной (равной скорости сорбции в 1-ой зоне) до нуля. Граница между этими зонами близка к продолжительности работы фильтра до проскока загрязнений, конец 2-ой зоны наступает при полном исчерпании сорбционной емкости загрузки фильтра.

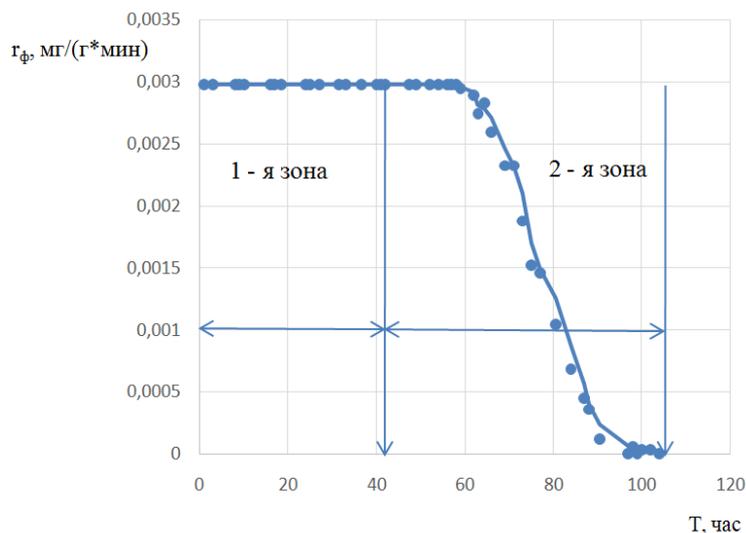
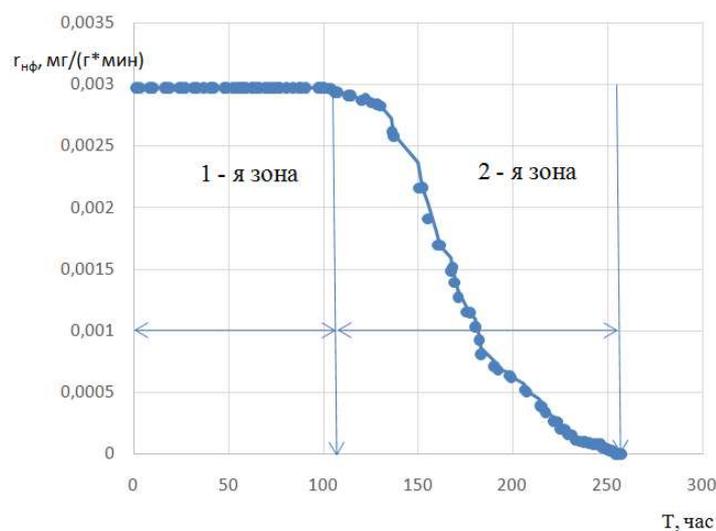


Рисунок 3 –Изменение скорости сорбции: а) нефтепродуктов;
б) фенола во времени на комплексной загрузке КСЗ-1

4. В результате сравнительных исследований эффективности применения однородных и комплексной загрузок в динамическом режиме установлено, что комплексная загрузка КСЗ-1 имела лучшие показатели по сорбции нефтепродуктов, в сравнении с однородной загрузкой из активированных углей марок МАУ-2А, БАУ-А. Сорбция фенолов

протекает примерно с одинаковой скоростью на всех испытанных видах загрузок.

Исследования проводились с целью сравнения эффективности работы СФ с загрузками из активированных углей МАУ-2А, БАУ-А и комплексной загрузки КСЗ-1 в динамическом режиме. Объем всех испытанных сорбентов принимался одинаковым и составлял - 0,692 дм³. Масса сорбентов составляла: загрузка из угля МАУ-2А -172,82 г, загрузка из БАУ-А - 133,63 г и двухслойная загрузка КСЗ -1 –153,22 г. Скорости фильтрования варьировались в диапазоне 1,00 –3,33 м/ч. Объем отфильтрованного модельного раствора через каждый фильтр составил 5 -14 л, продолжительность работы фильтров - 123 - 300 мин.

