

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Санкт-петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет»

*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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

**ФЕОФАНОВ Юрий Александрович**

доктор технических наук, профессор

Санкт-Петербург - 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	6
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОЧИСТКИ ВОДЫ В ПОЛЕВОМ ВОДООБЕСПЕЧЕНИИ.....	16
1.1. Краткая классификация средств полевого водообеспечения.....	16
1.2. Технологические схемы мобильных установок для очистки природных вод. ....	19
1.3. Сорбционная очистка воды от нефтепродуктов и фенолов. ....	27
1.3.1. Виды сорбентов, применяемых для очистки воды от нефтепродуктов и фенолов, и их основные характеристики.....	28
1.3.2. Типы и конструкции сорбционных фильтров.....	31
1.3.3. Влияние основных конструктивных и технологических параметров на работу сорбционных фильтров. ....	33
1.3.4. Кинетика процесса сорбционной очистки воды.....	34
1.3.5. Направления по совершенствованию установок водоподготовки и повышению эффективности их работы.....	41
Выводы по первой главе.....	44
ГЛАВА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОРБЦИОННОЙ ЕМКОСТИ ОДНОРОДНЫХ И КОМПЛЕКСНОЙ ЗАГРУЗОК В СТАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ.....	46
2.1. Программа и методика исследований.....	46
2.2. Результаты исследований по определению максимальной сорбционной емкости АУ в статических условиях из монорастворов нефтепродуктов и фенолов.....	50
Выводы по второй главе.....	60

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ КОМПЛЕКСНОЙ СОРБЦИОННОЙ ЗАГРУЗКИ. ....	61
3.1. Материал и методы исследования.....	61
3.2. Результаты исследований по выбору состава комплексной сорбционной загрузки.....	65
3.3. Результаты исследований сорбционной емкости комплексной загрузки КСЗ-1 в динамических условиях.....	70
3.4. Результаты сравнительных исследований эффективности работы однородных и комплексной загрузок в динамическом режиме.....	74
3.5. Результаты исследования по очистке дренажных вод на сорбционных фильтрах с комплексной загрузкой.....	81
Выводы по третьей главе.....	83
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОРБЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ.....	85
4.1. Характеристика структуры потока жидкости в сорбционных фильтрах.....	85
4.2. Программа и методика проведения исследований.....	90
4.3. Результаты исследований структуры потока жидкости в сорбционных фильтрах.....	91
Выводы по четвертой главе.....	93
ГЛАВА 5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ СОРБЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ НА КОМПЛЕКСНОЙ СОРБЦИОННОЙ ЗАГРУЗКЕ.....	95
5.1. Математическое описание структуры потока жидкости в сорбционных фильтрах.....	95
5.2. Математическое описание изменений сорбционной емкости комплексной загрузки в статических и динамических условиях.....	98

5.3. Математическое описание скорости сорбции нефтепродуктов и фенолов на комплексной сорбционной загрузке. ....	104
5.4. Технологические схемы очистки поверхностных и подземных природных вод на МУВ с применением КСЗ.....	107
5.5. Рекомендации по расчету и проектированию МУВ с комплексной сорбционной загрузкой .....	111
5.6. Техничко-экономические показатели применения СФ с комплексной сорбционной загрузкой в составе МУВ .....	115
Выводы по пятой главе.....	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	119
Список литературы .....	123
Приложения.....	135

## ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

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/дм<sup>3</sup>;

Q – объем исходной воды, пропущенной через СФ, дм<sup>3</sup>;

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

$СУС_{нф}, СУС_{ф}$  – статическая удельная сорбционная емкость загрузки, соответственно, по нефтепродуктами фенолу(полная), мг/г;

T – продолжительность работы сорбционной загрузки, час;

$T^0$  – температура, град К или °С;

M – масса сорбционной загрузки;

V – скорость фильтрации, м/час;

q – расход подаваемой исходной воды, дм<sup>3</sup>/час;

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

w – объем сорбционной загрузки, дм<sup>3</sup>;

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

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

D – коэффициент турбулентной диффузии;

m – условное число ячеек в ячеечной модели реактора;

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

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

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность избранной темы.** Обеспечение населения России качественной питьевой водой, является общегосударственной задачей [1]. Наша страна принадлежит к числу государств, наиболее обеспеченных водными ресурсами, но в то же время, население ряда регионов страны страдает от недостатка питьевой воды [2].

Более 70% населения страны обеспечивается водой для хозяйственно-питьевого потребления, забираемой из поверхностных источников, уровень загрязнения которых повсеместно возрастает. Высокую степень воздействия на водные объекты оказывают как неочищенные сбросы или недостаточно очищенные сточные воды населенных мест и промышленных предприятий, так и рассредоточенный (диффузный) сток с сельскохозяйственных и селитебных территорий, площадей, занятых отвалами и отходами промышленного производства, а также трансграничные загрязнения. Значительная загрязненность источников водоснабжения, несоблюдение норм их санитарной охраны, низкая эффективность существующих технологий водоподготовки, не соответствующих качеству поступающей воды, являются причинами ненормативного качества водопроводной воды [3].

Для получения качественной питьевой воды из воды 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. Из общего объема воды, подаваемой в централизованные системы водоснабжения населенных пунктов, через системы водоподготовки пропускается не более 59 %, в сельских населенных пунктах этот показатель не превышает 20 % [2]. В сельской местности свыше 1/3 населения использует для питьевых целей воду из

децентрализованных источников. Качество этой воды остаётся низким вследствие слабой защищённости водоносных горизонтов от загрязнения с окружающих территорий, отсутствия зон санитарной охраны [2, 3].

Одной из задач по обеспечению населения России питьевой водой является расширение объема использования подземных вод: в настоящее время, степень освоения запасов подземных вод (в среднем по стране) не превышает 33 процента. Не используется около половины числящихся на государственном учете разведанных и оцененных месторождений пресных подземных вод. В то же время, в ряде случаев эти воды расходуются бесконтрольно и их запасы истощаются. Так, в Ленинградской области, в районе подземных водозаборов Черная Речка – Сертолово зафиксировано понижение уровня воды на 55-65 м [3]. Несмотря на относительную защищенность подземных вод от загрязнений, благодаря чему их стремятся использовать для питьевого водоснабжения, к настоящему времени на территории Российской Федерации официально зафиксировано около 6 тыс. участков техногенного загрязнения подземных вод. Причем, значительная часть загрязнений подземных вод относятся к первому классу опасности.

Особенно остро стоит задача водоподготовки небольших населенных мест и отдельно расположенных и мобильных объектов, в т.ч. 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 и отдельных объектов, и мобильных объектов, а также в условиях ЧС. Для водоподготовки таких объектов применяют различные типы компактных установок. Установки должны отвечать следующим требованиям: простота устройства, технологичность, компактность, низкие эксплуатационные затраты, надежность и устойчивость к перегрузкам. Кроме того, на территории страны установлены общие технические требования на мобильные средства очистки поверхностных вод [4], которые нуждаются в актуализации.

Из всех известных типов малогабаритных очистных сооружений этим требованиям наиболее полно соответствуют мобильные установки 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.) [5].

Основным узлом большинства мобильных установок водоподготовки являются сорбционные фильтры, применение которых позволяет получить высокое качество очищенной воды из загрязненных водных источников. Конструктивные решения существующих типов СФ достаточно разнообразны. Различия заключаются, главным образом, в выборе материала загрузки, формы корпуса, количества ступеней фильтрации и в других конструктивных характеристиках. Традиционные сорбционные фильтры с однородной загрузкой из 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 (ОС), присутствующих в природной воде и определяемых для каждого источника в отдельности. Однако, данные о применении комплексных сорбционных загрузок для водоподготовки из загрязненных водоемов очистки в литературе практически отсутствуют, поэтому выявление закономерностей процесса очистки воды на них в условиях высокого загрязнений водоисточников, обобщение и получение экспериментальных данных об эффективности их работы, совершенствование технологических схем работы сорбционных фильтров 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 сорбции, фильтрования и описания гидравлических процессов, протекающих при фильтровании воды через слой 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.

**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.** Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих задач:

- изучение и оценка различных схем работы и конструкций мобильных установок водоподготовки, видов применяемых в них сорбционных материалов;
- проведение экспериментальных исследований по выбору оптимального вида и состава комплексных сорбционных загрузок (КСЗ) для изъятия разных органических загрязнений;
- 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.

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

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

**Научная новизна работы 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** заключается в предлагаемом алгоритме расчета сорбционного фильтра и математическом описании сорбционных емкостей фильтра и продолжительности его работы.

**Практическая значимость** результатов работы состоит в:

– 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», см. Приложение А) и внедрены на производстве ООО НПП «Полихим», г. Сосновый Бор (Акт внедрения от 14.07.2014, см. Приложение Б).

**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 гидродинамических характеристик 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 применении в экспериментальных исследованиях современных методик, оборудования и аналитических приборов, проведении исследований на модельных растворах, использовании современных методов математической обработки и анализа экспериментальных данных, моделировании изучаемых процессов, обоснована соответствием полученных результатов и выводов фундаментальным

закономерностям этих процессов. 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 Хомуцецкого 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.** Основные научные результаты диссертации опубликованы в 10 работах, в том числе 6 в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК, 2 статьи в специализированных изданиях, 2 статьи в ведущих отраслевых изданиях.

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.

**Личный вклад автора.** Автору принадлежит формулировка цели работы, постановка проблемы, выдвижение гипотезы и проверка её эмпирическим путем с последующим теоретическим обоснованием и все этапы настоящей работы: постановка задач, их решение; методики проведения исследований; интерпретация и обобщение результатов исследований; выдвижение гипотез и формулирование научных положений, выносимых на защиту.

## **ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОЧИСТКИ ВОДЫ В ПОЛЕВОМ ВОДООБЕСПЕЧЕНИИ.**

### **1.1. Краткая классификация средств полевого водообеспечения.**

Средства полевого водообеспечения (СПВ) применяются для очистки поверхностных и подземных природных вод в децентрализованных системах водоснабжения, в полевых условиях. Средства ориентированы на повсеместное использование на различных водоисточниках с широким спектром растворенных в воде примесей и, как правило, устраиваются мобильными. Первые средства заводского изготовления появились в начале 19 века, в эту конструкцию СПВ входили сорбционные фильтры [6].

Обеспечение нормативного качества воды в чрезвычайных ситуациях, также достигается использованием СПВ. Данные средства пользуются спросом и представлены на мировом рынке в широком ассортименте и с большим выбором модификаций [7, 8, 9]. Тип установки характеризуется различными показателями, основные из которых – качество подаваемой исходной воды, производительность и технико-экономические показатели [5, 10].

СПВ, условно, подразделяются по ряду признаков:

- по способу передвижения установки: носимые (индивидуальные), и переносные фильтры, полумобильные установки (поддон, контейнер, полуприцеп, прицеп (рисунок 1.3 а)), и мобильные (рисунок 1.3 б);
- по производительности: малая (от 0,01 до 0,3 м<sup>3</sup>/ч), средняя (от 0,3 до 10 м<sup>3</sup>/ч), высокая (свыше 10 м<sup>3</sup>/ч);
- по используемой технологической схеме.

На рисунке 1.1 представлен общий вид установок переносного типа: индивидуального фильтра (рисунок 1а), переносного фильтра (рисунок 1б),

производительность 50 л/ч и модульный блок производительностью 0,55 м<sup>3</sup>/ч (рисунок 1в) [10, 11, 94, 95].

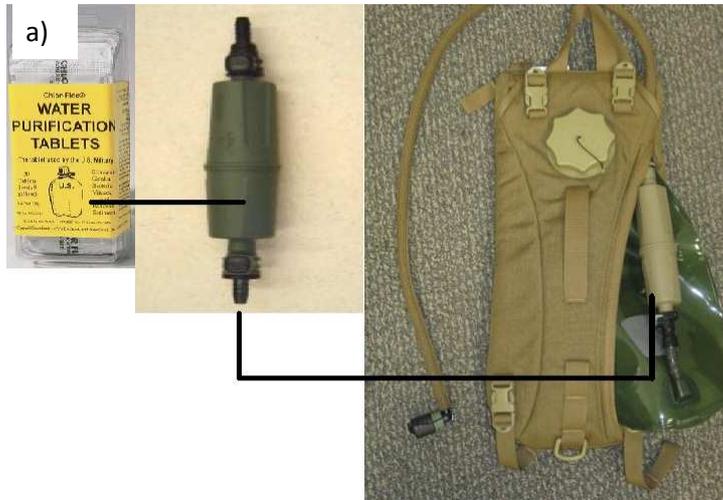


Рисунок 1.1. Установки водоподготовки переносного типа: а) индивидуальная система водоподготовки IWTД [95]; б) носимый фильтр НФ-50, производительность 50 л/ч; в) модульный блок Waterclean CMT 500RO, производительность 0,55 м<sup>3</sup>/ч

Конструкции полумобильных установок водоподготовки представлены на рисунке 1.2, в частности, на рисунке 1.2а показан общий вид установки водоподготовки производительностью 2,7 м<sup>3</sup>/ч; на рисунке 1.2б - переносная водоочистная установка ПВУ300, производительностью 300 л/ч. [5, 10].



Рисунок 1.2. Конструкции полумобильных установок водоподготовки: а) установка водоподготовки 600 GPH ROWPU, производительность 2,7 м<sup>3</sup>/ч [94]; б) переносная водоочистная установка ПВУ300, производительность 300 л/ч [10]

На рисунке 1.3 показаны мобильные установки водоподготовки: водоочистная станция на прицепе производительность до 13,5 м<sup>3</sup>/ч (рисунок 1.3а); и мобильная станция комплексной очистки воды производительность 10 м<sup>3</sup>/ч (рисунок 1.3б).

а)



б)



Рисунок 1.3. Мобильные установки водоподготовки а) водоочистная станция 3000 GPH ROWPU, производительность до  $13,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; б) станция комплексной очистки воды СКО-10, производительность  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$

Виды мобильных установок, показанные на рисунках 1.1 – 1.3, различаются по технологической схеме работы, которая зависит от качества исходной воды.

## **1.2. Технологические схемы мобильных установок для очистки природных вод.**

К 1980 году в СССР и западных странах, в первую очередь, в США, был разработан ряд мобильных установок водоподготовки разной производительности, основанных на различных технологических схемах:

В США: а) установки для очистки, обезвреживания и дезактивации воды, включающие коагуляцию – хлорирование – фильтрацию (производительность – 2,3; 5,7 м<sup>3</sup>/ч);

б) установки, основанные на ионном обмене в катионо – и анионообменных фильтрах с химической регенерацией ионообменных смол (производительность – 2,3; 5,7 м<sup>3</sup>/ч);

в) установки термокомпрессионные дистилляционные для опреснения и очистки воды (производительность – 0,57 м<sup>3</sup>/ч).

В СССР: а) установки, включающие хлорирование – отстаивание – фильтрование через АУ (БАУ-МФ, КФГ-М) - переносные фильтры, производительностью от 0,01 до 0,03 м<sup>3</sup>/ч;

б) установки, включающие коагуляцию с хлорированием – отстаивание – фильтрование через активированный уголь (БАУ-МФ, КФГ-М) - переносные фильтры, производительностью от 0,2 до 0,3 м<sup>3</sup>/ч;

в) установки, включающие коагуляцию с хлорированием – фильтрование – ультрафиолетовое облучение – фильтрование через активированный уголь (БАУ-М, КФГ-М) - мобильные установки на базе автомобилей ГАЗ – 66 – 01 или ЗИЛ – 131 с прицепом, производительностью до 2,5 м<sup>3</sup>/ч и 10 м<sup>3</sup>/ч;

г) термокомпрессионные дистилляционные мобильные установки для опреснения воды, после ее очистки на мобильной установке водоподготовки (на базе ЗИЛ-157, производительность – 0,4 м<sup>3</sup>/ч);

д) установки, включающие хлорирование – фильтрование на патронных фильтрах – фильтрование через активированный уголь (мобильная установка на базе КраЗ-255В либо КраЗ-260Б, производительность – 2 - 8 м<sup>3</sup>/ч) [10, 12, 13].

Основные недостатки рассмотренных типов мобильных установок - это значительная длительность разворачивания, малый ресурс работы, отсутствие в

ряде установок функций обезвреживания воды, высокая энергоемкость и стоимость [9]. В настоящее время, на смену вышеописанным установкам приходят мобильные установки водоподготовки (МУВ) с технологиями очистки воды, основанными на применении мембранных методов (ультрафильтрация, обратный осмос). Применение этих типов МУВ, в свою очередь, ограничено качеством исходной воды, технико-экономическими показателями и связано с образованием рассола. Например, применение установок с ультрафильтрационными полуволоконными аппаратами рекомендовано при мутности воды не более 200 мг/дм<sup>3</sup>; содержание железа общего - не более 6,0 мг/дм<sup>3</sup>; солесодержание – не более 6,0 г/дм<sup>3</sup>; общее микробное число – не более 1,1 мг/дм<sup>3</sup>; содержание органических веществ – не более 5 ПДК [5].

Анализ литературных данных по технологиям очистки и конструкциям МУВ позволил обозначить следующие векторы их развития:

- модернизация существующих типов МУВ путем совершенствования методов глубокой доочистки от специфичных органических загрязнений, применение новых сорбционных загрузок, внедрения более простых и эффективных устройств для предварительной очистки воды, в том числе за счет использования естественных природных условий;

- рациональное использование энергии, например, источником питания установки Aspen 2000, производительностью до 9 м<sup>3</sup>/ч, являются солнечные батареи.

В мобильных установках, применяемых для очистки воды природных источников, как правило, используются те же технологии и виды сооружений, что и в современных стационарных установках водоподготовки, например, песчаные и сорбционные фильтры, ионообменные фильтры и др. Сведения о МУВ, состоящих на обеспечении различных стран, опубликованы в специализированных изданиях [5, 7, 8, 9, 10]. Очистка воды в полевых условиях, как правило, включает в себя: обеззараживание, осветление, обесцвечивание, устранение неприятных запахов и

вкусов. В случае необходимости, применяют обезвреживание (удаление из воды отравляющих веществ), дезактивацию (удаление радиоактивной пыли и снижение степени радиоактивного заражения воды до предельно-допустимых концентраций). В отдельную группу можно выделить мобильные установки по опреснению воды.

Для очистки природных и сточных вод от растворенных веществ (примесей) применяют различные технологии и их комбинации, основными являются: коагуляция с флокуляцией, фильтрация, аэрация, озонирование, ультрафильтрация, адсорбцию и др. Для дезинфекции перед подачей потребителю – ультрафиолетовое обеззараживание, хлорирование. Сорбционный метод – один из наиболее доступных и эффективных способов глубокой очистки (доочистки) вод от растворенных органических и хлорорганических соединений, радионуклидов. Применяя сорбенты, можно очистить воду от примесей до требуемых показателей, даже при весьма разнообразных концентрациях. Средняя концентрация природных органических соединений в 99% рек мира определена в среднем на уровне  $2,5 \text{ мг/дм}^3$ , количество органических загрязнителей в воде может достигать  $10 \text{ мг/дм}^3$  и более [14].

Характеристики наиболее распространенных сорбентов – АУ различных марок приведены в [15, 16, 17, 18, 19, 20].

Принципиальная схема устройства одной из современных МУВ, приведена на рисунке 1.4. Основные элементы данной установки: блок добычи сырой воды; осветления (флокуляция при помощи катионного полиэлектролита, двухступенчатая микрофильтрация (50 и 5 микрон)); обратноосмотический блок из 8 мембранных элементов; система NBC – обезвреживание воды на сорбционном блоке и дезактивация воды на ионно-обменном блоке; повторное хлорирование; система распределения очищенной воды.

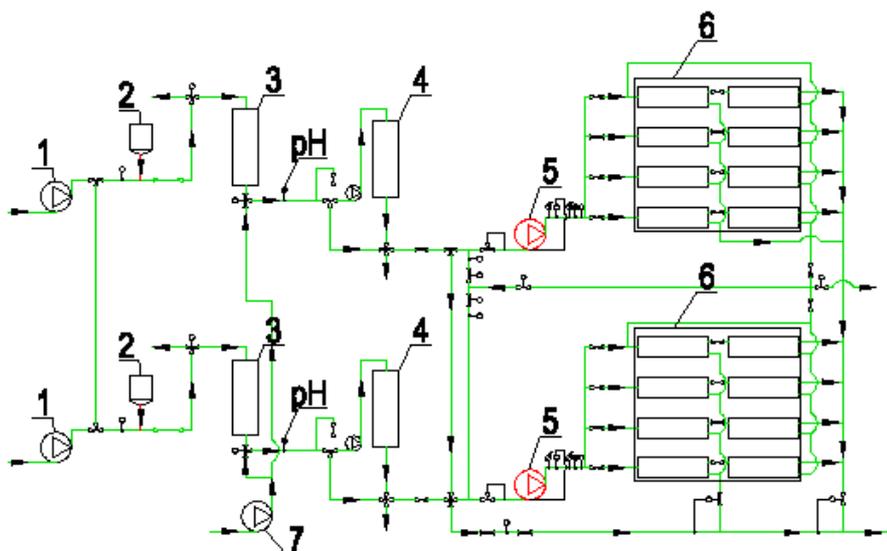


Рисунок 1. 4. Принципиальная схема устройства 3000 GPHROWPU: 1 - насос подачи сырой воды; 2 - блок подачи реагентов (применяемые реагенты: катионный полиэлектролит, натрия бисульфит, натрия гексаметафосфат, кальция гипохлорит, лимонная кислота); 3 - многокомпонентный фильтр; 4 - фильтр; 5 - насос высокого давления; 6 - обратноосмотический блок; 7 - насос обратной промывки

Характерная черта для большинства МУВ - это наличие сорбционных фильтров (СФ), в том числе модулей, блоков с однородной загрузкой АУ. В отечественных установках наиболее распространенные марки АУ – БАУ-А, КФГ-М, т.к. они обладают большой сорбционной емкостью в отношении органических загрязнений и радионуклидов.

На рисунке 1.5 представлена технологическая схема очистки воды используемая на отечественной МУВ средней производительности, данная схема включает в себя: сетчатый фильтр, ультрафильтрационный аппарат, микрофильтр; сорбционный фильтр и блок бактерицидных ламп.

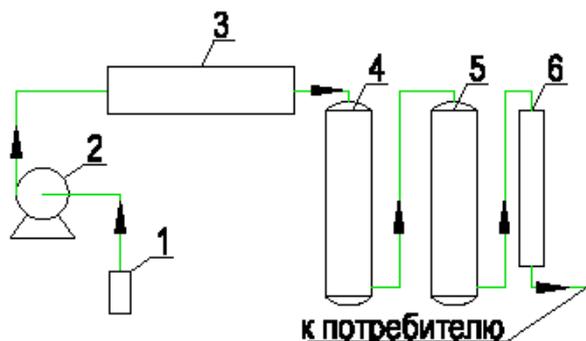


Рисунок 1.5. Технологическая схема очистки воды на МУВ: 1 – сетчатый фильтр; 2 – электро/ручной насос; 3 - ультрафильтрационный аппарат; 4 – микрофильтр; 5 – сорбционный фильтр; 6 – блок бактерицидных ламп

На сегодняшний день, в России для полевого водообеспечения используется в том числе и новая версия мобильной станции комплексной очистки СКО-10К, переносная водоочистная установка ПВУ-300, а также целая линейка носимых фильтров марки НФ (производство ЗАО «Полимерфильтр») [10], в которых основным элементом глубокой очистки воды от органических загрязнений служат сорбционные фильтры.

Характеристики МУВ для полевого водообеспечения представлены в учебных пособиях и специализированных изданиях [10]. Сорбционный блок является одним из основных в технологической схеме установок серии СКО. Производительность станции также определяется объемом загрузки СФ и продолжительностью его работы.

Подземные источники водоснабжения, в сравнении с поверхностными водоемами, в полевом водообеспечении являются приоритетными, поскольку они более защищены от антропогенного воздействия. Основное отличие подземных источников – высокая степень минерализации, повышенное содержание общего железа, марганца, все чаще – хлоридов, а кроме того, в них появляются синтетические органические соединения характерные для поверхностных водоемов [14]. Для очистки воды подземных источников применяются те же самые МУВ, что и для воды поверхностных водоемов, но с блоками обессоливания.

Предварительная очистка природной воды включает в себя различные методы, которые зависят от состава и степени загрязненности исходной воды. В частности, такие как: коагуляция с флокуляцией, аэрация, отстаивание, флотация, фильтрация на фильтрах грубой и тонкой очистки, микрофильтрация.

В полевом водообеспечении для предварительной обработки природной воды нашли применение также инфильтрационные водозаборы, брызгательные бассейны и фильтрационные дамбы. Данные способы позволяют, производить предварительную фильтрацию природных вод поверхностных водоемов, аэрацию, в результате чего, можно отказаться от коагуляции, отстаивания и аэрации на головных сооружениях и снизить нагрузку на песчаные и сорбционные фильтры.

При всех положительных сторонах использования данных сооружений существуют следующие особенности работы и проблемы:

- снижение производительности ввиду заиливания русла реки, возникшего в результате превышения оптимальных объемов добычи воды из скважин;
- изменение дебета скважин и качества добываемой воды в зависимости от времени года;
- проникновение гидробионтов в скважины при высоких гидравлических градиентах потоков [96];
- вследствие антропогенного воздействия на поверхностный водоем и месторождение поверхностных вод в целом или ввиду значительной эрозии грунта в районе размещения скважин в добываемой воде могут быть обнаружены концентрации органических соединений [21], солей тяжелых металлов, радиоактивных нестабильных и стабильных изотопов, патогенных микроорганизмов;
- высокие концентрации общего железа и марганца в воде, обусловленные: природными факторами и местоположением скважин относительно поверхностного водоема; а также превышением оптимальных объемов добычи воды из скважин;

- увеличение общей жесткости, концентрации аммония, а также образование сероводорода и серы в результате изменения окислительно-восстановительных условий [97];

- низкая эффективность удаления полярных органических соединений, например, этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) и 2-Амино-1,5-нафталиндисульфоната [97, 98, 99];

- повышенные концентрации аммония, нитратов [99], связанные с антропогенным влиянием на поверхностный водоем.

Кроме того, наличие различных природных и антропогенных загрязнителей влияет на повышенные концентрации данных веществ в бентали открытых водоемов через отмирание гидробионтов [22]. Определенные виды загрязнений при прохождении по биологической цепи аккумулируются, в следствие чего концентрация данных веществ возрастает от 10 до 100 раз [23, 24]. Необходимо отметить, что попадание данных веществ в водопроводные очистные сооружения приводит к образованию вторичных загрязнений через отмирание гидробионтов, развитие биоценозов и при последующей реагентной обработке воды [25 - 27]. Методы сокращения концентраций вторичных загрязнений даны в ранее опубликованных исследованиях [9, 28, 29, 30].

На рисунке 1.6 показана схематическая диаграмма процессов, протекающих при береговой фильтрации (БФ) на скважине инфильтрационного водозабора (ИВ) [97, 100, 101].

С целью сокращения объемов МУВ целесообразно использование, по возможности, в качестве предочистки естественных физических, химических и биологических процессов, которые можно реализовывать на водозаборах (береговая фильтрация, предочистка с использованием искусственных водоемов и т.д.) [31, 32, 33, 102, 103].

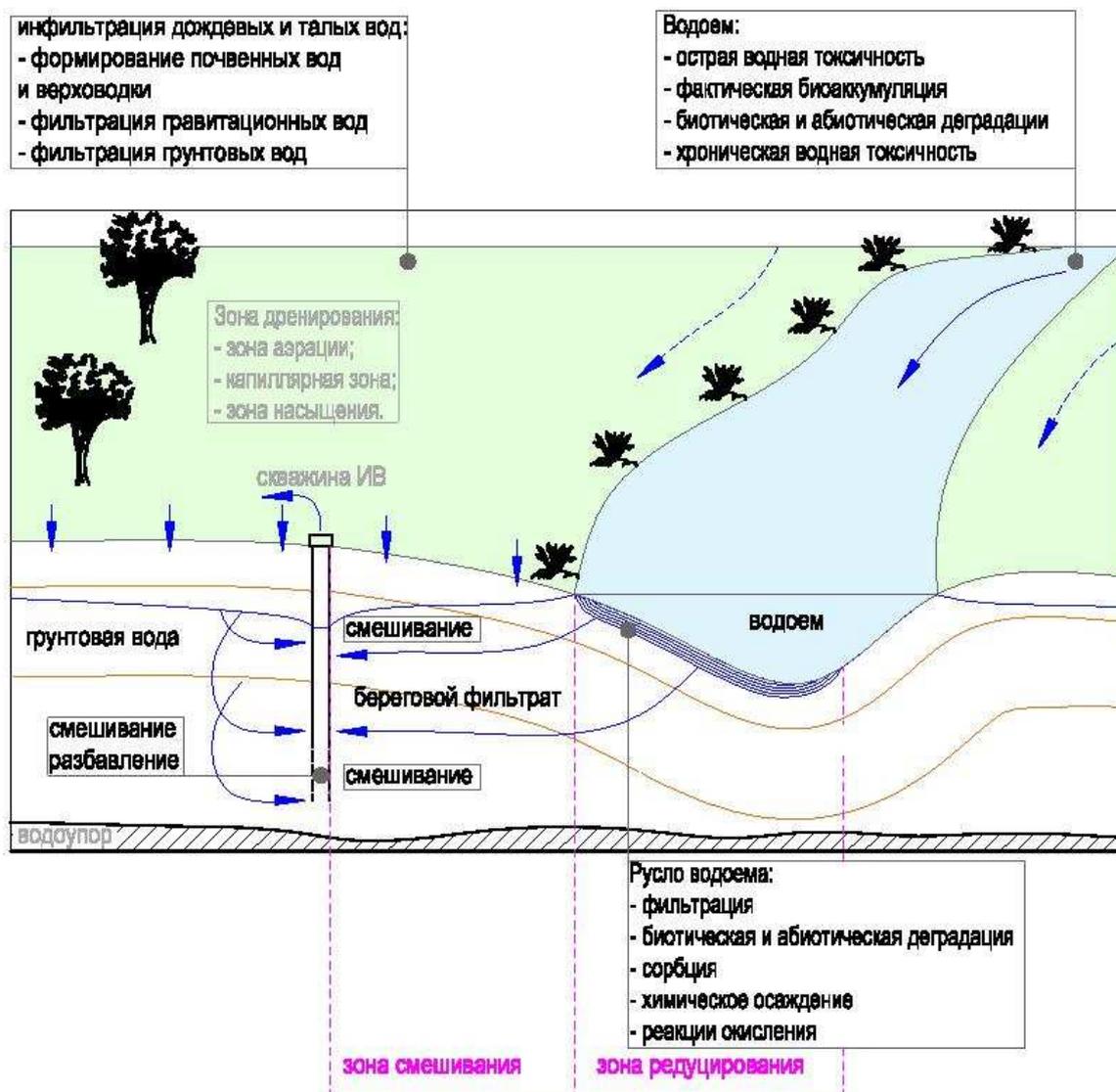


Рисунок 1.6 Схематическая диаграмма процессов, протекающих при береговой фильтрации

Анализ литературных данных по технологиям очистки и конструкции МУВ показал, что наиболее распространенным и эффективным способом глубокой очистки природных вод, загрязненных растворенными органическими веществами является сорбция на АУ.

### 1.3. Сорбционная очистка воды от нефтепродуктов и фенолов.

Для извлечения растворенных органических соединений (ОС) при водоподготовке широко применяется сорбционная очистка, при этом абсорбционная способность органических соединений увеличивается в ряду: спирты, в том числе гликоли, - кетоны – сложные эфиры – альдегиды – не

диссоциирующие кислоты – ароматические соединения. Молекулы с низкой полярностью, а также молекулы с относительно высокой молекулярной массой хорошо адсорбируются АУ, абсорбционная способность данных ОС возрастает кратно удлинению углеродной цепи, особенно если молекулярная масса вещества свыше 30 000 а.е.м., адсорбционная емкость АУ в данном случае будет ограничиваться эффективным радиусом пор. Присутствие неорганических солей в растворе также способствует укрупнению ассоциатов молекул загрязняющих веществ, т.е. улучшает сорбцию. Менее других адсорбируются на АУ простые вещества в ионной форме [19, 20], АУ с малыми размерами пор непригоден для сорбции органических соединений с большими размерами молекул [34]. Таким образом, АУ является эффективным адсорбентом, если имеет широкий спектр действия: на его поверхности фиксируется большинство органических молекул [35, 36].

Статистические данные о загрязнениях поверхностных и подземных водоисточников свидетельствуют о том, что наиболее распространенными и строго нормируемыми видами растворенных органических соединений, являются нефтепродукты и фенолы [37, 38, 39, 104], которые удаляются многими видами сорбентов, в том числе крупнопористыми.

### **1.3.1. Виды сорбентов, применяемых для очистки воды от нефтепродуктов и фенолов, и их основные характеристики.**

Одним из основных параметров при выборе сорбентов является эффективный радиус поры, в соответствии с этим размером, пористость сорбентов характеризуется усредненным процентным соотношением:

- супермикропор:  $0,6 \div 0,7$  нм;
- микропор:  $0,6 \div 0,7 < r_{эф} < 1,5 \div 1,6$  нм;
- мезопор:  $1,5 \div 1,6 < r_{эф} < 100-200$  нм;
- макропор:  $r_{эф} > 100-200$  нм.

Технические характеристики и свойства наиболее распространенных марок сорбентов приведены в [15, 16, 17, 18, 19, 20, 40], некоторые из них приведены в таблице 1.1.

Экспериментально установлено, что АУ должен соответствовать ряду требований:

- оптимальные объемы пор для промышленных АУ: микропоры - до 0,5 см<sup>3</sup>/г [41, 42], макропоры - до 1,4 см<sup>3</sup>/г;

- рекомендованная крупность зерен 1 - 2 мм [40].

Таблица 1.1 Технические характеристики некоторых активированных углей, применяемых для очистки воды

Марка угля	Крупность, мм	Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	Насыпная плотность, г/дм <sup>3</sup>	Прочность при истирании, %
БАУ-А	1,0-3,6	-	240	60
МАУ-2А	1,8-8,0	-	270	70-85
БАУ-М	0,5-1,5	-	-	-
Марка угля	Суммарный объем пор, см <sup>3</sup> /г	Объем микропор, см <sup>3</sup> /г	Объем мезопор, см <sup>3</sup> /г	Объем макропор, см <sup>3</sup> /г
БАУ-А	1,65-1,80	0,22-0,25	0,08-0,10	1,35-1,45
МАУ-2А	≥1,4	0,37-0,46	0,06-0,09	0,25-0,32
БАУ-М	1,80	0,24	0,1	1,4

Выбор технологических характеристик сорбционного слоя стационарного адсорбера зависит от вида и концентрации присутствующих в воде антропогенных загрязнений [15].

В РФ широкое распространение при глубокой очистке природных вод на МУВ получили отечественные сорбенты марок ДАК и БАУ, а также модифицированные сорбенты КФГ – М и МАУ. Стоимость данных сорбентов ниже, чем у зарубежных, а по эффективности устранения ОС они не уступают им. По-прежнему распространен метод углевания на насосных станциях первого подъема или в составе технологической цепи стационарных станций водоподготовки [43].

Сорбционная способность АУ определяется в основном благодаря порам  $0,5 \div 1,6$  нм, соизмеримыми с радиусами ассоциатов [15]. То, что высокоразвитая поверхность АУ имеет большое сродство к ОС подтверждено экспериментально [44, 45].

Кроме того, существуют различные виды полифункциональных загрузок, например, «Экософт Микс», предназначенный для одностадийного умягчения, удаления железа, марганца, алюминия, гуминовых веществ, аммония, ионных тяжелых металлов и состоящий из пяти сорбционных материалов. Данная загрузка регенерируется раствором хлористого натрия. В модульной сорбционной установке «Булок» применяется двухслойная загрузка: верхний слой характеризуется мезо- и микропористой структурой, предназначен для удаления высокомолекулярных соединений: гуминовых кислот, нефтепродуктов и низкомолекулярных соединений: фенол, пестициды; нижний слой устраняет ионы тяжелых металлов. К недостаткам установки «Булок» можно отнести низкую производительность, сложность конструкции и отсутствие возможности совместной промывки и регенерации разных сорбентов загрузки СФ [46].

Основные ОС техногенного происхождения в водах поверхностных водоемов - это растворенные органические примеси (РОП), наиболее распространенные из них - нефтепродукты и соединения фенольной группы, поступающие в поверхностные воды в различных концентрациях [47].

Учитывая размер молекул различных ОС, например, фенол – 0,71 нм, нефтепродукты - 1,8 нм, поры радиусом менее 0,6 нм практически недоступны для молекул этих ОС.

Использование микропористых АУ для удаления из воды ряда органических веществ неэффективно из-за сферической недоступности микропор для больших молекул этих веществ. Их можно извлекать из воды АУ с развитой переходной пористостью. Однако, при получении таких углей обгар достигает 75% и выше [48], что делает производство таких углей не экономичным.

### **1.3.2. Типы и конструкции сорбционных фильтров.**

Существующие типы сорбционных фильтров разделяются по ряду признаков:

- по принципу работы: напорные и безнапорные фильтры;
- по состоянию загрузки: адсорберы с неподвижным плотным и неплотным (взрыхленным) слоем загрузки и с подвижным слоем загрузки, в т.ч. псевдооживленным слоем;
- по направлению движения потока жидкости через загрузку фильтра: с нисходящим и восходящим направлением потока, существуют также адсорберы с горизонтальным(радиальным) направлением потока;
- по количеству слоев загрузки: с однородной загрузкой, многослойной загрузкой;
- по количеству ступеней: одноступенчатые и многоступенчатые.

Сорбционные фильтры различаются также и по ряду конструктивных признаков: виду и характеристикам загрузки, виду распределительных и водосборных устройств, высоте загрузки, форме, диаметру и материалу корпуса, устройству внутренних перегородок и др.

На рисунке 1.7 показаны схемы работы фильтров с неподвижным слоем загрузки и различным направлением движения потока: на рисунке 1.7а – схема адсорбера с нисходящим потоком движения жидкости, на рисунке 1.7б – схема с восходящим потоком, на рисунке 1.7в – с радиальным потоком.

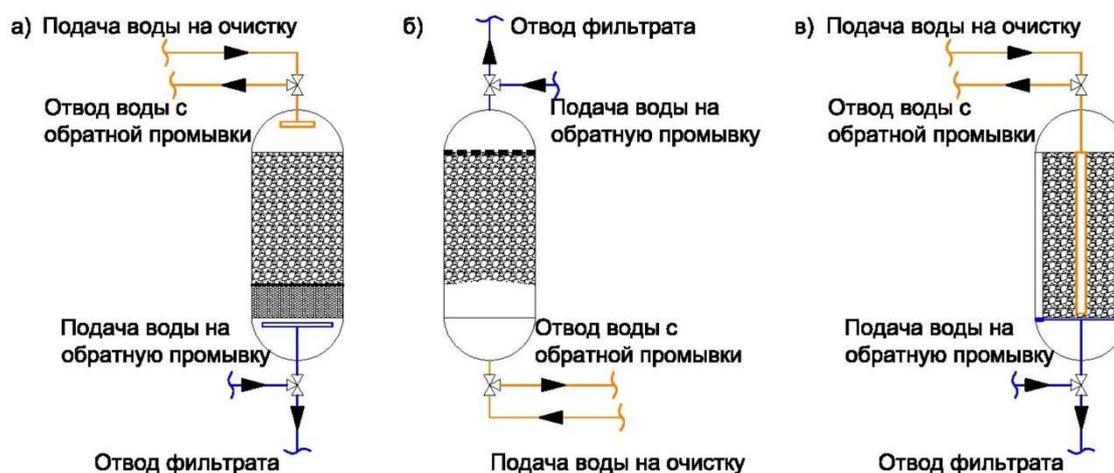


Рисунок 1.7 Типы адсорберов с неподвижным слоем загрузки: а – схема адсорбера с нисходящим потоком движения жидкости, б – с восходящим потоком; в – с радиальным потоком движения жидкости

Каждый из перечисленных типов СФ имеет свои преимущества и недостатки. В частности, в фильтрах с нисходящим движением жидкости для обеспечения равномерного распределения потока по площади фильтров требуются более сложные водораспределительные и водосборные дренажно-распределительные устройства. В фильтрах с восходящим направлением жидкости загрузка, создавая сопротивление ее движению, способствует лучшему распределению потока. Но, при этом, возникает опасность выноса загрузки, для предотвращения чего применяют ограничительные сетки, которые не предотвращают потерь мелких фракций сорбента. В адсорберах с неплотным (взрыхленным) и подвижным слоем загрузки возникает риск истирания загрузки при ее перемещении и значительные потери сорбента.