Результаты работы СФ в динамических условиях показали, что комплексная загрузка КСЗ-1 имела лучшие показатели по сорбции нефтепродуктов, в сравнении с однородной загрузкой из активированных углей марок МАУ-2А, БАУ-А. Сорбция фенолов протекала примерно с одинаковой скоростью на всех испытанных видах загрузок.

В качестве примера на рисунке 4 приведены графики, где представлены динамика сорбции нефтепродуктов на однородных загрузках (МАУ-2А, БАУ-А) и комплексной загрузке КСЗ-1 при начальной концентрации нефтепродуктов -0,38 мг/дм³.

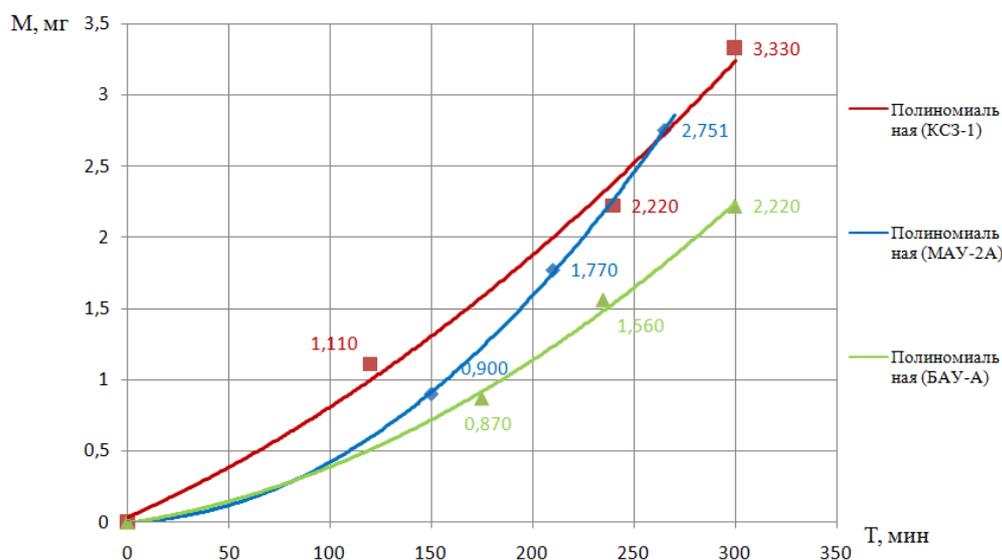


Рисунок 4– Сравнение массы извлеченных нефтепродуктов на однородных загрузках (МАУ-2А, БАУ-А) и комплексной загрузке КСЗ-1 (начальная концентрация нефтепродуктов - 0,38 мг/ дм³)

Обобщающие результаты исследований комплексной сорбционной загрузки КСЗ-1, проведенные в 6 режимах работы СФ при разных исходных концентрациях загрязнений, сведены в таблицу 2.

Таблица 2– Результаты исследований сорбционного фильтра с КСЗ-1 в динамических условиях (1-6 режимы)

Режим работы сорбционного фильтра с загрузкой КСЗ-1	Исходная концентрация нефтепродуктов $Co_{нф}$, мг/дм ³	Средняя скорость сорбции нефтепродуктов $r_{нф}$, мг/(г*мин)	Исходная концентрация фенолов $Co_{ф}$, мг/дм ³	Средняя скорость сорбции фенолов $r_{ф}$, мг/(г*мин)
1	0,2	0,00003	0,31	0,000088
2	2,8	0,0008	0,9	0,00026
3	10	0,002976	10	0,002976
4	4	0,00088	5	0,00095
5	0,38	0,00008	0,09	0,000019
6	0,17	0,00003	0,023	0,0000056

5. Определены показатели статической и динамической сорбционной емкости комплексной загрузки КСЗ-1, закономерности процесса сорбции нефтепродуктов и фенолов, удельные скорости изъятия этих загрязнений при очистке воды, установлена возможность применения этой загрузки для мобильных установок водоподготовки.