Как показал анализ литературных данных, для МУВ, в основном, применяются однослойные сорбционные фильтры с неподвижным слоем загрузки, а также осветлительно - сорбционные фильтры напорного типа, которые характеризуются более устойчивой и надежной работой в условиях многократного перемещения установок.

### **1.3.3. Влияние основных конструктивных и технологических параметров на работу сорбционных фильтров.**

На эффективность работы сорбционных фильтров влияют:

- конструктивные параметры фильтра: высота загрузки, площадь фильтра;
- технологические параметры: скорость фильтрования, расход жидкости;
- температура воды;
- гидродинамические свойства фильтра;
- вид сорбента;
- качественно-химический состав обрабатываемой воды, вид и концентрация загрязнителей;
- эффективность предварительной очистки обрабатываемой воды.

Конструктивные и технологические параметры фильтра оказывают влияние на гидродинамические свойства фильтра. Вид сорбента, его характеристики и их соотношение с концентрацией загрязнителей в обрабатываемой воде являются основными факторами при конструировании СФ.

Значительное влияние оказывает предварительная очистка воды, с помощью которой снижается концентрация взвешенных веществ, органических загрязнений, количество патогенных микроорганизмов и простейших.

Характер влияния технологических параметров на эффективность протекания процесса сорбции проявляется в зависимостях, которые применяются для описания кинетики и динамики процесса.

#### 1.3.4. Кинетика процесса сорбционной очистки воды.

В СФ в основном происходит поверхностная сорбция – адсорбция, которая также состоит из физической (обусловленной межмолекулярными силами), хемосорбции и ионного обмена [49].

Величина адсорбции компонентов раствора  $\Gamma_i$  связана с величиной поверхностного натяжения  $\sigma$  фундаментальным уравнением Гиббса (1.1):

$$-d\sigma = \sum_i \Gamma_i d\mu_i \quad (1.1)$$

Адсорбция протекает со снижением энергии Гиббса при постоянном давлении или со снижением энергии Гельмгольца при постоянном объеме, при этом происходит увеличение разности концентраций между раствором и поверхностью твердого тела.

Величина адсорбции вещества из раствора определяется температурой  $T$  и его концентрацией  $C$  в каждом отдельном случае. Ввиду разнообразия сорбционных процессов, при извлечении ОС из многокомпонентного раствора, отсутствует единая математическая модель, описывающая сорбционные явления в комплексе.

Общей характеристикой адсорбента является изотерма адсорбции, уравнение которой записывается в общем виде [50]:

$$A = f(C_p), \quad (1.2)$$

Влияние температуры на скорость адсорбции характеризуется дифференциальной теплотой адсорбции, метод расчета которой основан на применении уравнения Клаузиуса – Клапейрона 1.3. [51]:

$$Q = -R \cdot \Delta \ln C / \Delta (1/T) \text{ при } A = \text{const}, \quad (1.3)$$

где  $C$  – равновесная концентрация нефтепродуктов в растворе, моль/дм<sup>3</sup>;  $T$  – температура, °K;  $Q$  – изостерическая дифференциальная теплота сорбции, Дж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная Дж/моль·K;  $A$  – сорбционная емкость, моль/г.

Значения дифференциальной теплоты сорбции нефтепродуктов экспериментально определены в [51].

Динамическая сорбционная емкость может быть описана уравнением:

$$\Delta C = f(h, W), \quad (1.4)$$

где:  $h$ - высота слоя сорбента,  $W$  - количество активных центров сорбции.

При средних концентрациях зависимость адсорбции растворенных веществ от концентрации достаточно хорошо описывается эмпирическими уравнением Фрейндлиха (1.5):

$$A = k \cdot C^n, \quad (1.5)$$

где  $A$  - количество адсорбированного вещества,  $k$  и  $n$  - константы, характерные для каждой адсорбционной системы, и зависящие от вида сорбента и состава загрязнителей в растворе, а также от температуры и прочих факторов [50], причем  $0 < n < 1$

$A$  также уравнением Ленгмюра (1.6):

$$A = A_m \cdot (b \cdot C_o / (1 + b \cdot C_o)), \quad (1.6)$$

где  $A_m$  – общее число центров,  $b$  – константа адсорбционного равновесия,  $C_o$  – исходная концентрация, мг/дм<sup>3</sup>.

Уравнение Ленгмюра основано на следующих положениях мономолекулярной теории адсорбции:

- адсорбция происходит на дискретных адсорбционных центрах, которые могут иметь различную природу;

- при адсорбции соблюдается строго стехиометрическое условие - на одном центре адсорбируется одна молекула;
- адсорбционные центры энергетически эквивалентны и независимы, то есть адсорбция на одном центре не влияет на адсорбцию на других центрах;
- процесс адсорбции находится в динамическом равновесии с процессом десорбции.

При малых концентрациях загрязняющего вещества в растворе формула (1.6) переходит в уравнение Генри (1.7) [50].

$$A = k \cdot C, \text{ при } A = A_m \cdot b \quad (1.7)$$

То есть превращается в уравнение мономолекулярной кинетики 1-го порядка, где сорбционная емкость прямо пропорциональна концентрации вещества в растворе.

Изотермы адсорбции, получаемые в результате исследований, отклоняются от изотермы Ленгмюра, ввиду идеализированности модели Брунауэр, Эммет и Теллер отказались от второго допущения Ленгмюра и для случая, когда температура адсорбтива ниже критической (то есть, это еще пар) разработали теорию полимолекулярной адсорбции и выделили пять основных типов изотерм (рисунок 1.8) [49]. Данные о сорбционных свойствах материала и характере сорбции на нем различных веществ можно получить из изотерм сорбции при постоянной температуре, также на вид изотермы оказывает влияние концентрация вещества [50].

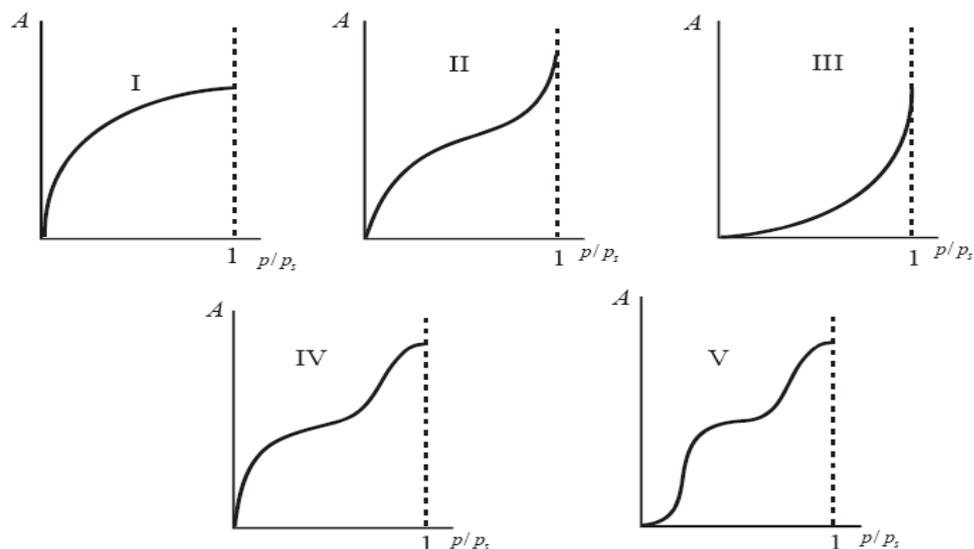


Рисунок 1.8. Основные типы изотерм адсорбции

Для расчета сорбционных процессов очистки воды наиболее часто используются уравнения Фрейндлиха (1.5), и Ленгмюра (1.6), которые являются обычным уравнением кинетики первого порядка, или произвольного порядка реакций, и не учитывают особенности гидродинамического движения жидкости в аппарате.

Уравнения Генри (1.7) и Фрейндлиха (1.5), как показала практика, применимы лишь при невысоких величинах исходных концентраций загрязнений и степени очистки воды. В отдельных случаях лучшая аппроксимация экспериментальным данным достигается при применении уравнения Ленгмюра (1.6). В любом случае, практическое применение этих уравнений обычно, ограничивается условиями проведения эксперимента в небольшом диапазоне изменения параметров процесса.

При расчете сорбционной емкости фильтров различной производительности используется уравнение материального баланса (1.8):

$$A = Q \cdot T \cdot (C_o - C_{вых}) / w_{загр} \quad (1.8)$$

где  $Q$  – расход подаваемой жидкости;  $T$  – продолжительность работы фильтра;  $C_{вых}$  – концентрация на выходе, мг/дм<sup>3</sup>,  $w_{загр}$  – объем загрузки СФ.

Все вышеприведенные уравнения основаны на экспериментальном определении величины предельной сорбции, или изотерм сорбции, с применением различных подходов к описанию процесса сорбции. Все они не содержат показателей, учитывающих влияние на кинетику процесса диффузионных и гидродинамических факторов, и носят чисто эмпирический характер. При использовании этих уравнений для обработки экспериментальных данных, влияние указанных факторов накладывается на константы скорости процесса, или величину удельной сорбции и она становится не фактической, а эффективной величиной, зависящей от

условий, в которых получены экспериментальные данные. Это определяет ограничения, которые влияют на область применения полученных уравнений.

Как правило, динамику работы сорбционного фильтра представляют упрощенно, см. рисунок 1.9 [20]. Данная схема представляет идеализированный процесс продвижения сорбционного фронта в загрузке адсорбера и развитие зоны насыщения и основана на модели идеального вытеснения.

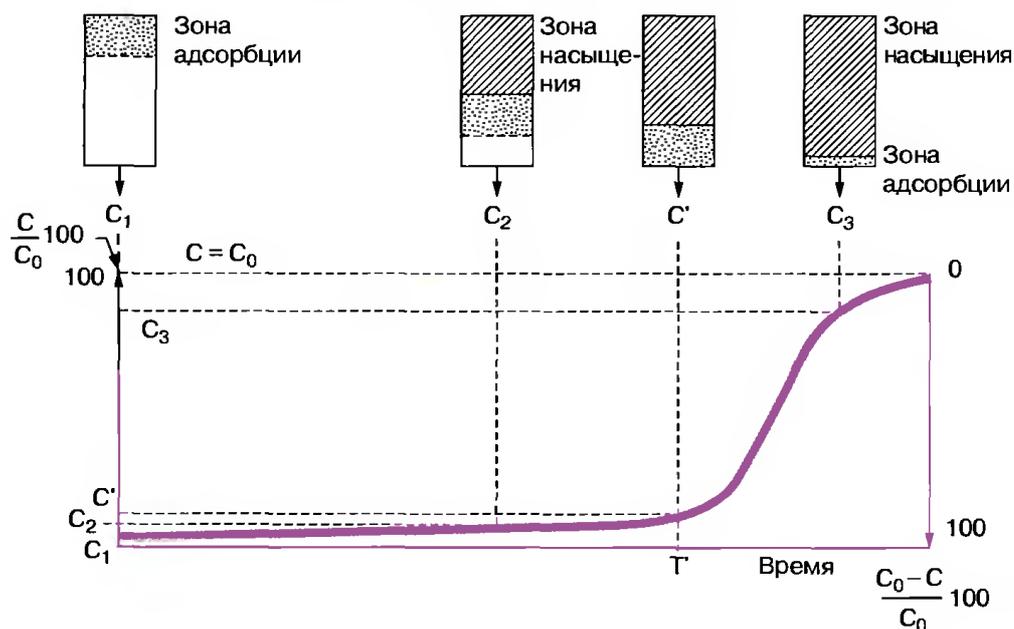


Рисунок 1.9. Схема продвижения фронта адсорбции на фильтре

Длительность работы адсорбционного фильтра до появления в профильтрованном потоке адсорбируемого вещества с исходной концентрацией  $C_{пр}$ , превышающей предельно допустимую,  $\tau_{пр}$ , и высота слоя адсорбента  $L$  связаны в классическом уравнении динамики сорбции, предложенным для расчетов Шиловым Н.А. [50]:

$$\begin{cases} \tau_{пр} = k \cdot L - \tau_0 \\ \tau_{пр} = k \cdot (L - h) \end{cases} \quad (1.9)$$

где  $\tau_{пр}$  - время защитного действия слоя адсорбента, мин;  $L$  - высота слоя адсорбента, см;  $k = A_0 / (C_0 \cdot v)$  - коэффициент защитного действия, мин/см;  $v$  - скорость потока жидкости, см/мин;  $A_0$  - предельная динамическая емкость адсорбента при

данной исходной концентрации  $C_0$ ;  $h$  – неиспользованная высота слоя адсорбента (защитный слой) [49].

Учитывая, что  $k = A_0/(C_0 \cdot v)$  и, что  $v = F/Q$ , уравнение (1.7) легко преобразовать к виду:

$$\tau_{np} = A_0 \cdot (W_{\phi} - W_o) / C_0 \cdot Q \quad (1.10)$$

где:  $W_{\phi}$ ,  $W_o$  - общий и защитный объем сорбционной загрузки фильтра, м<sup>3</sup>;  $Q$  - расход подаваемой воды, м<sup>3</sup>/ч.

Уравнение (1.10) является обычным уравнением материального баланса, при использовании которого требуется экспериментальное определение величины предельной динамической емкости адсорбента  $A_0$  при различных концентрациях  $C_0$  (т.е. изотермы сорбции) и продолжительности исчерпания сорбционной емкости сорбента  $\tau_{np}$ . Защитный объем сорбционной загрузки фильтра  $W_o$ , или высота защитного слоя  $h$  не являются расчетными величинами, а определяются экспериментально (см. рисунок 1.9), или произвольно задаются при расчете фильтра. Оно также не учитывает влияние на кинетику процесса диффузионных и гидродинамических факторов и носят чисто эмпирический характер.

Попытка учесть гидродинамику потока жидкости при описании процесса сорбции на сорбционных фильтрах была предпринята Родзиллером [50], который предложил использовать для этого уравнение однопараметрической диффузионной модели (1.11).

Это уравнение представляет собой систему с рассредоточенными параметрами, в которой дополнительно учитывается продольное перемешивание потока:

$$v \frac{\partial C}{\partial L} + \frac{\partial A}{\partial \tau} + \varepsilon \frac{\partial C}{\partial \tau} + D \frac{\partial^2 C}{\partial L^2} = 0 \quad (1.11)$$

Первый член отражает количество загрязнений, поступающих в СФ, второй – задержанных загрязнений, третий – остаток в воде, четвертый – продольную диффузию.

Зависимость скорости сорбции от степени насыщения сорбента  $A$  в данный момент времени и равновесной  $A_0$  представлена Родзиллером в виде (1.12):

$$dA / d\tau = \gamma_i \cdot C (A_0 - A) \quad (1.12)$$

где  $\gamma_i$  – константа,  $C$  – концентрация вещества в растворе мг/дм<sup>3</sup>.

$A$  также представлена в уравнении Глюкауфа (1.13):

$$dA / d\tau = \beta_I \cdot (A_0 - A) + (1 + \pi^2/15) \cdot dA_0 / d\tau \quad (1.13)$$

Совместное решение уравнений 1.9 и 1.10 позволяет получить выражение для определения степени очистки воды ( $C/C_0$ ) (1.14):

$$\frac{C}{C_0} = \exp(\gamma C_0 \tau) \left\{ \exp(\gamma C_0 \tau) + \exp[\gamma C_0 \tau (K\delta + B)] - \exp(\gamma C_0 \varepsilon \frac{L}{v}) \right\}^{-1} \quad (1.14)$$

Для использования уравнения (1.11 - 1.14) необходимо экспериментальное определение величин  $A_0$ ,  $K_\delta$ ,  $\gamma$  коэффициента диффузии  $D$ , которые зависят от типа аппарата, вида сорбционной загрузки, состава и концентрации загрязнений и др. факторов.

Таким образом, существующие способы математического описания протекания процесса сорбции при очистке воды используют различные модели этого процесса, основанные на разных кинетических и балансовых уравнениях. Как правило, они не учитывают (или учитывают в малой степени) влияние на кинетику процесса диффузионных и гидродинамических факторов, носят чисто эмпирический характер и требуют экспериментального определения величины предельной сорбции, или изотерм сорбции, различных эмпирических коэффициентов. При использовании

этих уравнений для обработки экспериментальных данных, влияние указанных факторов накладывается на константы скорости процесса, или величину удельной сорбции и они становятся не фактической, а эффективной величиной, зависящей от условий, в которых получены экспериментальные данные и носят формальный характер. Это вынуждает вводить ограничения, которыми определяется область применения полученных уравнений.

Независимо от принятой схемы массопереноса и способа его математического описания, для характеристики скорости этого процесса, необходимо, прежде всего, установить режим и структуру движения жидкости через загрузку сорбционного фильтра, определить степень перемешивания потока, фактическое время пребывания жидкости в загрузке.

### **1.3.5. Направления по совершенствованию установок водоподготовки и повышению эффективности их работы.**

В технологической цепочке очистки воды на МУВ сорбции предшествуют другие процессы, которые оказывают существенное значение на эффективность, надежность и стоимость сорбционной доочистки, качество очищенной на установке воды. Как правило, в качестве предварительной очистки перед сорбцией используют отстаивание, коагуляцию, фильтрование, обеззараживание. При коагуляционной обработке воды и последующем отстаивании и фильтрации перед сорбцией, снижается нагрузка на АУ по нерастворенным, коллоидным и растворенным загрязнениям. Наиболее распространенными реагентами являются соединения алюминия и железа.

Применение коагуляции для предварительной обработки воды имеет следующие преимущества:

- 1) одновременно удаляются ассоциаты синтетических органических загрязнителей и токсичных материалов, присутствующие в воде;

2) удаляются биоразлагаемые органические загрязнения, которые могут быть в дальнейшем субстратом для роста бактериальной массы в распределительных системах и загрузке адсорбере;

3) обеспечивается нормализация органолептических свойств воды;

4) уменьшается нагрузка на последующие стадии процесса водоочистки, так как в ходе коагуляции удаляются предшественники тригалометанов – основных потребителей окислителя [14].

Среди недостатков данного метода следует отметить снижение показателей щелочности и рН и, как следствие, изменение стабильности очищенной воды, усиления ее коррозионных свойств.

В целях повышения эффективности удаления органических соединений, не устраненных при коагуляции, предлагаются процессы окисления данных соединений и последующей фильтрации через сорбционные загрузки. Результаты анализа информации по использованию дополнительных возможных путей очистки воды показали, что наиболее эффективный метод – озонирование и последующее фильтрование через гранулированный АУ.

К недостаткам технологии озонирования относят следующие:

- отсутствие бактерицидного действия в водопроводных сетях и незначительное бактерицидное действие в целом;
- большие дозы озона при интенсификации окисления органических соединений.

Перспективными направлениями повышение эффективности процесса сорбции на АУ, по которым следует расширять исследования, по мнению зарубежных специалистов, являются, например, разработка новых видов сорбентов, модифицированных сорбентов, комплексных загрузок из АУ и др. [52-55].

Выбор вида и характеристик сорбента должен производиться для каждого конкретного вида обрабатываемой воды, в зависимости от состава содержащихся в ней загрязнений.

**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 [17]. 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 КЗ в фильтре, должен быть сформирован из МАУ-2А, а верхний из БАУ-А, таким образом, искусственно создается требуемая переходная поверхность.

Использование комплексной загрузки позволит, увеличить сорбционную емкость и продолжительность цикла, а также защитит загрузку при повышенных краткосрочных концентрациях ОС.

Для обеспечения оптимальных условий работы фильтров с КСЗ необходимо, как уже отмечалось, с целью сокращения нагрузки на нее, предотвращения возможности развития бактерий, устраивать эффективную предварительную

очистку воды и ее обеззараживание (озонирование и УФ-обеззараживание). При использовании сорбции на станциях большой производительности требуется периодическая промывка и регенерация загрузки, но для МУВ кратковременного действия она не является необходимой.

### **Выводы по первой главе.**

1. Анализ литературных данных показал, что основным элементом глубокой очистки вод от органических загрязнений на МУВ являются сорбционные фильтры с однородной загрузкой АУ. В отечественных установках наиболее распространенные марки АУ – БАУ, МАУ, КФГ-М, т.к. они обладают большой сорбционной емкостью в отношении органических загрязнений.

2. Предварительная очистка природной воды перед СФ включает в себя различные методы, которые зависят от состава и степени загрязненности исходной воды (коагуляция с флокуляцией, аэрация, отстаивание, флотация, фильтрация на фильтрах грубой и тонкой очистки, микрофильтрация). В полевом водообеспечении для обработки природной воды нашли применение также инфильтрационные водозаборы, брызгательные бассейны и фильтрационные дамбы, которые позволяют, использовать природные процессы очистки воды и снизить нагрузку на песчаные и сорбционные фильтры.

3. Основные недостатки существующих типов мобильных установок: значительная длительность разворачивания, малый ресурс работы, отсутствие в ряде установок функций дезактивации и обезвреживания воды, высокая энергоемкость и стоимость.

4. Как показал анализ литературных данных, для МУВ, в основном, применяются однослойные сорбционные фильтры с неподвижным слоем загрузки, а также осветлительно - сорбционные фильтры напорного типа, которые характеризуются более устойчивой и надежной работой в условиях многократного перемещения установок. Сорбционная способность ряда АУ недостаточна высока из-за сферической недоступности микропор для больших молекул этих веществ.

Более эффективно для этой цели применение АУ с развитой переходной пористостью, но получение таких углей экономически не целесообразно.

5. Существующие способы математического описания протекания процесса сорбции при очистке воды используют различные модели этого процесса, основанные на разных кинетических и балансовых уравнениях. Как правило, они не учитывают (или учитывают в малой степени) влияние на кинетику процесса диффузионных и гидродинамических факторов, носят чисто эмпирический характер и требуют экспериментального определения входящих в них параметров и коэффициентов. При использовании этих уравнений для обработки экспериментальных данных, влияние указанных факторов накладывается на константы скорости процесса, или величину удельной сорбции и она становится не фактической, а эффективной величиной, зависящей от условий, в которых получены экспериментальные данные и носит формальный характер.

6. Независимо от принятого способа математического описания, скорости процесса в сорбционных фильтрах, необходимо установить режим и структуру движения жидкости через загрузку фильтра, определить степень перемешивания потока, фактическое время пребывания жидкости в загрузке.

7. Наиболее распространенными и строго нормируемыми видами органических соединений, присутствующими в поверхностных и подземных источниках являются нефтепродукты и фенолы. Учитывая разный размер молекул различных видов органических загрязнений, их сорбционная способность ограничена из-за сферической недоступности микропор для больших молекул этих веществ.

8. **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.

## ГЛАВА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОРБЦИОННОЙ ЕМКОСТИ ОДНОРОДНЫХ И КОМПЛЕКСНОЙ ЗАГРУЗОК В СТАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ.

### 2.1. Программа и методика исследований.

#### *Материал и методы исследования*

Обоснование и выбор видов КСЗ основывается на определении наиболее распространенных марок АУ. Установлено, что сорбентами, наиболее распространенными в отечественной отрасли водоочистки, является АУ различных марок [56], в том числе уголь марки БАУ–А либо ДАК [10, 11, 15, 19, 40].

Тем не менее, при выборе сорбентов для очистки воды источника, содержащей целый ряд различных ОС, рекомендован к использованию сорбент – АУ марки МАУ [15, 46, 57].

При создании модельного раствора применялись: легкое моторное масло (ориентировочная  $M_r = 300 \div 600$  а.е.м.), фенольные соединения: фенол (ориентировочная  $M_r = 94$  а.е.м.), гидрохинон (ориентировочная  $M_r = 110$  а.е.м.). Основа модельного раствора - дистиллированная вода, использование которой исключает влияние общего железа и других примесей, содержащихся в водопроводной воде, на результаты эксперимента. Оптимальная среда для адсорбции большинства растворенных органических примесей (РОП) антропогенного происхождения – рН=5-7, также сообщается и о более широком диапазоне - оптимальная область рН сорбции нефтепродуктов – рН = 5,5–9,5 (слабокислая–щелочная) [51], модельный раствор имеет рН=5,5–6,6, например, речная вода рН=6,5 - 8,5 до коагуляции. Температура раствора при проведении экспериментов - 20 °С, что исключает влияние температуры на результаты экспериментов [45, 51]. Нефтепродукты поступают в водные объекты в составе стоков и в трех основных состояниях: в молекулярно-растворенном, с крупностью частиц  $10^{-5} > d > 10^{-7}$  м; эмульгированном, с крупностью частиц  $10^{-3} > d > 10^{-5}$  м;

дисперсном, с крупностью частиц  $d > 10^{-3}$  м [58]. Водный раствор нефтепродуктов получали перемешиванием нагретого раствора моторного масла с дистиллированной водой, с последующим отстаиванием и удалением пленки нефтепродуктов с поверхности [59].

Фенольные соединения поступают в водные объекты в растворенном виде.

При проведении исследований изучались следующие виды сорбционных загрузок:

1) Однородные, загрузки из АУ марок:

- БАУ–А - уголь березовый активный дробленый. Адсорбционная активность по йоду 61,3 %; суммарная пористость по воде 1,54 см<sup>3</sup>/г. Насыпная плотность 241,3 г/дм<sup>3</sup>. Размер гранул 0,5 - 1 мм. Объем микропор – 0,22 см<sup>3</sup>/г, мезопор - 0,10 см<sup>3</sup>/г, макропор – 1,22 см<sup>3</sup>/г;

- БАУ-М – уголь березовый активный дробленый. Адсорбционная активность по йоду 70 %; суммарная пористость по воде 1,8 см<sup>3</sup>/г. Насыпная плотность - не нормируется. Размер гранул 0,5 - 1,5 мм. Объем микропор – 0,24 см<sup>3</sup>/г, мезопор– 0,10 см<sup>3</sup>/г, макропор – 1,4 см<sup>3</sup>/г;

- МАУ–2А - модифицированный азотсодержащий уголь. Сорбционная активность по йоду 850 мг/г; общая внутренняя поверхность по БЭТ 800 м<sup>2</sup>/г. Насыпная плотность 270 г/дм<sup>3</sup>. Размер гранул 1 - 2,8 мм. Объем микропор – 0,40 см<sup>3</sup>/г, мезопор - 0,08 см<sup>3</sup>/г, макропор – 0,30 см<sup>3</sup>/г.

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

В исследованиях статической сорбционной емкости сравниваемых сорбентов было проведено **три цикла опытов**:

**1-ая серия опытов** проводилась с целью определения максимальной статической сорбционной емкости однородных и комплексной загрузок из индивидуальных растворов нефтепродуктов и фенолов при максимально возможной их концентрации.

**2-ая серия опытов** проводилась для определения статической сорбционной емкости однородных и комплексной загрузки из раствора, содержащего смесь загрязняющих компонентов: нефтепродуктов, фенольных соединений.

**3-ий опыт** проводился с целью определения предельной статической сорбционной емкости комплексной загрузки КСЗ из раствора, содержащего смесь загрязняющих компонентов: нефтепродуктов, фенольных соединений.

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 дм<sup>3</sup> и выдерживались при периодическом перемешивании в течении 7 дней до установления равновесия.

Определение концентрации эмульгированных и растворённых нефтепродуктов в воде проводилось в соответствии с [60]. Концентрация соединений фенольной группы в водном растворе определялась в соответствии с [61].

Выполнение измерений массовой концентрации летучих фенолов (в сумме) основано на экстракции фенолов из воды бутилацетатом, реэкстракции их щелочью и образовании в реэкстракте окрашенных соединений при взаимодействии фенолов с 4-аминоанти-пиринном в присутствии гексацианоферрата (III) калия. Полученные соединения вновь экстрагируются бутилацетатом и оптическая плотность экстракта измеряется на фотометре с непрерывной разверткой спектра при длине волны  $\lambda = 470$  нм.

Метод измерения массовой концентрации нефтепродуктов основан на зависимости интенсивности поглощения С-Н связей в инфракрасной области спектра ( $2930 \pm 70$ ) см<sup>-1</sup> от массовой концентрации НП в элюате. Процедура анализа

заключается в извлечении эмульгированных и растворённых нефтяных компонентов из воды экстракцией четырёххлористым углеродом, хроматографическом отделении нефтепродуктов от сопутствующих органических соединений других классов на колонке, заполненной оксидом алюминия.

Исходная концентрация загрязнений в 1-ом цикле опытов в индивидуальном модельном растворе составляла: нефтепродукты  $148,0 \text{ мг/дм}^3$  (монораствор), концентрации соединений фенольной группы модельном растворе -  $948,0 \text{ мг/дм}^3$  (монораствор). Во 2-ом цикле опытов при работе сравниваемых сорбентов на модельном растворе смеси нефтепродуктов и фенола, концентрации этих веществ в растворе составляли: нефтепродукты -  $100,0 \text{ мг/дм}^3$ ; фенольные соединения -  $100,0 \text{ мг/дм}^3$ .

В 3-ем цикле опытов исследовалась работа комплексной сорбционной загрузки КСЗ на модельном растворе «нефтепродукты-фенол» при их концентрации  $10,0 \text{ мг/дм}^3$  и  $10,0 \text{ мг/дм}^3$ .

Методика приготовления рабочего раствора заключалась в следующем.

В емкость вместимостью  $12 \text{ дм}^3$  наливали  $5 \text{ дм}^3$  теплой ( $\sim 50^\circ\text{C}$ ) воды и включали верхнеприводную мешалку RW 20 digital (число оборотов 1500 об/мин, крыльчатка пропеллерного типа). На расстоянии 15-20 мм от вращающейся мешалки вводили смесь нефтепродукта и уайт - спирита. Доводили объем раствора до  $10 \text{ дм}^3$  и перемешивали в течении 2 часов. Затем водный раствор отстаивался в течении 5 дней, всплывшие на поверхность капли нефтепродуктов удаляли с помощью фильтровальной бумаги, в растворе оставались нефтепродукты в эмульгированном и растворенном виде.

В 1-ом и 2-ом циклах опытов для получения высоких начальных концентраций нефтепродуктов в бюкс наливали 3 г нефтепродуктов, добавляли 3 г уайт-спирита, закрывали и перемешивали содержимое бюкса встряхиванием в течение 10 минут.

Адсорбционная емкость (А, мг/г) углей для каждой навески рассчитывалась по формуле:

$$A = (C_{исх} - C_p) \cdot Q / M_{ay}, \quad (2.1)$$

где  $C_{исх}$ ,  $C_p$  – концентрация исследуемого компонента, соответственно, в исходном растворе и равновесная концентрация, мг/дм<sup>3</sup>;  $Q$  – объем раствора, дм<sup>3</sup>;  $M_{ay}$  – масса навески угля, г.

По полученным данным строили зависимость адсорбционной емкости АУ от равновесной концентрации компонента.

## 2.2. Результаты исследований по определению максимальной сорбционной емкости АУ в статических условиях из монорастворов нефтепродуктов и фенолов.

Исследования по определению максимальной сорбционной емкости однородных загрузок из АУ марок БАУ-А, БАУ-М, МАУ-2А и комплексная загрузка КСЗ в статических условиях (изотерм сорбции) проводились в 1-ом цикле опытов на монорастворах нефтепродуктов и фенолов

Результаты опытов по сорбции нефтепродуктов на испытываемых видах сорбционных материалов из индивидуального раствора нефтепродуктов с начальной концентрацией 148 мг/дм<sup>3</sup> приведены в Приложении Е, изотермы сорбции нефтепродуктов из индивидуального раствора показаны на рисунке 2.1.

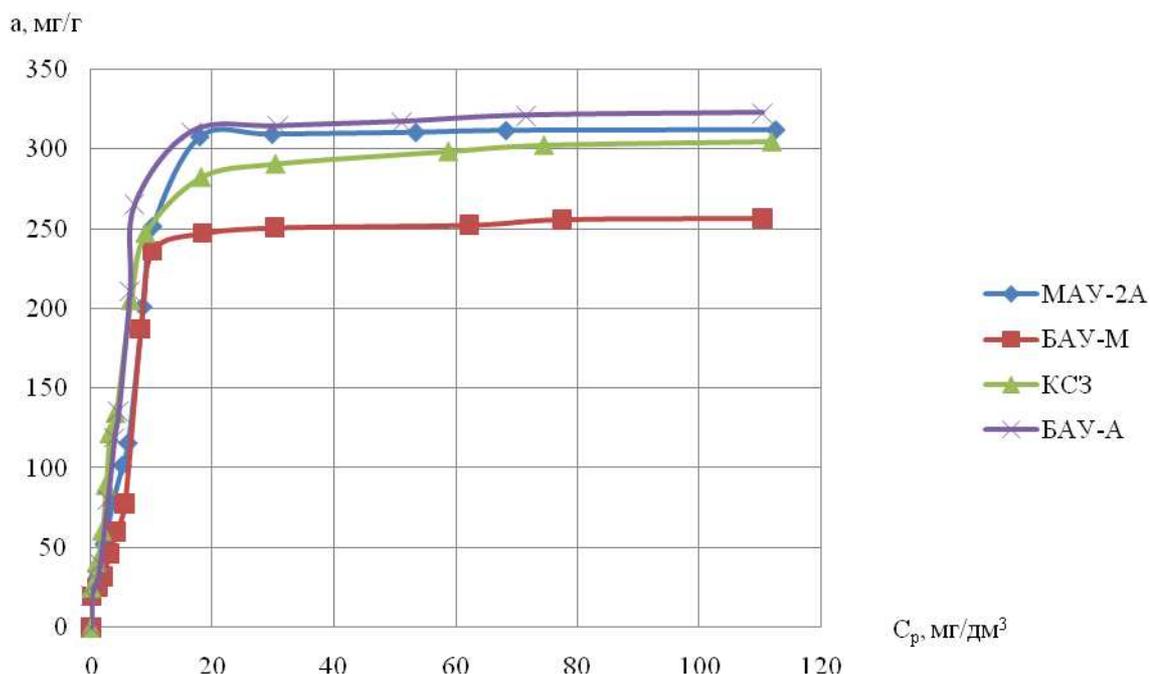


Рисунок 2.1. Изотермы адсорбции нефтепродуктов на однородных и комплексной загрузках АУ по нефтепродуктам (из индивидуального раствора)

Изотермы сорбции нефтепродуктов из индивидуального раствора (рисунок 2.1) показывают, что наибольшее значение предельной сорбционной емкости по этим загрязнениям имели КСЗ и БАУ-А.

Результаты исследований по определению адсорбционной емкости испытываемых видов сорбционных материалов в статических условиях по фенолам из индивидуального раствора приведены в Приложении Ж и на рисунке 2.2.

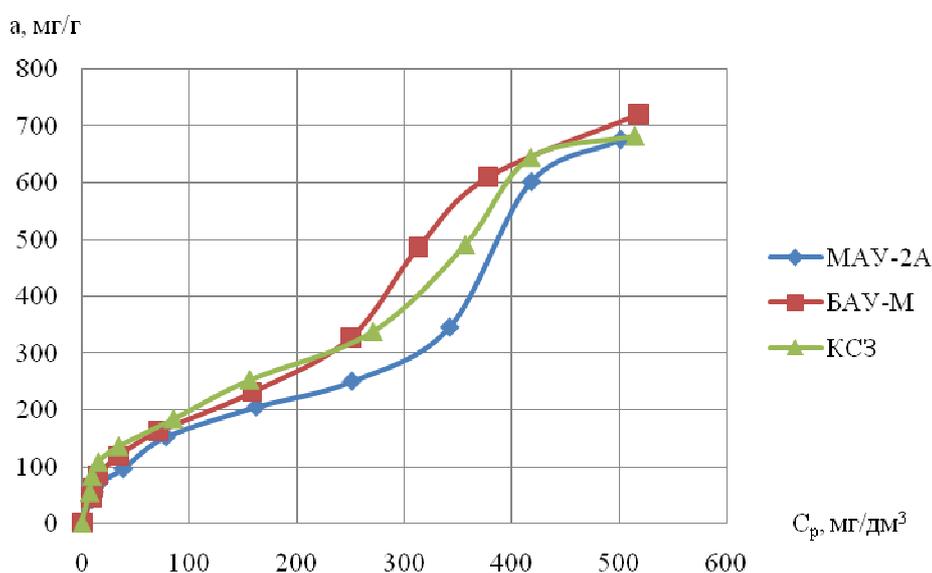


Рисунок 2.2. Изотермы сорбции соединений фенольной группы из индивидуального раствора различными АУ

Сравнительные изотермы сорбции соединений фенольной группы из индивидуального раствора на АУ различных видов (рисунок 2.2) свидетельствуют о том, что сорбционные емкости углей МАУ-2А, комплексная загрузка КСЗ и БАУ-М по фенолу были близки между собой.

Изотермы сорбции растворенных нефтепродуктов и фенольных соединений, полученные в результате экспериментов, по классификации Гильса и Смита относятся к изотермам разного типа [49, 50, 62], данные типы изотерм получены и другими исследователями при изучении сорбционных процессов [63-65].

**2-ая серия опытов** проводится с целью определения статической сорбционной емкости однородных и комплексной загрузок из раствора,

содержащего смесь загрязняющих компонентов: нефтепродуктов с начальной концентрацией  $100 \text{ мг/дм}^3$  и фенолов с начальной концентрацией  $100 \text{ мг/дм}^3$  (в соотношении 1:1).

Методика определения статической сорбционной емкости сорбентов принималась такой же, как и в 1-ом опыте.

В Приложении И и на рисунке 2.3 приведены результаты исследований 2-го цикла по определению сорбционной емкости по нефтепродуктам сравниваемых видов загрузок из раствора, содержащего смесь нефтепродуктов и соединений фенольной группы.

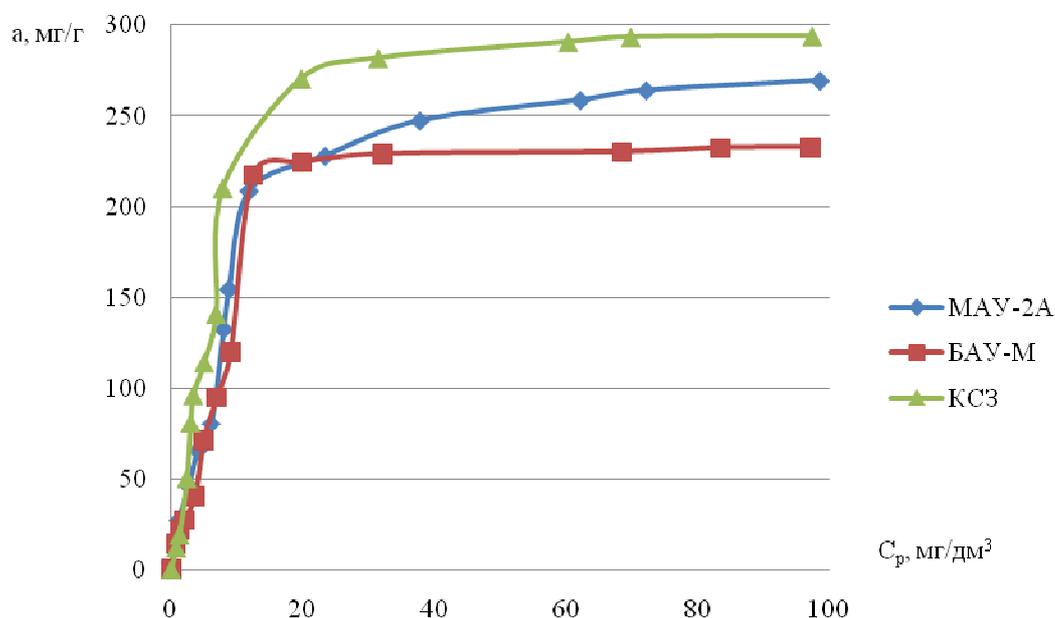


Рисунок 2.3. Изотермы сорбции нефтепродуктов из раствора «нефтепродукты + фенол» различными АУ

Как видно из этих данных (рисунок 2.3), при сорбции из раствора, содержащего смесь нефтепродуктов и соединений фенольной группы, 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.