Обработкой данных таблицы 1 получены эмпирические уравнения зависимости величин полной статической сорбционной емкости комплексной загрузки КСЗ по нефтепродуктам и фенольным соединениям от исходной концентрации этих загрязнений в растворе (уравнения 1 и 2):

$$СУС_{нф} = 13,33 \cdot Co_{нф}^{0,646} \quad (1)$$

$$СУС_{ф} = 3,67 \cdot Co_{ф}^{0,76} \quad (2)$$

Результаты исследований по определению динамической емкости комплексной сорбционной загрузки КСЗ-1 из раствора нефтепродуктов и фенолов (с концентрацией 10 мг/дм³ и 10 мг/дм³) сведены в таблицу 3.

Таблица 3– Динамическая емкость комплексной сорбционной загрузки КСЗ-1

Показатели	Вид загрязнений	
	нефтепродукты	фенолы
Полная удельная динамическая емкость, загрузки ПДУС, мг/г	30,1	13,47
Удельная динамическая емкость загрузки до проскока загрязнений, мг/г.	17,85	10,53.
Скорость сорбции загрязнений в 1-ой зоне r , мг/г·мин.,	Постоянная = 0,00298	Постоянная = 0,00298
Скорость сорбции загрязнений в 2-ой зоне r , мг/г·мин	Переменная от 0,00298 до 0,0	Переменная от 0,00298 до 0,0

Учитывая весьма низкие значения предельно допустимых концентраций загрязнений в очищенной воде, определяемых нормами по нефтепродуктам $0,05-0,1 \text{ мг/дм}^3$ и по фенолам – $0,001 \text{ мг/дм}^3$, величину удельной динамической емкости сорбционной загрузки до «проскока» загрязнений можно считать рабочей сорбционной емкостью - РДУС.

Сравнение данных по сорбционной емкости комплексной загрузки, полученных в статических и динамических условиях (таблицы 1 и 3) при одинаковых начальных концентрациях загрязнений в растворе, позволяет, установить следующие соотношения между ними (уравнения 3-4):

- соотношение между величинами полной сорбционной емкости, полученные в статических и динамических условиях:

- по нефтепродуктам: $\text{ДУС}_{\text{нф}} = 0,519 \cdot \text{СУС}_{\text{нф}}$ (3)

- по фенолам: $\text{ДУС}_{\text{ф}} = 0,641 \cdot \text{СУС}_{\text{ф}}$ (4)

Соотношение между величинами полной и «рабочей» сорбционной емкостью, полученными в статических и динамических условиях:

- по нефтепродуктам: $\text{РДУС}_{\text{нф}} = 0,575 \cdot \text{ДУС}_{\text{нф}}$ (5)

- по фенолам: $\text{РДУС}_{\text{ф}} = 0,73 \cdot \text{ДУС}_{\text{ф}}$ (6)

На основании проведенных исследований предложены технологические схемы МУВ различной производительности с использованием КСЗ. На рисунке 5 приведена технологическая схема МУВ с использованием естественных средств предварительной очистки, и включающая фильтрацию на скором фильтре с песчаной загрузкой, совмещенное с удалением избыточного кислорода, УФ - обеззараживание с последующей сорбцией на СФ с комплексной загрузкой, и добавление гипохлорита натрия при хранения воды, или доставки её потребителю.