Результаты опытов по определению сорбционной емкости сравниваемых загрузок по фенолам из раствора «нефтепродукты – фенол» приведены в Приложении К и на рисунке 2.4.

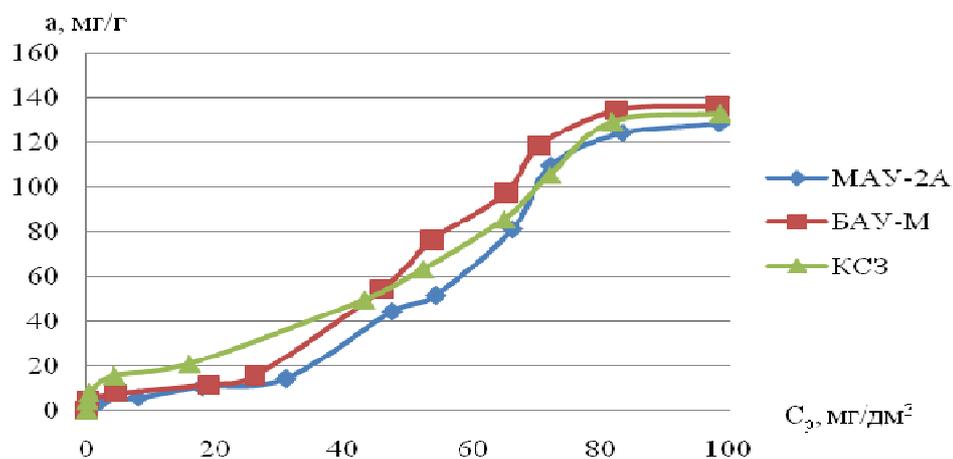


Рисунок 2.4. Изотермы сорбции фенола из раствора «нефтепродукты – фенол» различными АУ

Как видно из полученных изотерм сорбции соединений фенольной группы из раствора «нефтепродукты – фенол» (рисунок 2.4), сорбционная емкость по фенолам всех сравниваемых загрузок АУ была также примерно одинакова, как и в случае использования индивидуального раствора (рисунок 2.2).

Сравнение опытных данных сорбционной емкости испытанных загрузок, полученных на индивидуальных растворах каждого из загрязнений (нефтепродукты и фенольные соединения, рисунки 2.1 и 2.2), и из раствора со смесью этих загрязнений (рисунки 2.3 и 2.4), показывает, что во втором случае сорбционная емкость снижалась в сравнении с сорбционной емкостью из индивидуальных растворов для всех испытанных видов сорбентов.

На рисунке 2.5 показаны изотермы сорбции нефтепродуктов из раствора индивидуального компонента (нефтепродуктов), и из раствора со смесью компонентов («нефтепродукты – фенол»), на однородных загрузках из АУ марки МАУ (рисунок 2.5А), марки БАУ (рисунок 2.5Б) и на комплексной загрузке из смеси этих АУ (рисунок 2.5В).

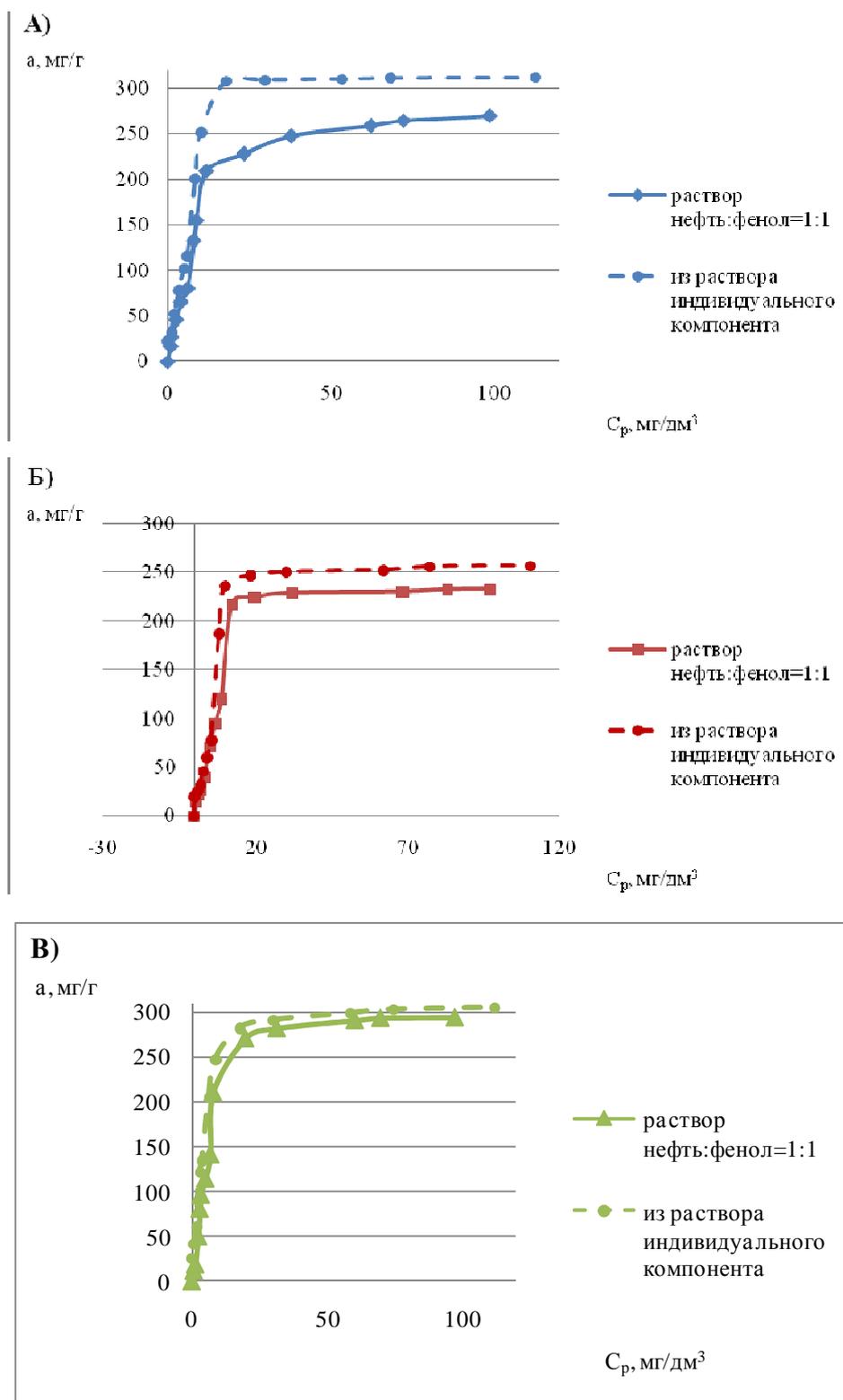


Рисунок 2.5. Изотермы сорбции нефтепродуктов из раствора индивидуального компонента (нефтепродукты), и из раствора со смесью компонентов (нефтепродукты + фенол) на загрузках: А) -однородная, МАУ; Б) - однородная, БАУ; В) - комплексная КСЗ

Однако, как видно из рисунка 2.5, для комплексной загрузки КСЗ это сказывалось в меньшей степени, чем для однородных сорбентов. Комплексная

загрузка оказалась также эффективней, чем однородные загрузки АУ, во всем диапазоне значений величины  $C_p$ .

Подобные результаты получены при сравнении данных о сорбционной емкости изученных загрузок по фенолу при обработке раствора с одним этим загрязнителем, и из раствора со смесью «нефтепродукты – фенол» (рисунок 2.6).

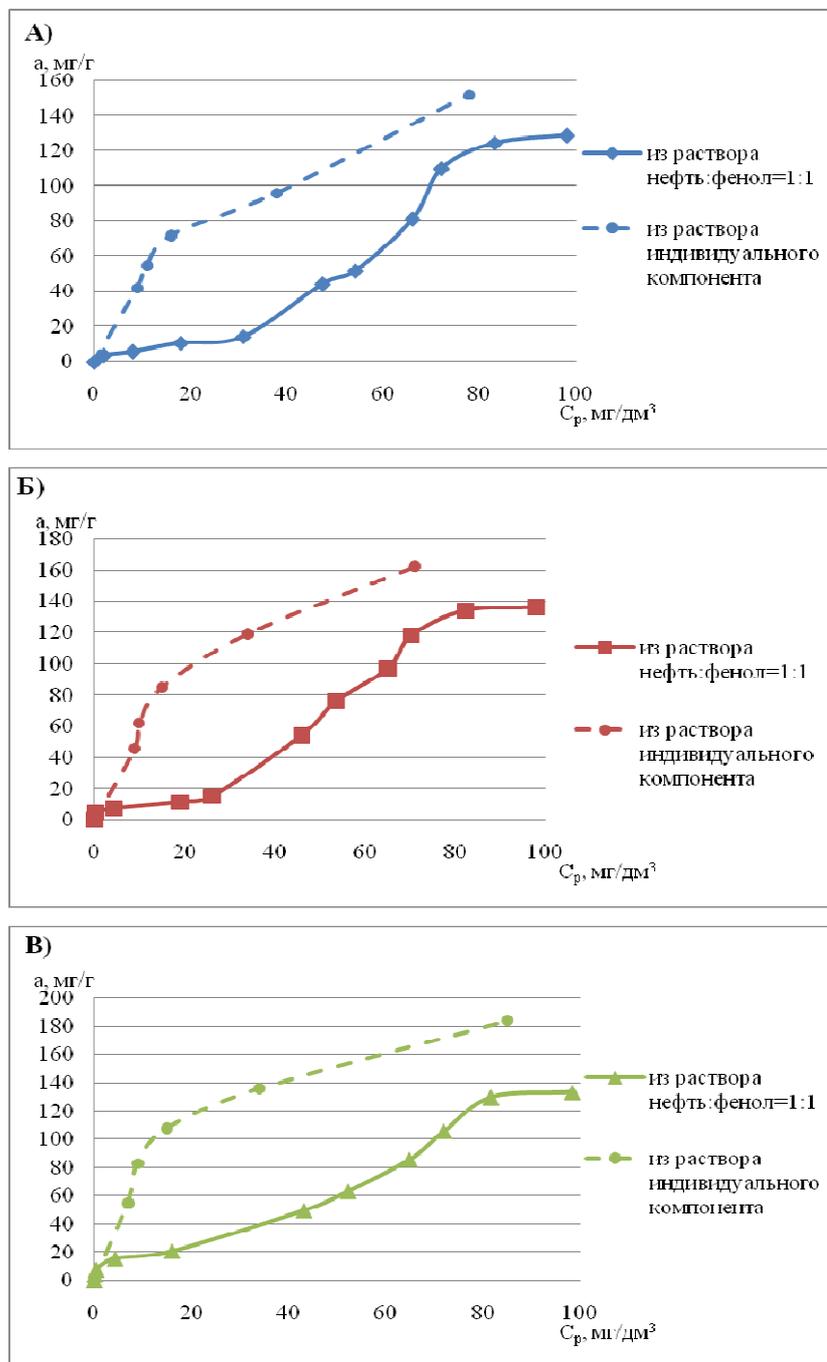


Рисунок 2.6. Изотермы сорбции фенолов из раствора индивидуального компонента (фенол), и из раствора со смесью компонентов («нефтепродукты – фенол») на загрузках: А) -однородная, МАУ; Б) - однородная, БАУ; В) - комплексная КСЗ.

Приведенные на рисунке 2.6 данные по сорбции соединений фенольной группы из раствора «нефтепродукты – фенол» свидетельствуют о том, что предельные значения сорбционной емкости всех испытанных видов сорбентов снижались по сравнению с их сорбционной емкостью из индивидуального раствора. Однако, при этом, в области небольших значений величины  $C_p$  (до  $40 \text{ мг/дм}^3$ ) комплексная загрузка КСЗ оказалась также эффективней, чем однородные загрузки АУ.

Анализируя результаты проведенных исследований по определению сорбционной емкости испытанных загрузок из АУ разных марок в статических условиях, следует отметить, что особый практический интерес (при рассмотрении вопроса очистки природных вод) представляют данные по сорбции нефтепродуктов и фенолов из растворов, содержащих смесь этих загрязнений, при невысоких величинах  $C_p$ .

На рисунке 2.7 приведены данные о сорбционной емкости по нефтепродуктам сравниваемых загрузок АУ из раствора «нефтепродукты – фенол» в диапазоне концентраций  $C_p$  до  $10,0 \text{ мг/дм}^3$ .

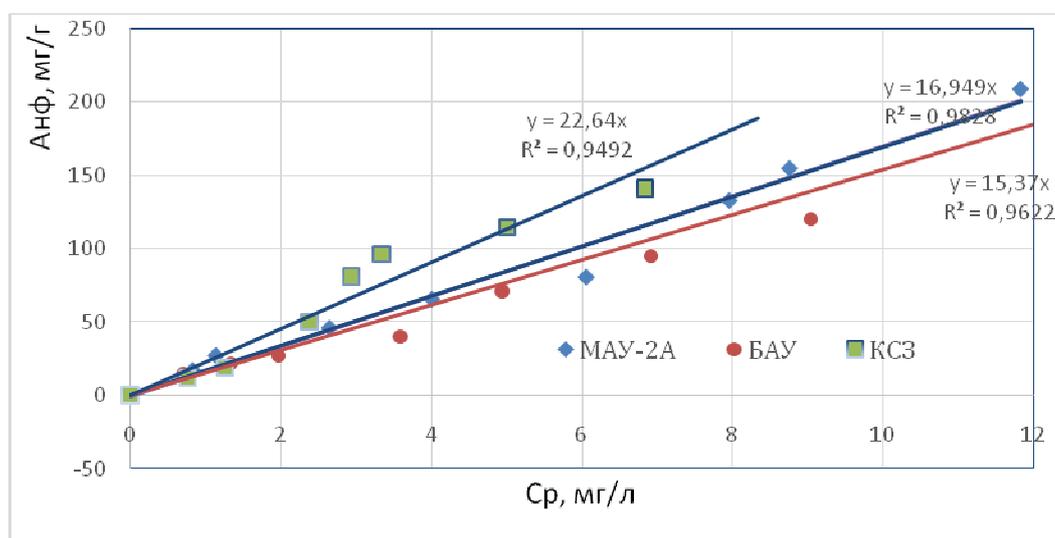


Рисунок 2.7. Сорбционная емкость однородных и комплексной загрузок АУ по нефтепродуктам из раствора "нефтепродукты - фенол" (в диапазоне концентраций  $C_p$  до  $10,0 \text{ мг/дм}^3$ ).

На рисунке 2.8 приведены данные о сорбционной емкости по фенолам сравниваемых загрузок из раствора «нефтепродукты – фенол» в диапазоне концентраций  $C_p$  до  $20,0 \text{ мг/дм}^3$ .

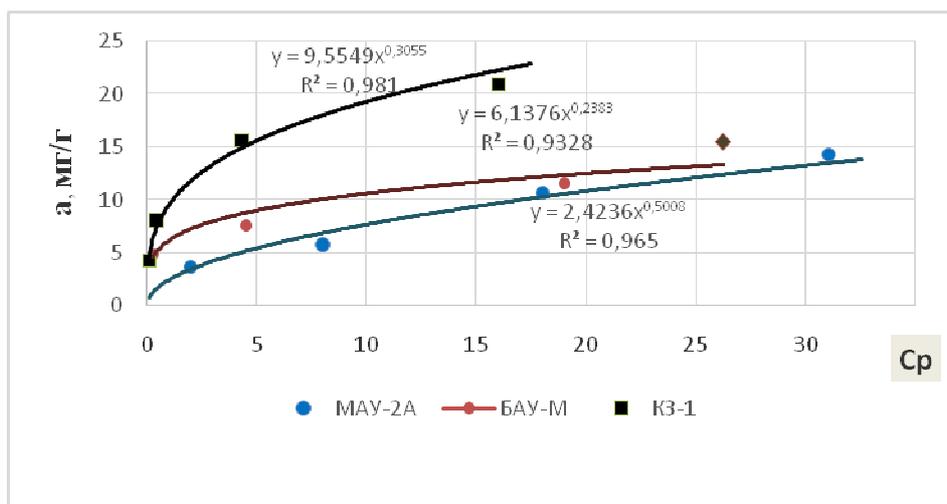


Рисунок 2.8. Сорбционная емкость однородных и комплексной загрузок АУ по фенолам из раствора "нефтепродукты - фенол" (в диапазоне концентраций  $C_p$  до 20,0 мг/дм<sup>3</sup>).

Протоколы КХА представлены в Приложении В. Результаты исследований опубликованы в рецензируемом издании [66].

**3-я серия опытов** проводилась с целью определения предельной статической сорбционной емкости комплексной загрузки КСЗ из раствора, содержащего смесь загрязняющих компонентов: нефтепродуктов с начальной концентрацией 10 мг/дм<sup>3</sup> и фенолов с начальной концентрацией 10 мг/дм<sup>3</sup>.

Методика определения предельной статической сорбционной емкости КСЗ заключалась в следующем.

Навеску сорбента массой 0,5 г из смеси активированных углей МАУ-2А и БАУ-М (в соотношении 1:1) заливали 1 дм<sup>3</sup> раствора нефтепродуктов и фенол ( $C_{\text{нф}} = 10$  мг/дм<sup>3</sup>,  $C_{\text{ф}} = 10$  мг/дм<sup>3</sup>), выдерживали 2 дня при периодическом перемешивании. Обработанный раствор сливали и в нем определяли остаточную концентрацию фенола и нефтепродуктов. Эту же навеску снова заливали 1 дм<sup>3</sup> исходного раствора. Циклы смены раствора повторяли до тех пор, пока концентрация раствора после контакта с сорбентом больше не изменялась. Определение концентрации нефтепродуктов в воде проводилось в соответствии с [60], определение концентрации фенолов в воде проводилось в соответствии с [61].

Результаты опыта приведены в таблице 2.1.

**Таблица 2.1. Результаты определения статической сорбционной емкости комплексной загрузки КСЗ на растворе нефтепродукты + фенолы (10 мг/дм<sup>3</sup> +10 мг/дм<sup>3</sup>) (3 серия опытов).**

Цикл опыта (смена раствора)	Равновесная концентрация вещества в конце цикла опыта	
	Нефтепродукты $C_{нф}$ , мг/дм <sup>3</sup>	Фенольные соединения $C_{ф}$ , мг/дм <sup>3</sup>
1-ый	0,0	0,1
2-ой	0,1	9,7
3-ий	1,2	9,9
4-ый	9,8	10,0
5-ый	10,0	10,0

Протокол КХА представлен в Приложении Г.

Данные по полной емкости сорбента (СУС) по нефтепродуктам и фенольным соединениям в данном опыте приведены ниже (таблица 2.2).

Таблица 2.2. Полная емкости сорбента (СУС) по нефтепродуктам и фенольным соединениям

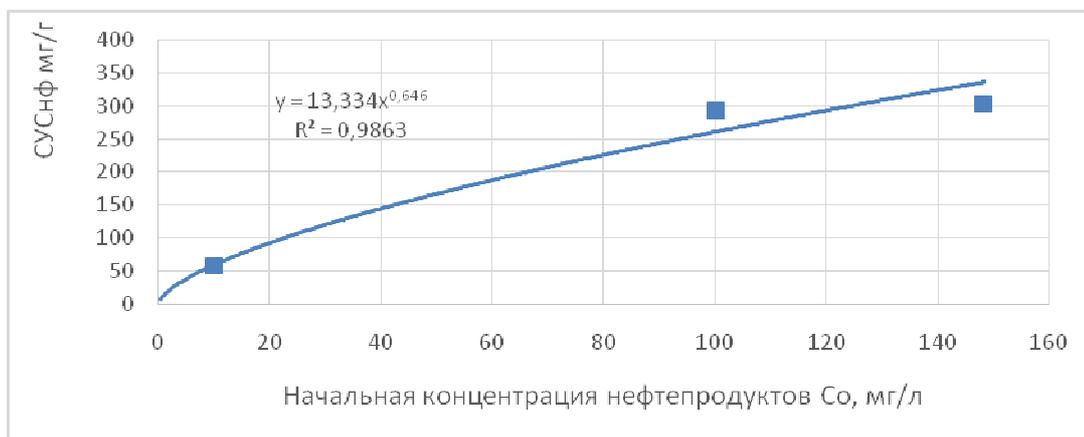
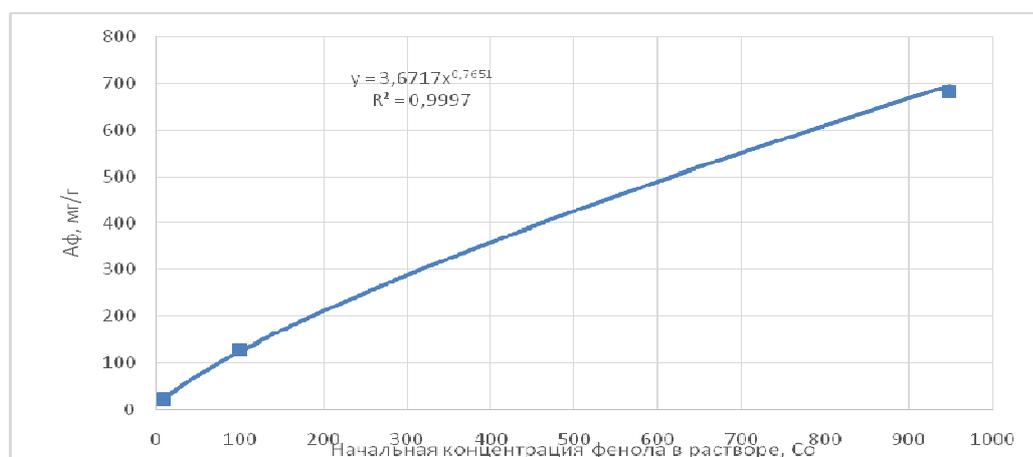
Статическая емкость сорбента СУС, мг/г	
По нефтепродуктам,	58
По фенолам	21

Сравнение экспериментальных данных по полной статической сорбционной емкости комплексной загрузки КСЗ, полученных в 1, 2 и 3-ем циклах опытов, показало, что полная СУС зависит также и от начальной концентрации вещества в растворе  $C_{исх}$  (таблица 2.3).

Таблица 2.3. Полная статическая сорбционная емкость СУС комплексной загрузки КСЗ

Цикл опытов	$C_{исх}$ нефтепродуктов, мг/ дм <sup>3</sup>	СУС <sub>нф</sub> по нефтепродуктам, мг/г	$C_{исх}$ по фенолу мг/ дм <sup>3</sup>	СУС <sub>ф</sub> по фенолу, мг/г
1	148	304	948	683
2	100	294	100	129
3	10	58	10	21

На рисунке 2.9 показана зависимость полной статической сорбционной емкости СУС комплексной загрузки КСЗ по нефтепродуктам от начальной концентрации загрязнений  $C_{исх}$ , а на рисунке 2.10 – зависимость полная СУС по фенольным соединениям от  $C_{исх}$ .

Рисунок 2. 9. Зависимость полной статической сорбционной емкости СУС комплексной загрузки КСЗ по нефтепродуктам от начальной концентрации загрязнений  $C_{исх}$ Рисунок 2. 10. Зависимость полной статической сорбционной емкости СУС комплексной загрузки КСЗ по фенолу от начальной концентрации загрязнений  $C_{исх}$

Обработкой данных таблицы 2.3 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 2.2 и 2.3).

$$СУС_{\text{нф}} = 13,33 \cdot C_{\text{исх}}^{0,646} \quad (2.2)$$

$$СУС_{\text{ф}} = 3.67 \cdot C_{\text{исх}}^{0,76} \quad (2.3)$$

### **Выводы по второй главе**

1. Результаты проведенных исследований по определению сорбционной емкости однородных и комплексной загрузки из АУ разных марок в статических условиях показали, что более эффективной по изъятию нефтепродуктов является комплексная загрузка КСЗ (из смеси АУ марок МАУ и БАУ, в соотношении 1:1), в частности при невысоких концентрациях  $C_p$  в сравнении с однородными. загрузками из этих же АУ.

2. Сорбционная емкость всех сравниваемых загрузок по фенолам была примерно одинакова, однако, при невысоких концентрациях загрязнений комплексная загрузка КСЗ имела большую сорбционную емкость в сравнении с однородными загрузками.

3. Исследования показали, что при сорбции загрязняющих веществ из раствора, содержащего смесь нефтепродуктов и фенолов, сорбционная емкость сравниваемых видов загрузок изменялась в зависимости от исходной концентрации нефтепродуктов, фенольных соединений в растворе.

4. На основании экспериментальных данных получены зависимости величин полной статической сорбционной емкости комплексной загрузки КСЗ по нефтепродуктам и фенолу от исходной концентрации этих загрязнений в растворе.

### **ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ КОМПЛЕКСНОЙ СОРБЦИОННОЙ ЗАГРУЗКИ.**

#### **3.1. Материал и методы исследования.**

На основе анализа литературных данных о практическом опыте применения различных видов АУ (глава 1) для проведения исследований приняты следующие загрузки:

- 1) Однородная загрузка из АУ марки МАУ – 2А - модифицированный азотсодержащий уголь. Сорбционная активность по йоду 850 мг/г; общая внутренняя поверхность по БЭТ 800 м<sup>2</sup>/г. Насыпная плотность 270 г/дм<sup>3</sup>. Размер гранул 1-2,8 мм. Пористость АУ марки МАУ-2А: микропор – 0,40 см<sup>3</sup>/г, мезопор 0,08 см<sup>3</sup>/г, макропор – 0,30 см<sup>3</sup>/г.
- 2) Однородная загрузка из АУ марки БАУ – А – уголь березовый активный дробленый. Адсорбционная активность по йоду 61,3%; суммарная пористость по воде 1,54 см<sup>3</sup>/г. Насыпная плотность 241,3 г/дм<sup>3</sup>. Размер гранул 0,5 - 1 мм. Пористость АУ марки БАУ-А: микропор – 0,22 см<sup>3</sup>/г, мезопор 0,10 см<sup>3</sup>/г, макропор – 1,22 см<sup>3</sup>/г.
- 3) Комплексная загрузка КСЗ -1 – двухслойная загрузка сорбционного фильтра: нижний слой – МАУ – 2А, верхний слой – БАУ – А; с равным распределением объемов.
- 4) Комплексная загрузка КСЗ-3 – двухслойная загрузка сорбционного фильтра: нижний слой – МАУ – 2А, верхний слой – БАУ – А; с распределением объемов – 62,5 % БАУ-А/ 37,5 % МАУ-2А.
- 5) Комплексная загрузка КСЗ - 4 – двухслойная загрузка сорбционного фильтра: нижний слой – МАУ – 2А, верхний слой – БАУ – А; 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 позволяет использовать в полной мере пористость сорбентов путем послойного их распределения.

Объем загрузки в фильтровальных лабораторных колонках равен 0,66-0,69 дм<sup>3</sup>, высота слоя загрузки – 0,48 - 0,50 м.

Температура раствора при проведении экспериментов: 18 - 20 °С, что исключало влияние температуры на результаты экспериментов [45, 51]. В модельных растворах создавались концентрации нефтепродуктов 10 мг/дм<sup>3</sup>, 3,74 мг/дм<sup>3</sup>, 2,80 мг/дм<sup>3</sup>, 0,38 мг/дм<sup>3</sup>, 0,20 мг/дм<sup>3</sup>; концентрации соединений фенольной природы 10 мг/дм<sup>3</sup>, 5 мг/дм<sup>3</sup>, 0,9 мг/дм<sup>3</sup>, 0,09 мг/дм<sup>3</sup>, 0,023 мг/дм<sup>3</sup>. Указанные концентрации соответствуют фактическим данным по концентрациям загрязняющих веществ в поверхностных стоках [37, 38, 39, 47, 57, 67, 68, 104].

Для проведения экспериментов разработана установка (рисунок 3.1). Модельный раствор содержится в резервуаре (1), по системе патрубков подается на фильтровальные колонки (3), при помощи трех перистальтических насосов АНП-10М и зажимов регулируется расход модельного раствора, подаваемого на очистку. В обвязке насосов АНП-10М использованы трубки соединительные ТСГ-6 и трубка соединительная вилкообразная, трубки силиконовые диаметром 6 мм и винтовые зажимы, схема обвязки насосов представлена на рисунке 3.2.

Скорость фильтрации в диапазоне 0,7 - 5,7 м/ч, что соответствовало принятому в практике диапазону скоростей на СФ [69].

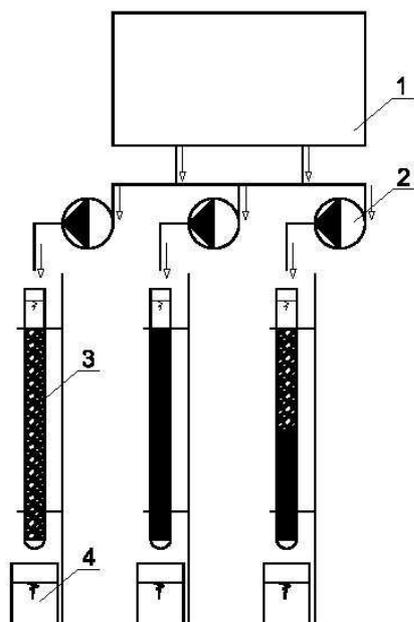
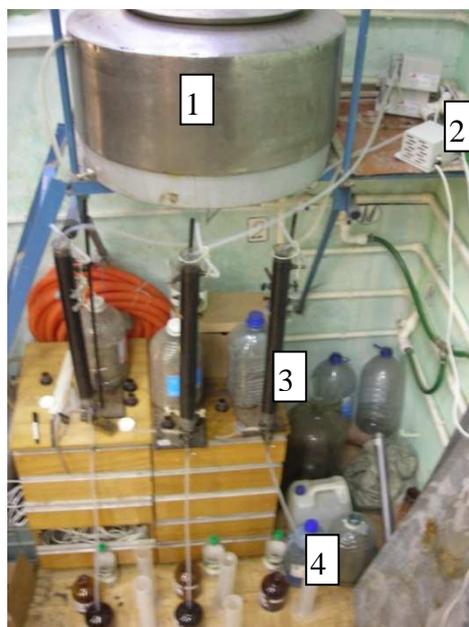


Рисунок 3. 1. Схема опытной установки: 1 – резервуар (емкость) с модельным раствором; 2 – насос АНП-10М; 3 – фильтровальная колонка; 4 – сосуд для проб



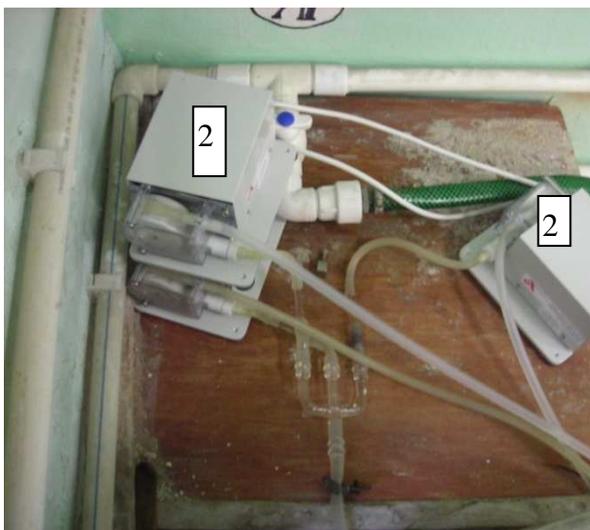


Рисунок 3. 2. Внешний вид опытной установки (обозначения см. рисунок 3.1)

Анализы проб исходной и очищенной воды выполнялись в специализированной лаборатории по стандартным методикам: отбор проб воды для определения остаточной концентрации нефтепродуктов производится в соответствии с требованиями [60, 70, 71, 72, 73], содержание фенолов измеряется в соответствии с методическими указаниями [61, 70, 72, 74].

В виду сложности определения концентраций различных компонентов раствора, образующихся в ходе контакта нефтепродуктов с водой и включенными в многокомпонентную систему, в пробах, для описания сорбции принята суммарное содержание нефтепродуктов в пробе, что допускается [51, 75].

Сравнительные исследования сорбционных свойств различных видов загрузок СФ проводились в рамках НИР «Теоретические и экспериментальные исследования по выбору и применению комбинированных сорбентов для мобильных установок для кондиционирования воды, подготовки питьевой воды, глубокой очистки стоков, а также, очистки воды в условиях ЧС».

### 3.2. Результаты исследований по выбору состава комплексной сорбционной загрузки

В данном разделе приведены результаты сравнительных исследований комплексных загрузок с разным соотношением объемов АУ марок БАУ-А и МАУ-2А. Изучалась работа сорбционных фильтров на растворах нефтепродуктов и фенолов разной концентрации с применением следующих видов комплексных загрузок:

- 1) КСЗ - 1 – двухслойная загрузка сорбционного фильтра: нижний слой – МАУ – 2А, верхний слой – БАУ – А; с равным распределением объемов.
- 2) КСЗ - 3 – двухслойная загрузка сорбционного фильтра: нижний слой – МАУ – 2А, верхний слой – БАУ – А; с распределением объемов – 62,5 % БАУ-А и 37,5 % МАУ-2А.
- 2) КСЗ - 4 – двухслойная загрузка сорбционного фильтра: нижний слой – МАУ – 2А, верхний слой – БАУ – А; с распределением объемов – 70 % БАУ-А и 30 % МАУ-2А.

**Первая серия опытов (1-ый режим работы установки)** проводилась с целью сравнения скоростей сорбции и сорбционной емкости комбинированных загрузок КСЗ-1 и КСЗ-3, концентрации растворенных органических примесей (РОП) в модельном растворе составили: нефтепродукты – 0,20 мг/дм<sup>3</sup>, фенолы – 0,31 мг/дм<sup>3</sup>. Объем сорбционной загрузки во всех фильтрах составил – 0,66 дм<sup>3</sup>, скорости фильтрования варьировались в диапазоне 1,71 – 2,71 м/ч. Объем отфильтрованного модельного раствора через каждый фильтр составил 9 дм<sup>3</sup>, продолжительность каждого опыта - 155 -201 мин.

Результаты исследований в первой серии опытов (1-ый режим работы установки) по сорбции нефтепродуктов и фенолов на комплексных загрузках КСЗ-1 и КСЗ-3 приведены в Приложении Л. В пробах очищенной жидкости концентрация

нефтепродуктов оказалась ниже порога обнаружения, фенолы во всех опытах не обнаружены.

Данные по массе извлеченных нефтепродуктов и фенолов на комплексных загрузках КСЗ-1 и КСЗ-3 в ходе опытов (1-ый режим начальная концентрация нефтепродуктов -  $0,20 \text{ мг/дм}^3$ , фенолов –  $0,31 \text{ мг/дм}^3$ ) приведены на рисунках 3.3 и 3.4.

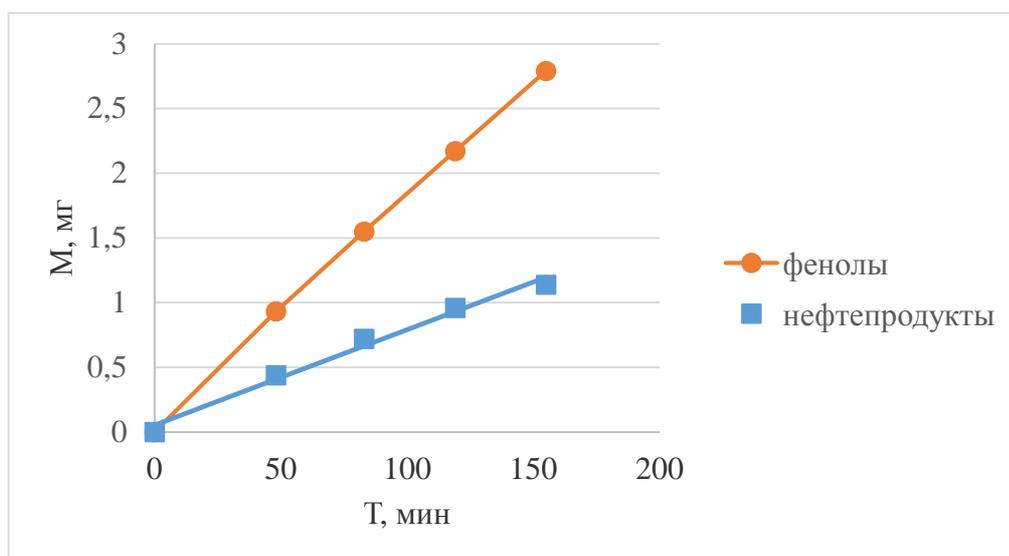


Рисунок 3.3. Изменение массы извлеченных нефтепродуктов и фенолов на комплексной загрузке КСЗ-3 (начальная концентрация нефтепродуктов -  $0,20 \text{ мг/дм}^3$ , фенолов –  $0,31 \text{ мг/дм}^3$ ).

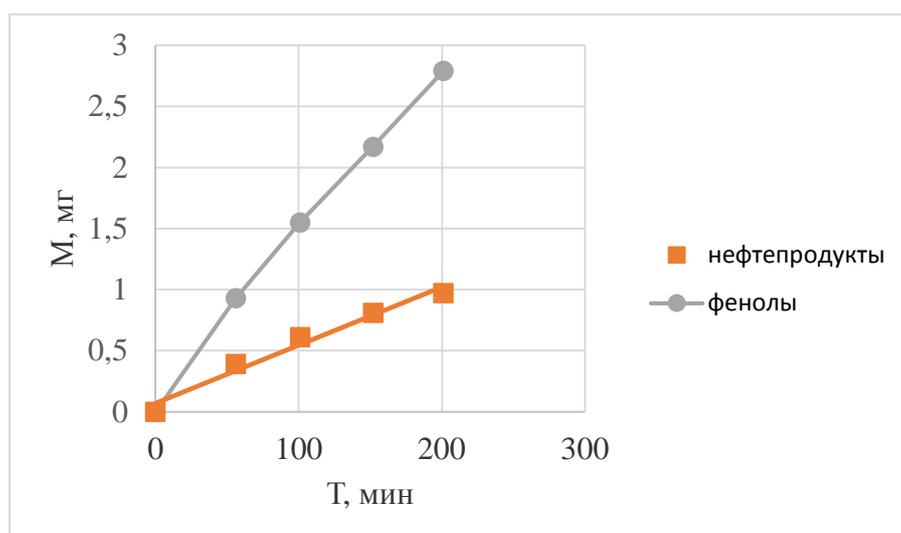


Рисунок 3.4. Изменение массы извлеченных нефтепродуктов и фенолов на комплексной загрузке КСЗ-1 (начальная концентрация нефтепродуктов -  $0,20 \text{ мг/дм}^3$ , фенолов –  $0,31 \text{ мг/дм}^3$ )

**Вторая серия опытов (2-ой режим работы установки)** проводилась с целью сравнения скоростей сорбции и сорбционной емкости комбинированных загрузок КСЗ-1 и КСЗ-4, концентрации РОП в модельном растворе были увеличены и составили: нефтепродукты –  $2,80 \text{ мг/дм}^3$ , фенолы –  $0,90 \text{ мг/дм}^3$ . Объем сорбционной загрузки во всех фильтрах составил –  $0,66 - 0,69 \text{ дм}^3$ , скорости фильтрования варьировались в диапазоне  $2,65 - 3,26 \text{ м/ч}$ . Объем отфильтрованного модельного раствора через каждый фильтр составил  $14 \text{ дм}^3$ , продолжительность каждого опыта - 282-293 мин.

Результаты исследований во второй серии опытов (2-ый режим работы установки) по сорбции нефтепродуктов и фенолов на комплексных загрузках КСЗ-1 и КСЗ-4 приведены в Приложении М.

Динамика процесса сорбции нефтепродуктов и фенолов на фильтрах с разными видами сорбционной загрузки (2-ой режим) показаны на рисунках 3.5-3.6.