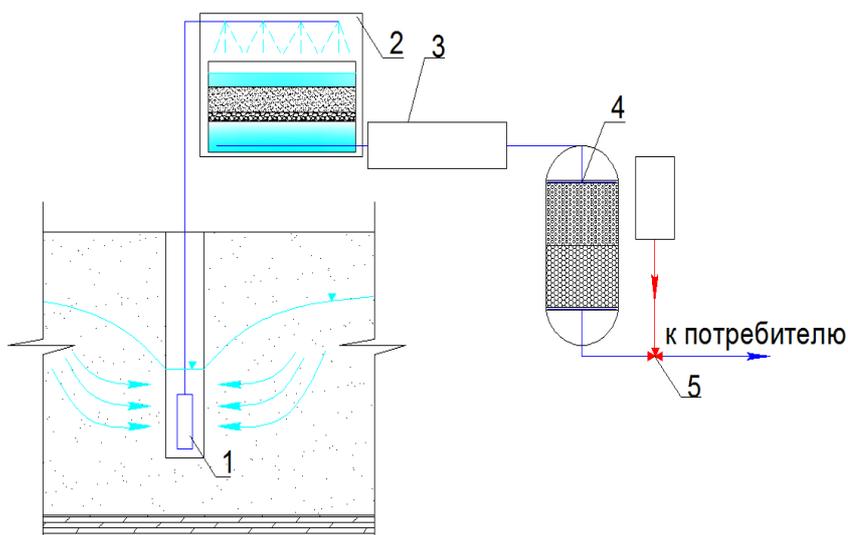


Рисунок 5 – Технологическая схема мобильной установки производительностью более $10 \text{ м}^3/\text{час}$ при использовании инфильтрационного водозабора: 1 - насос, смонтированный в скважине инфильтрационного водозабора, 2 - скорый фильтр, 3 - блок УФ- обеззараживания, 4 - СФ с КСЗ, 5 - эжектор подачи раствора гипохлорита натрия.

6. В результате проведенных исследований гидродинамических характеристик сорбционного фильтра с комплексной загрузкой получены данные о фактической продолжительности пребывания жидкости в загрузке сорбционного фильтра и степени перемешивания потока жидкости.

Исследование структуры потока жидкости в загрузке СФ осуществлялось путем импульсного ввода трассера на входе в фильтр; отклик на внесенное возмущение фиксировался по концентрации трассера на выходе потока жидкости из загрузки. В качестве трассера выбран хлорид натрия, концентрация которого определялась кондуктометрическим методом.

Полученные результаты, в виде кривых отклика на внесенное возмущение при разных скоростях фильтрования (в диапазоне 0,87 – 3,02 м/ч), показаны на рисунке 6.

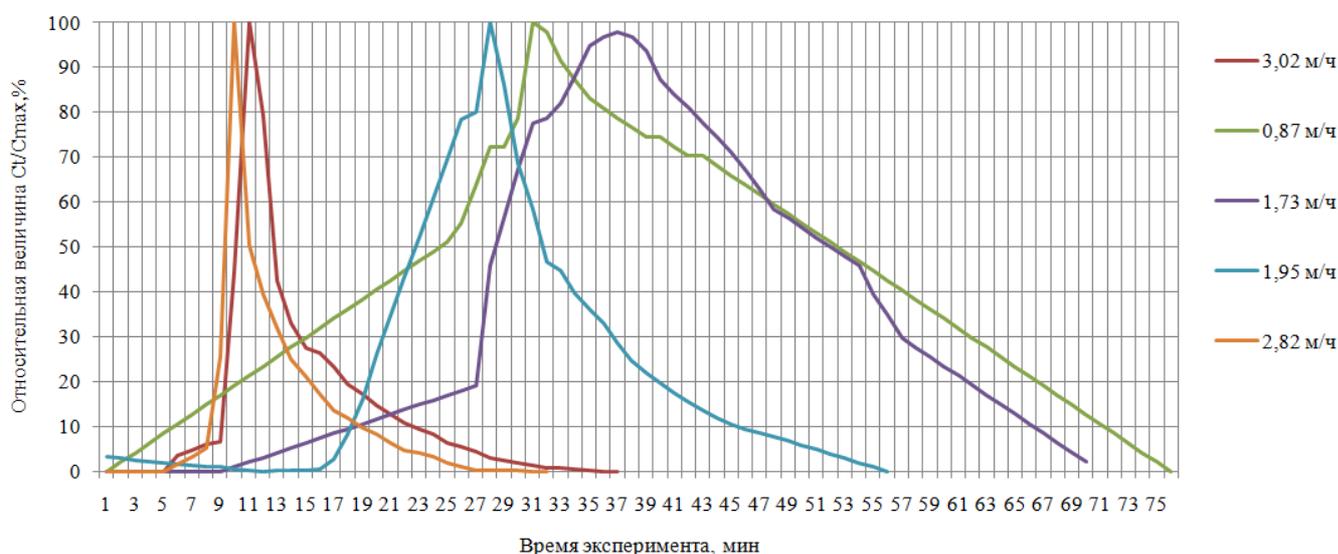


Рисунок 6– Кривые распределения времени пребывания жидкости в сорбционном фильтре при разных скоростях фильтрования