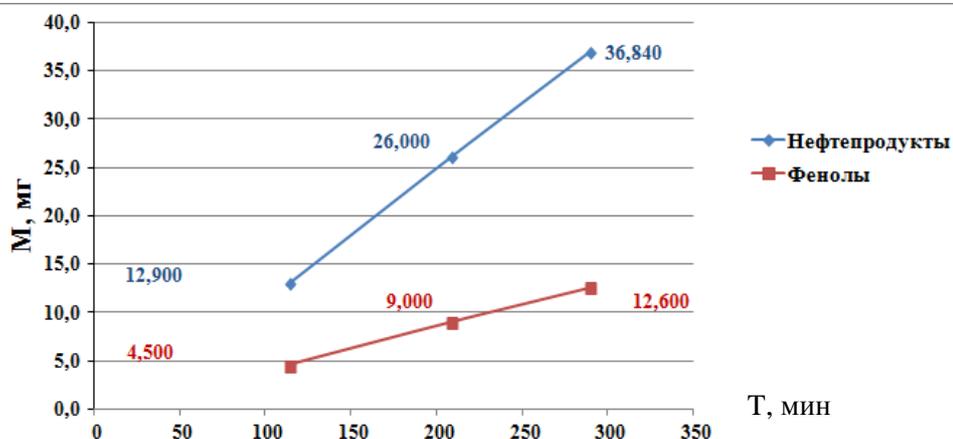


Рисунок 3.5. Изменение массы извлеченных нефтепродуктов и фенолов на комплексной загрузке КСЗ-4 (начальная концентрация нефтепродуктов -  $2,80 \text{ мг/дм}^3$ , фенолов –  $0,90 \text{ мг/дм}^3$ )

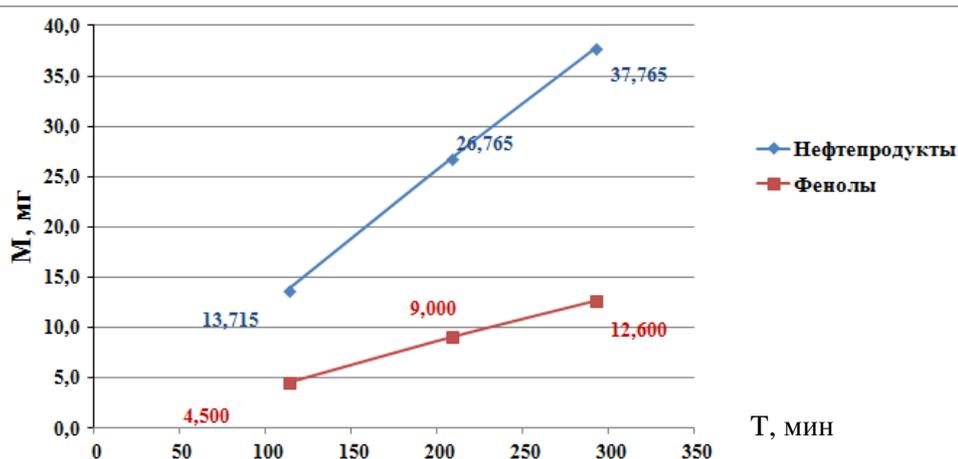


Рисунок 3.6. Изменение массы извлеченных нефтепродуктов и фенолов на комплексной загрузке КСЗ-1 (начальная концентрация нефтепродуктов -  $2,80 \text{ мг/дм}^3$ , фенолов -  $0,90 \text{ мг/дм}^3$ )

На рисунке 3.7 для сравнения приведены графики сорбции нефтепродуктов на комплексных загрузках КСЗ-3 и КСЗ-1 при начальной концентрации нефтепродуктов -  $0,2 \text{ мг/дм}^3$ , а на рисунке 3.8 – графики сорбции нефтепродуктов на комплексных загрузках КСЗ-4 и КСЗ-1 при начальной концентрации нефтепродуктов -  $2,80 \text{ мг/дм}^3$ .

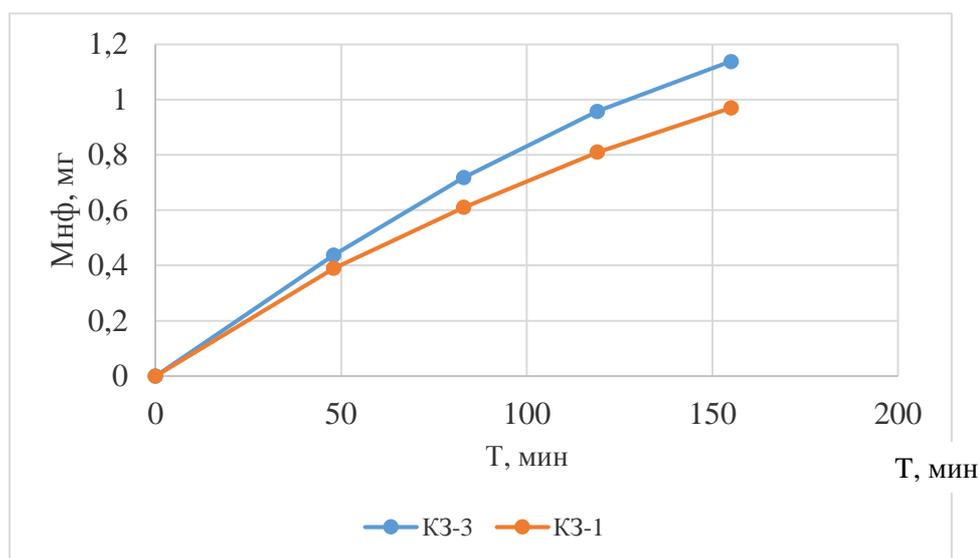


Рисунок 3. 7. Сравнение массы извлеченных нефтепродуктов на комплексных загрузках КСЗ -3, КСЗ-1 (начальная концентрация нефтепродуктов –  $0,20 \text{ мг/дм}^3$ )

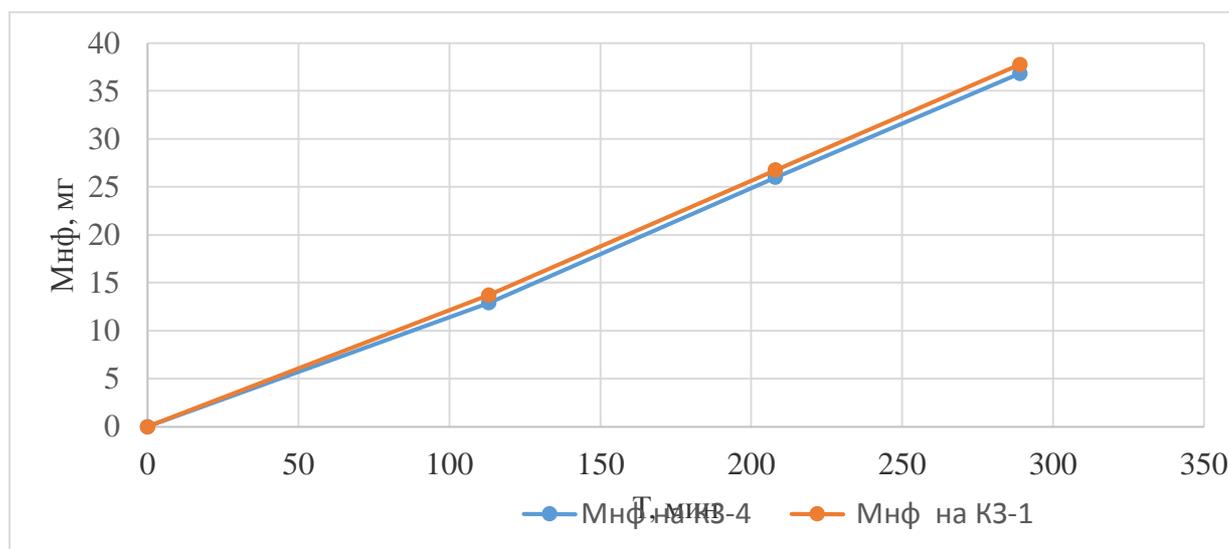


Рисунок 3. 8. Сравнение массы извлеченных нефтепродуктов на комплексных загрузках КСЗ-4, КСЗ-1 (начальная концентрация нефтепродуктов – 2,80 мг/дм<sup>3</sup>)

Анализ результатов проведенных исследований показывает, 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  $C_{исх}$ . Так, при  $C_{исх}$  нефтепродуктов равной 2,8 мг/дм<sup>3</sup> средняя скорость комплексной загрузки КСЗ-1 составляла 0,000838 мг/(г·мин), а у КСЗ-4 - 0,000807 мг/(г·мин). Соединения фенольной природы сорбировались всеми испытанными видами комплексных загрузок практически одинаково.

Следует также иметь в виду повышенную зольность, неоднородность частиц и низкую прочность загрузки из активированного угля марки БАУ-А по сравнению с АУ марки МАУ-2А. В качестве иллюстрации на рисунке 3.9 приведены фотографии поддерживающих слоев лабораторных фильтров с загрузкой из АУ БАУ-А и КСЗ, где показан повышенный вынос АУ БАУ-А из фильтра.

По указанным выше причинам увеличение содержания АУ БАУ-А в составе комплексной сорбционной загрузки не целесообразно.

Поэтому дальнейшие исследования проводились с применением комплексной сорбционной загрузки КСЗ-1 с соотношением объемов АУ марок БАУ-А и МАУ-2А 1:1 в загрузке СФ.

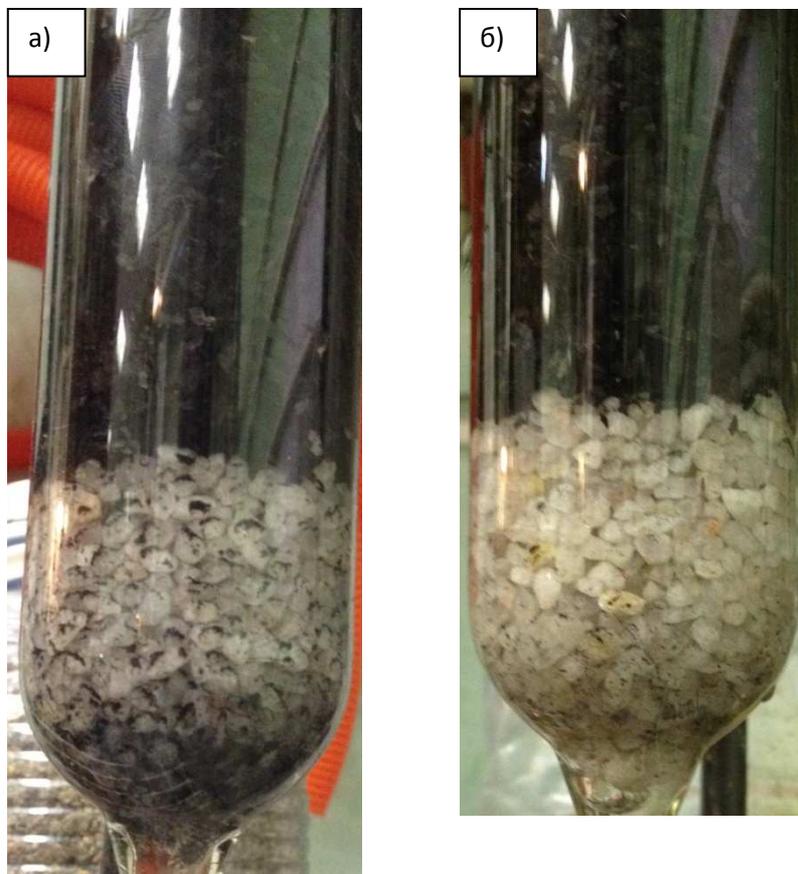


Рисунок 3.9. Вид поддерживающего слоя в фильтровальной колонке: а - с загрузкой БАУ-А, б - с загрузкой КСЗ.

### **3.3. Результаты исследований сорбционной емкости комплексной загрузки КСЗ-1 в динамических условиях.**

Цель исследований - определение изменения сорбционной емкости комплексной сорбционной загрузки КСЗ-1 в процессе работы СФ при извлечении нефтепродуктов и фенола из водного раствора этих примесей (**3-ий режим работы установки**).

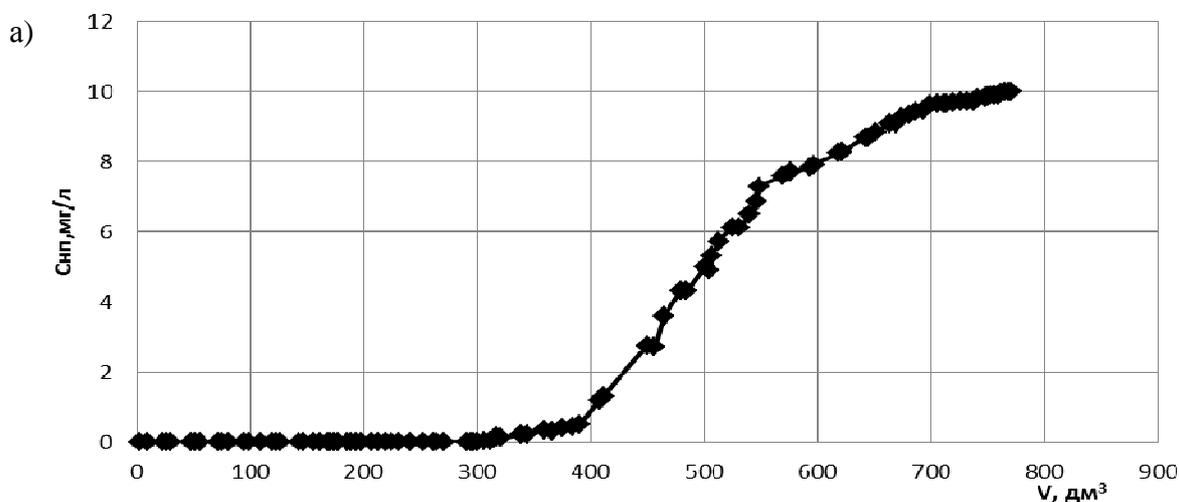
Исследования по определению динамической емкости комплексной сорбционной загрузки проводились на лабораторной установке (рис. 3.1), загруженной комплексной сорбционной загрузкой КСЗ-1.

Общий объем загрузки лабораторного сорбционного фильтра равнялся 698 см<sup>3</sup>, высота слоя загрузки  $h_a = 0,5$  м. Расход подаваемой исходной воды был в течении всего опыта постоянным и равнялся 3,0 л/ч, скорость фильтрации – 2,17 м/ч; масса загрузки составляла 168 г.

Для приготовления исходного раствора использовали дистиллированную воду и смесь легкого моторного масла и гидрохинона. Соотношение содержания нефтепродуктов и фенола в водном растворе составляло 1:1. Начальная концентрация нефтепродуктов в водном растворе – 10 мг/дм<sup>3</sup>, концентрация фенола – 10 мг/дм<sup>3</sup>.

Результаты исследований динамики сорбции нефтепродуктов и фенолов на комплексной загрузке КСЗ-1 приведены в Приложении Н. Протокол КХА представлен в Приложении Д.

Выходные кривые поглощения нефтепродуктов и фенольных соединений (3-ий режим работы установки), показаны на рисунке 3.3 (а, б).



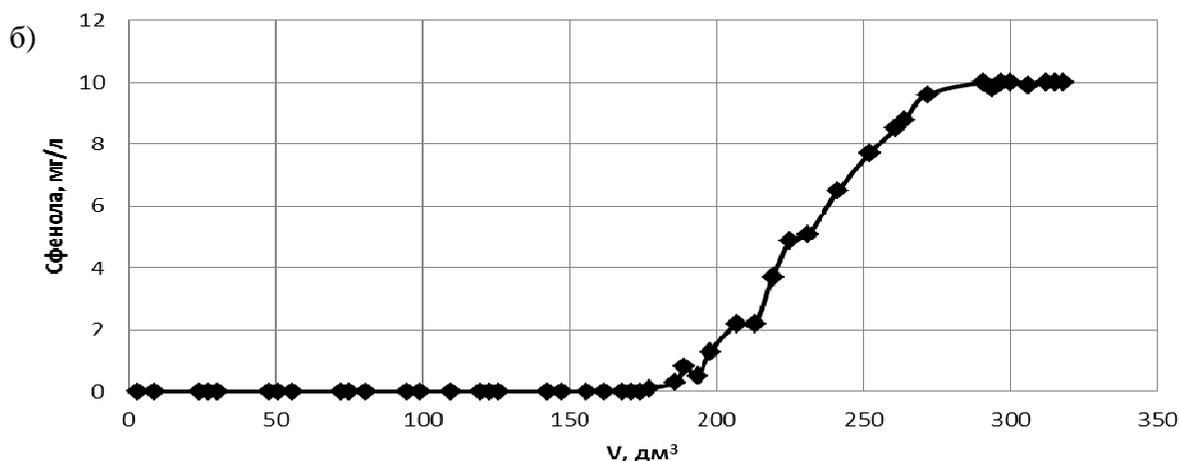


Рисунок 3.10. Выходные кривые поглощения: а) нефтепродуктов; б) фенольных соединений

Как видно из представленных данных (рисунок 3.10) полное насыщение сорбционной загрузки нефтепродуктами наступило после 255 часов работы фильтра (пропущено 765 л исходного раствора), а «проскок» нефтепродуктов наступил через 100 часов (пропущено 300 л исходного раствора). Полное насыщение сорбционной загрузки фенолами наступило после 99 часов работы фильтра (пропущено 297 л исходного раствора), а «проскок» фенолов наступил через 59 часов (пропущено 177 л исходного раствора).

В Приложении II приведены данные по изменению удельной сорбционной емкости и скорости сорбции нефтепродуктов в ходе работы СФ с комплексной загрузкой КСЗ-1 (3-ий режим работы установки). Удельная сорбционная емкость загрузки фильтра определялась как:

$$A = (C_0 - C_T) \cdot q \cdot T/M, \text{ мг/г};$$

а скорость сорбции, как:

$$r = \Delta A/\Delta T, \text{ мг/(г*мин)}$$

Изменение сорбционной емкости комплексной загрузки по нефтепродуктам во времени работы сорбционного фильтра (3-ий режим работы установки) показана на рисунке 3.11.

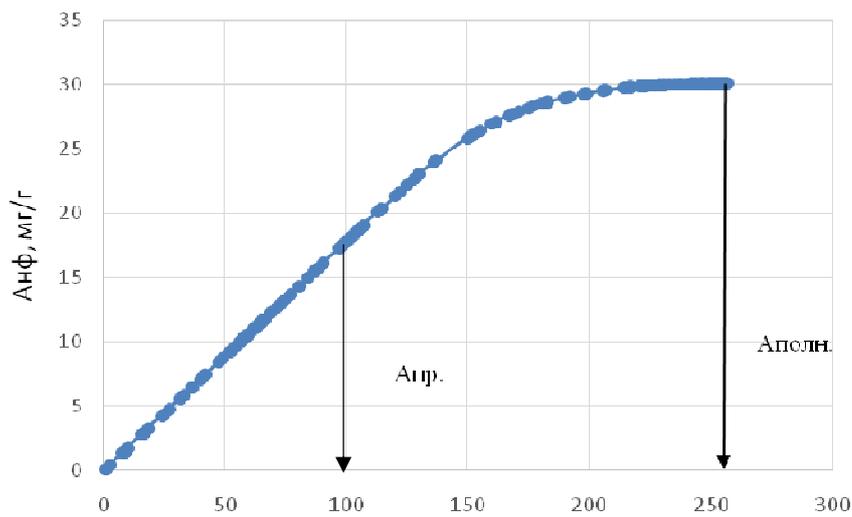


Рисунок 3.11. Зависимость динамической сорбционной емкости загрузки КСЗ-1 по нефтепродуктам от времени работы сорбционного фильтра

Там же (на рисунке 3.11) нанесены величины полной удельной динамической емкости  $\Delta_{нф}$  комплексной загрузки КСЗ-1 по нефтепродуктам, которая была равна 30,1 мг/г и удельной динамической емкости загрузки до проскока загрязнений  $\Delta_{нф}$ , равной 17,85 мг/г.

Данные об изменении удельной сорбционной емкости по фенолу и скорости сорбции фенолов комплексной загрузки КСЗ-1 во времени работы сорбционного фильтра (3-ий режим работы установки) приведены в Приложении Р и показана на рисунке 3.12.