Среднее время пребывания жидкости в загрузке фильтра по полученным

кривым распределения определялось как:
$$\tau_{cp} = \frac{\int_0^{\infty} t f(t) \cdot dt}{\int_0^{\infty} f(t) \cdot dt} \quad (7)$$

Оценка степени продольного перемешивания производилась по дисперсии кривых распределения, характеризующей разброс времени пребывания отдельных элементов жидкости в загрузке относительно его

среднего значения и определяемой как:
$$\sigma_t^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \tau_{cp})^2 \cdot f(t) \cdot dt}{\int_0^{\infty} f(t) \cdot dt} \quad (8)$$

или в безразмерном виде:
$$\sigma^2 = \frac{\sigma_t^2}{\tau_{cp}^2} \quad (9)$$

Значения τ_{cp} , σ_t^2 , σ^2 , полученные экспериментально, приведены в таблице 4.
Таблица 4– Значения τ_{cp} , σ_t^2 , σ^2 для установки сорбционного фильтра

№ п/п	Скорость фильтрации, м/ч	τ_{cp} , мин	$(\sigma_t)^2$	σ^2
1	0,87	41,60	490,86	0,28
2	1,73	34,66	408,96	0,34
3	1,95	21,85	305,61	0,64
4	2,82	12,11	101,98	0,69
5	3,02	14,01	202,46	1,032

7. Разработаны математическая модель сорбционных фильтров с комплексной загрузкой, метод их расчета и рекомендации по расчету и проектированию мобильных установок водоподготовки с применением сорбционных фильтров с КСЗ.

Полученные экспериментальные данные по изучению гидродинамических свойств сорбционного фильтра позволили получить зависимость среднего времени пребывания жидкости в загрузке τ_{cp} , для сорбционных фильтров малой производительности, от скорости фильтрации (в пределах до 4 м/ч) в виде:

$$\tau_{cp} = 83,8 \cdot H \cdot V^{-0,992} \quad (10)$$

Статистической обработкой данных по сорбции загрязнений в динамических условиях (таблица 2) получены эмпирические уравнения зависимости величины скорости сорбции нефтепродуктов и фенолов от исходной концентрации загрязнений на комплексной загрузке КСЗ-1 для 1-ой зоны изотермы сорбции в виде уравнений (11) и (12):

– скорость сорбции нефтепродуктов: $r_{нф} = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot C_{о_{нф}}^{1,353}$ (11)

– скорость сорбции фенолов: $r_{ф} = 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot C_{о_{ф}}^{1,0106}$ (12)

Во 2-ой зоне изотермы сорбции скорость изъятия загрязнений меняется во времени; получены эмпирические уравнения, отражающие изменение скорости сорбции нефтепродуктов и фенолов на комплексной загрузке КСЗ-1 во 2-ой зоне изотерм сорбции, в виде (13) и (14):

– по нефтепродуктам: $r_T/r_{max} = 1 - 0,0023 \cdot (T - T_1)/\tau_{cp}$ (13)

– по фенолам: $r_T/r_{max} = 1 - 0,0094 \cdot (T - T_1)/\tau_{cp}$ (14)

Разработаны технологические схемы и рекомендации по расчету и проектированию мобильных установок с применением фильтров с комплексной сорбционной загрузкой. Составлены алгоритмы расчета фильтров с КСЗ при очистке воды от нефтепродуктов и фенолов.

Экономическая эффективность применения фильтров с комплексной сорбционной загрузкой КСЗ-1 в составе МУВ заключается в повышении сорбционной емкости и продолжительности работы СФ с комплексной загрузкой. Как показали результаты технико-экономических расчетов, применение фильтров с комплексной сорбционной загрузкой для мобильной установки производительностью $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ позволяет на 40% снизить эксплуатационные затраты и себестоимость очистки воды по сравнению с однородной загрузкой фильтра АУ марки МАУ-2А и увеличить продолжительность фильтроцикла на 10%.

III ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. В результате проведенных экспериментальных исследований по определению сорбционной емкости однородных и комплексной загрузки из АУ разных марок по нефтепродуктам и фенолам в статических условиях установлено, что более эффективной является комплексная загрузка КСЗ (из смеси АУ марок МАУ и БАУ), в частности, при невысоких концентрациях этих загрязнений.

2. Установлено, что изотермы сорбции загрязнений (нефтепродуктов и фенолов) на комплексной загрузке КСЗ-1, полученные в статических условиях, относятся к разному типу изотерм, и могут описываться уравнениями, схожими по форме с уравнениями Фрейндлиха, или Генри.

3. На основании экспериментальных данных установлено, что характер изотерм сорбции и величины полной статической сорбционной емкости комплексной загрузки в значительной степени зависят от вида загрязнений и исходной их концентрации в растворе; получены зависимости величин полной статической сорбционной емкости комплексной загрузки по нефтепродуктам и фенолу от исходной концентрации этих загрязнений в растворе.

4. Сравнительные исследования комплексных загрузок с разным соотношением объемов АУ марок БАУ-А и МАУ-2А в динамических условиях показали, что процесс сорбции нефтепродуктов и фенолов на всех испытанных видах комплексных загрузках (КСЗ-1, КСЗ-3 и КСЗ-4) протекал с примерно одинаковыми скоростями, которые определялись, прежде всего, начальной концентрацией загрязнений. Предпочтение отдано комплексной загрузке КСЗ-1 с меньшим объемом АУ марки БАУ, ввиду повышенной зольности, неоднородности частиц и низкой прочности этого сорбента по сравнению с АУ марки МАУ-2А.

5. В результате сравнительных исследований эффективности применения однородных и комплексной загрузок в динамическом режиме установлено, что комплексная загрузка КСЗ-1 имела лучшие показатели по сорбции

нефтепродуктов, в сравнении с однородной загрузкой из активированных углей марок МАУ-2А, БАУ-А. Сорбция фенолов протекала примерно с одинаковой скоростью на всех испытанных видах загрузок.

6. Установлено, что динамика работы сорбционного фильтра с комплексной загрузкой при очистке воды от нефтепродуктов и фенолов характеризуется наличием двух зон: в 1-ой зоне скорость изъятия загрязнений постоянна; во 2-ой зоне скорость сорбции снижается во времени. Граница между этими зонами близка к продолжительности работы фильтра до проскока загрязнений, конец 2-ой зоны наступает при полном исчерпании сорбционной емкости загрузки фильтра.

7. В результате гидродинамических исследований сорбционного фильтра с комплексной загрузкой установлена зависимость величины фактической продолжительности пребывания жидкости в загрузке от скорости фильтрования, а также величины параметров, характеризующих структуру потока жидкости в загрузке фильтра; получены эмпирические уравнения для определения указанных параметров.

8. По результатам исследований предложены технологические схемы очистки загрязненных вод от нефтепродуктов и фенолов на мобильных установках с применением фильтров с комплексной сорбционной загрузкой.

9. Разработаны рекомендации по расчету и проектированию мобильных установок с применением фильтров с комплексной сорбционной загрузкой. Получены расчетные зависимости и разработана методика расчета сорбционных фильтров с комплексной загрузкой, позволяющие производить расчет этих фильтров на требуемый эффект очистки исходной воды от нефтепродуктов и фенолов.

10. Экономическая эффективность применения фильтров с комплексной сорбционной загрузкой в составе МУВ заключается в повышении сорбционной емкости и продолжительности работы СФ с комплексной загрузкой. Применение фильтров с комплексной сорбционной загрузкой для мобильной установки производительностью $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ позволяет, на 40% снизить эксплуатационные затраты и себестоимость очистки воды, по сравнению с однородной загрузкой фильтра АУ марки МАУ-2А и увеличить продолжительность фильтроцикла на 10%.

IV ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Ряховский, М.С. Динамика сорбции нефтепродуктов и фенолов из водных растворов на комплексной загрузке из активированных углей [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/131-23363>.

2. Ряховский, М. С. Исследования сорбционной емкости комплексной загрузки при очистке природных вод от нефтепродуктов и фенолов [Текст] // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – №6 (53). – С. 167 - 170.

3. Ряховский, М. С. Факторы, влияющие на формирование качества воды в инфильтрационных водозаборах [Электронный ресурс] / Ю. А. Феофанов, М. С. Ряховский // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №4 – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/104-6557>.

4. Ряховский, М. С. Сооружения для забора и пополнения запаса подземных вод [Электронный ресурс] / Ю. А. Феофанов, М. С. Ряховский // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №6. – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/106-7863>

5. Ряховский, М. С. Сравнительная оценка сорбционных емкостей однородных и комплексной загрузок при очистке воды [Текст] / Ю. А. Феофанов, М. С. Ряховский // ВОДА: ХИМИЯ и ЭКОЛОГИЯ. – 2015. – №7. – С. 82-87

6. Ряховский, М. С. Результаты исследований по выбору сорбентов для комплексной загрузки фильтра [Текст] / Ю. А. Феофанов, М. С. Ряховский // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Природопользование. – 2013. – №1 (166). – С. 269 – 273

публикации в других изданиях:

7. Ряховский, М. С. Современные средства водоподготовки западных армий [Текст]/ В. И. Кириленко, М. С. Ряховский// Армейский сборник. – 2012. – №9. – С. 50-52.

8. Ряховский, М. С. Мобильные установки для водоподготовки/ Ю. А. Феофанов, М. С. Ряховский// Армейский сборник – 2011. – №9 (208) – С. 54-55.

9. Ряховский, М. С. Исследование гидродинамических характеристик сорбционных фильтров [Текст] / Ю. А. Феофанов, М. С. Ряховский// журнал "Водоснабжение и канализация" – 2015. – №7. – С. 66-70

10. Ряховский, М. С. Управление качеством воды при использовании береговой фильтрации [Текст]/ Ю. А. Феофанов, М. С. Ряховский // Доклады Международного конгресса посвященного 180-летию СПб ГАСУ «Наука и инновации в современном строительстве – 2012» – Санкт-Петербург, 10-12 октября 2012 – С. 87-91.

Принятые обозначения

МУВ - мобильные установки водоподготовки;

РОП - растворенные органические примеси;

АУ - активированный уголь;

СФ - сорбционный фильтр;

КСЗ – комплексная сорбционная загрузка из АУ;

$C_{исх}, C_0$ – концентрация загрязнений в исходном растворе, мг/дм³;

Q – объем исходной воды, пропущенной через СФ, дм³;

$A_{нф}, A_{ф}$ – сорбционная емкость загрузки, соответственно, по нефтепродуктам и фенолу, мг/г;

$SUC_{нф}, SUC_{ф}$ – статическая удельная сорбционная емкость загрузки по нефтепродуктам и фенолу (полная), мг/г;

T- продолжительность работы сорбционной загрузки, час;

T^0 – температура, град К или °С;

M – масса сорбционной загрузки, г;

V – скорость фильтрации, м/час;

q – расход подаваемой исходной воды, дм³/час;

H, h– высота слоя загрузки сорбционного фильтра, м;

w – объем сорбционной загрузки, дм³;

$r_{нп}, r_{ф}$ – удельная скорость изъятия нефтепродуктов и фенола, мг/г·мин;

$\tau_{ср}$ – среднее время пребывания жидкости в сорбционном фильтре, мин;

D – коэффициент турбулентной диффузии;

m–условное число ячеек в ячеечной модели реактора;

$DCS_{нф}, DCS_{ф}$ – динамическая удельная сорбционная емкость загрузки по нефтепродуктам и фенолу (полная), мг/г;

$RDCS_{нф}, RDCS_{ф}$ – рабочая динамическая удельная сорбционная емкость загрузки по нефтепродуктам и фенолу(до «проскока» загрязнений), мг/г.