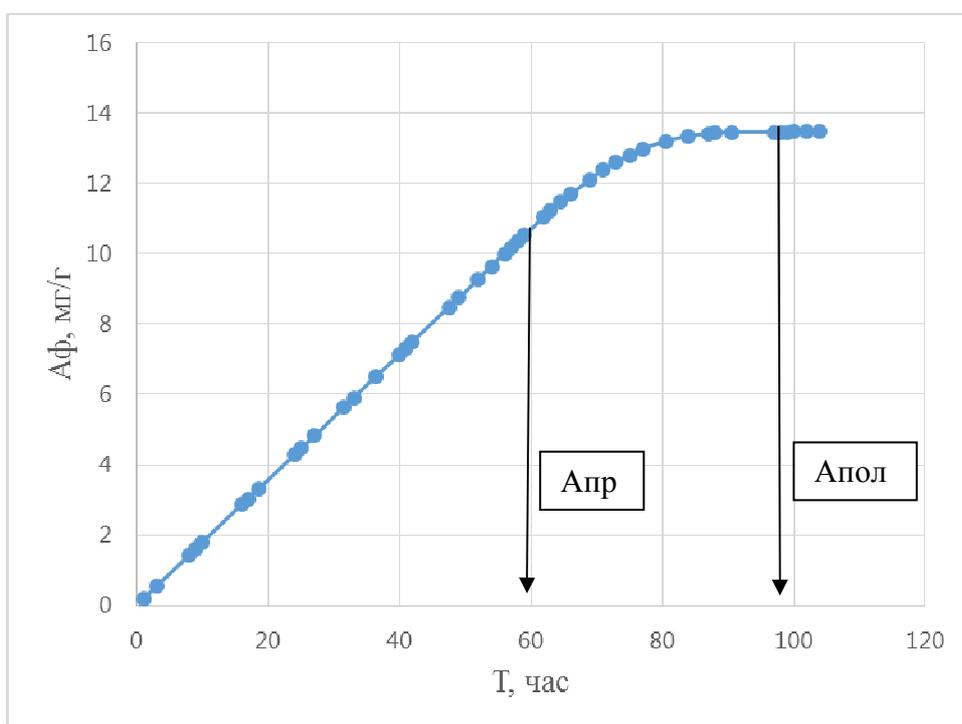


Рисунок 3.12. Зависимость динамической сорбционной емкости загрузки КСЗ-1 по фенолу от времени работы сорбционного фильтра

### **3.4. Результаты сравнительных исследований эффективности работы однородных и комплексной загрузок в динамическом режиме.**

Исследования проводились с целью сравнения эффективности работы СФ с загрузками из активированных углей МАУ-2А, БАУ-А и комплексной загрузки КСЗ-1 (двухслойная загрузка сорбционного фильтра: нижний слой – МАУ – 2А, верхний слой – БАУ–А; равных объемов) в динамическом режиме. Объем всех испытанных сорбентов принимался одинаковым и составлял - 0,692 дм<sup>3</sup>. 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.

**4-й режим** работы сорбционных колонок проводился при концентрации исходных загрязнений в модельном растворе: по нефтепродуктам – 4 мг/дм<sup>3</sup>, по фенолам - 5 мг/дм<sup>3</sup>. Скорости фильтрования варьировались в диапазоне 1,23 – 3,33 м/ч. Объем отфильтрованного модельного раствора через каждый фильтр составил 5 дм<sup>3</sup>, продолжительность работы фильтров - 123 - 125 мин.

Результаты экспериментальных исследований в 4-ом режиме работы установки приведены в Приложении С.

Масса сорбированных нефтепродуктов за время опыта на однородной загрузке из АУ марки МАУ – 2А составляла - 16,34 мг, на однородной загрузке из АУ марки БАУ – А – 16,27 мг/; и на комплексной загрузке КСЗ -1 – 16,71 мг. Масса сорбированных фенолов на всех сравниваемых загрузках была одинакова и составляла за время опыта 25 мг (Приложение С). Динамика процесса сорбции нефтепродуктов и фенолов на фильтрах с разными видами сорбционной загрузки в показаны на рисунках 3.13-3.15.

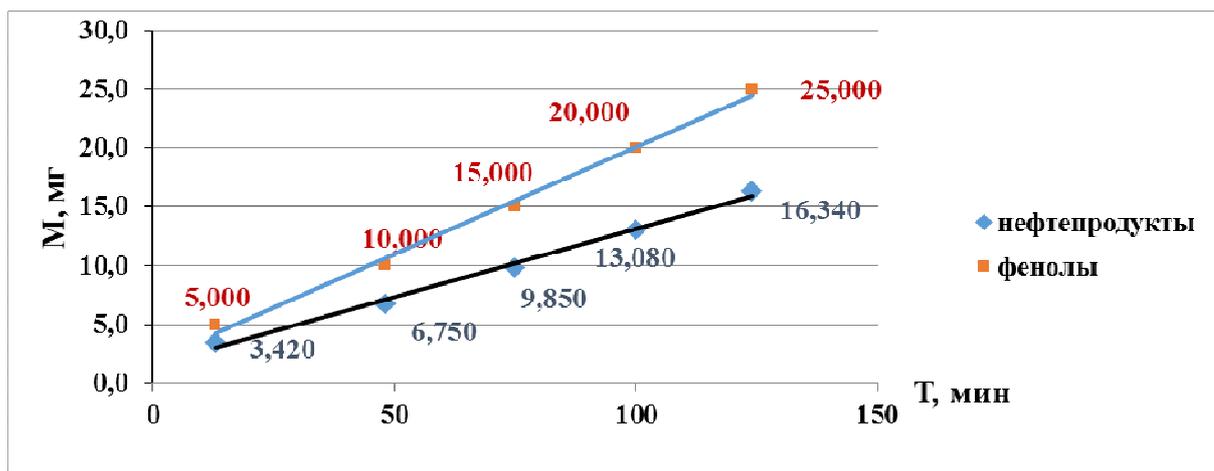


Рисунок 3.13. Изменение массы извлеченных нефтепродуктов и фенолов на однородной загрузке МАУ-2А в ходе опыта (начальная концентрация нефтепродуктов – 4,0 мг/дм<sup>3</sup>, фенолов – 5,0 мг/дм<sup>3</sup>)

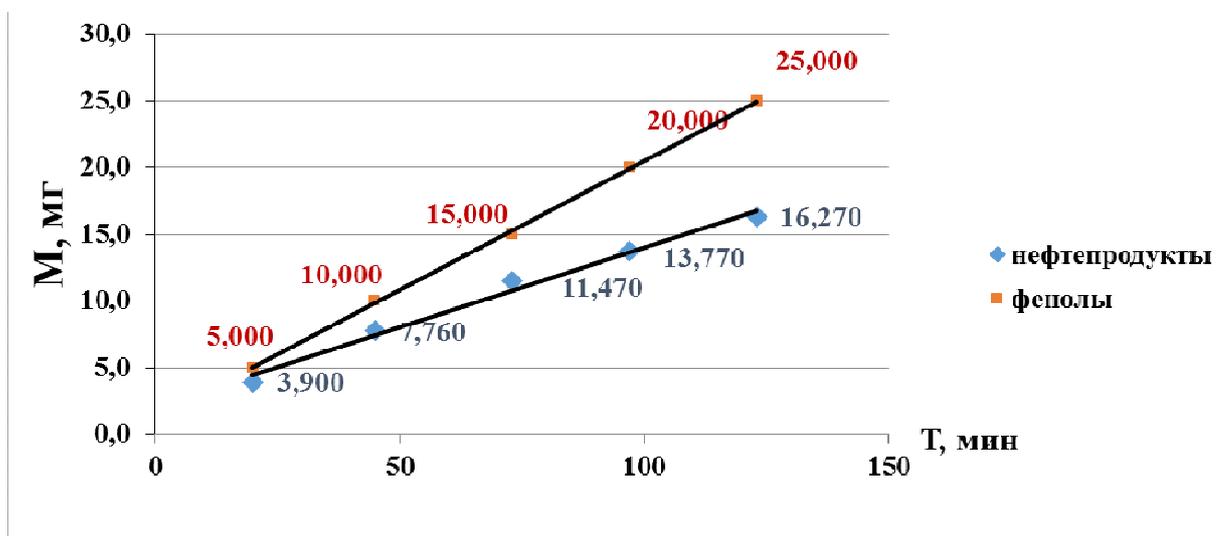


Рисунок 3.14. Изменение массы извлеченных нефтепродуктов и фенолов на однородной загрузке БАУ-А (начальная концентрация нефтепродуктов - 4,0 мг/дм<sup>3</sup>, фенолов – 5,0 мг/дм<sup>3</sup>)

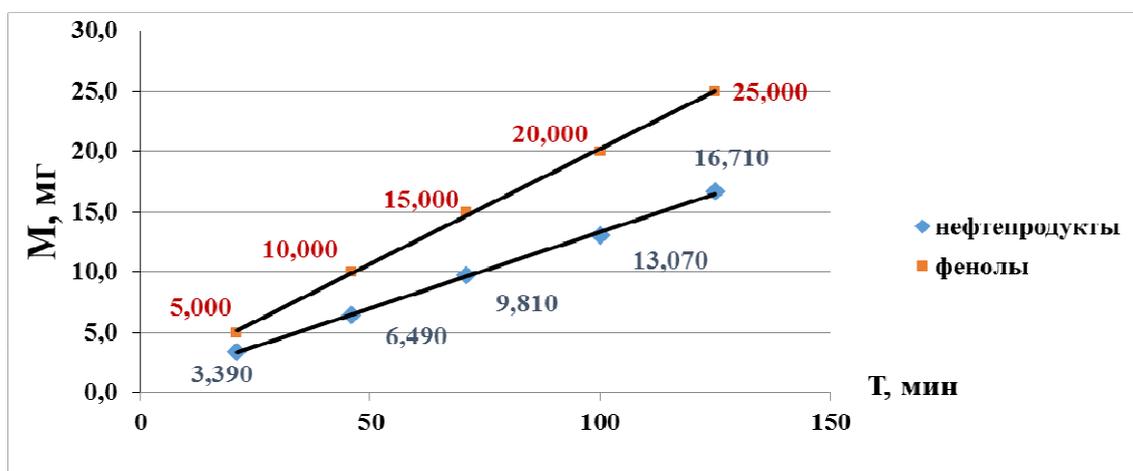


Рисунок 3.15. Изменение массы извлеченных нефтепродуктов и фенолов на комплексной загрузке КСЗ -1 (начальная концентрация нефтепродуктов - 4,0 мг/дм<sup>3</sup>, фенолов – 5,0 мг/дм<sup>3</sup>)

Как видно из этих графиков, изменение массы адсорбированных нефтепродуктов  $M_{\text{нф}}$  и фенолов  $M_{\text{ф}}$  в ходе опыта для всех видов испытанных загрузок имеет прямолинейный характер, что свидетельствует о постоянстве скорости процесса при испытанной продолжительности работы фильтра (за исключением начального участка).

Средние величины удельной скорости сорбции нефтепродуктов составляли:

- на комплексной загрузке КСЗ -1 -  $r_{\text{нф}} = 0,00084$  мг/г·мин;
- на однородной загрузке из АУ марки МАУ-2А -  $r_{\text{нф}} = 0,00081$  мг/г·мин;
- на однородной загрузке из АУ марки БАУ-А -  $r_{\text{нф}} = 0,00069$  мг/г·мин

Средняя величина удельной скорости сорбции фенолов для всех испытанных видов сорбционных загрузок была примерно одинакова и составляла  $r_{\text{н}} = 0,0013$  мг/г·мин.

Таким образом, результаты работы СФ в 4-ом режиме 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.

**5-ый режим** проводился с применением тех же видов загрузки фильтров (активированных углей МАУ-2А, БАУ-А и комплексной загрузки КСЗ -1) при более низких концентрациях загрязнений в исходной воде: нефтепродукты –  $0,38$  мг/дм<sup>3</sup>, фенолы –  $0,09$  мг/дм<sup>3</sup>. Объем сорбционной загрузки во всех фильтрах –  $0,69$  дм<sup>3</sup>. Скорости фильтрования варьировались в диапазоне  $1,00$  –  $3,27$  м/ч. Объем отфильтрованного модельного раствора через каждый фильтр составил  $9$  дм<sup>3</sup>, средний расход  $2,00$  –  $2,50$  дм<sup>3</sup>/ч, продолжительность каждого опыта - 265-300 мин.

Результаты экспериментальных исследований в этом режиме работы СФ приведены в Приложении Т.

Массы адсорбированных нефтепродуктов за период эксперимента, составили: на однородной загрузке из АУ марки МАУ-2А – 2,75 мг; марки БАУ-А - 2,22 мг; КСЗ -1 – 3,42 мг.

Динамика процесса сорбции нефтепродуктов и фенолов на фильтрах с разными видами сорбционной загрузки (5-ый режим) показаны на рисунках 3.16-3.18.

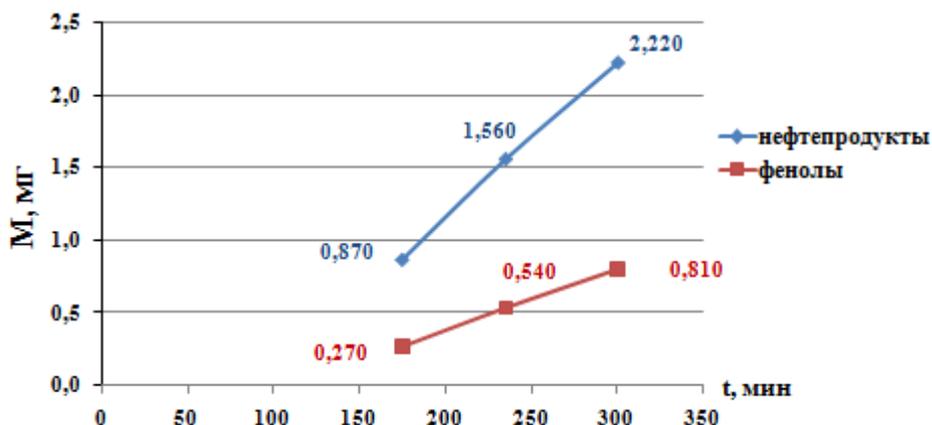


Рисунок 3. 16. Изменение массы извлеченных нефтепродуктов и фенолов на однородной загрузке БАУ-А (начальная концентрация нефтепродуктов - 0,38 мг/дм<sup>3</sup>, фенолов – 0,09 мг/дм<sup>3</sup>)

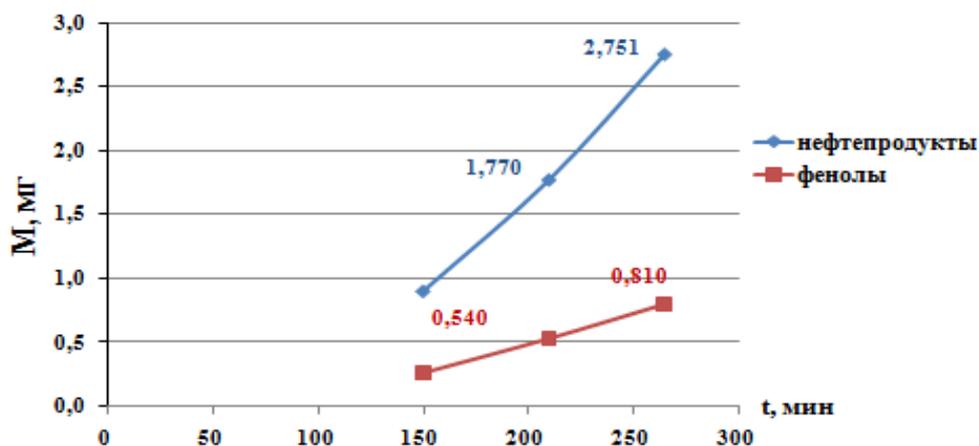


Рисунок 3. 17. Изменение массы извлеченных нефтепродуктов и фенолов на однородной загрузке МАУ-2А (начальная концентрация нефтепродуктов - 0,38 мг/дм<sup>3</sup>, фенолов – 0,09 мг/дм<sup>3</sup>)

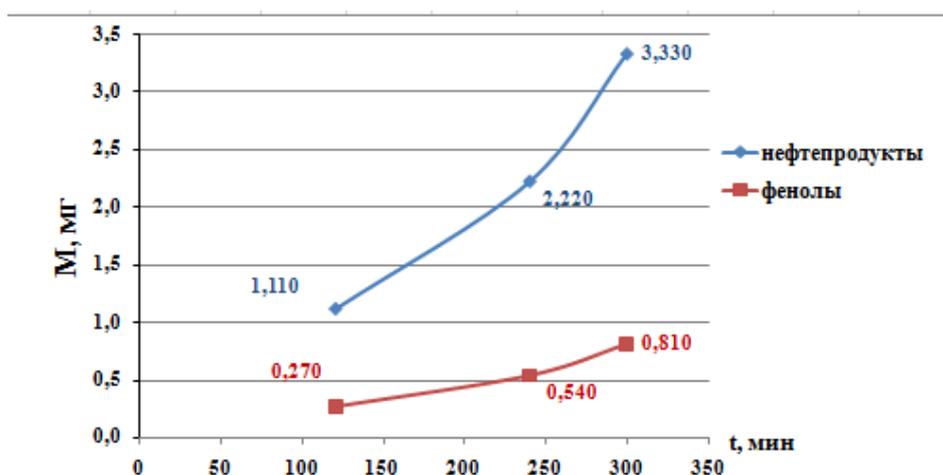


Рисунок 3. 18. Изменение массы извлеченных нефтепродуктов и фенолов на комплексной загрузке КСЗ-1 (начальная концентрация нефтепродуктов -  $0,38 \text{ мг/дм}^3$ , фенолов -  $0,09 \text{ мг/дм}^3$ )

В течении всех опытов (5-ый режим) во всех пробах очищенной жидкости концентрация нефтепродуктов оказалась ниже порога обнаружения, фенолы в пробах очищенной жидкости во всех опытах не обнаружены.

Для сравнения результатов исследований, проведенных в 4-ом и 5-ом режимах работы СФ, составлены обобщающие графики (рисунки 3.19 и 3.20), где представлены кривые сорбции нефтепродуктов на однородных загрузках (МАУ-2А, БАУ-А) и комплексной загрузке КСЗ-1 при начальной концентрации нефтепродуктов -  $4,0 \text{ мг/дм}^3$  и  $0,38 \text{ мг/дм}^3$ .

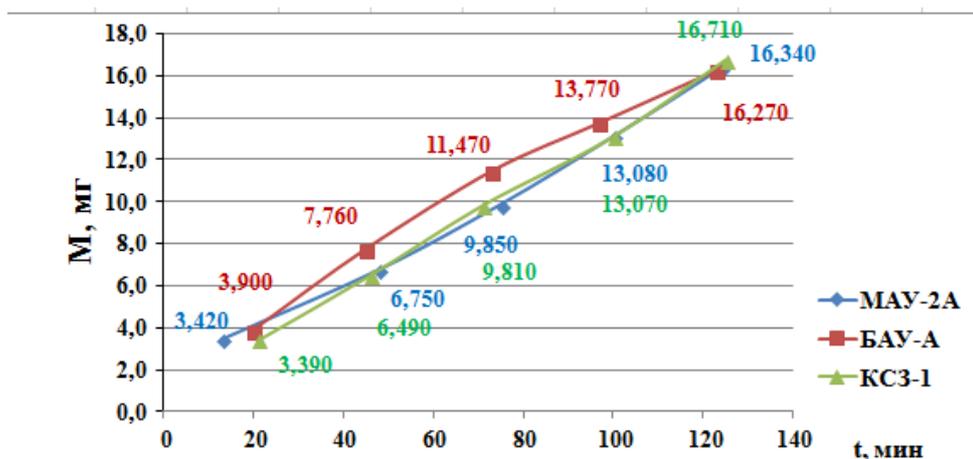


Рисунок 3. 19. Сравнение массы извлеченных нефтепродуктов на комплексной загрузке КСЗ - 1, однородных загрузках БАУ - А, МАУ - 2А (начальная концентрация нефтепродуктов -  $4,0 \text{ мг/дм}^3$ )

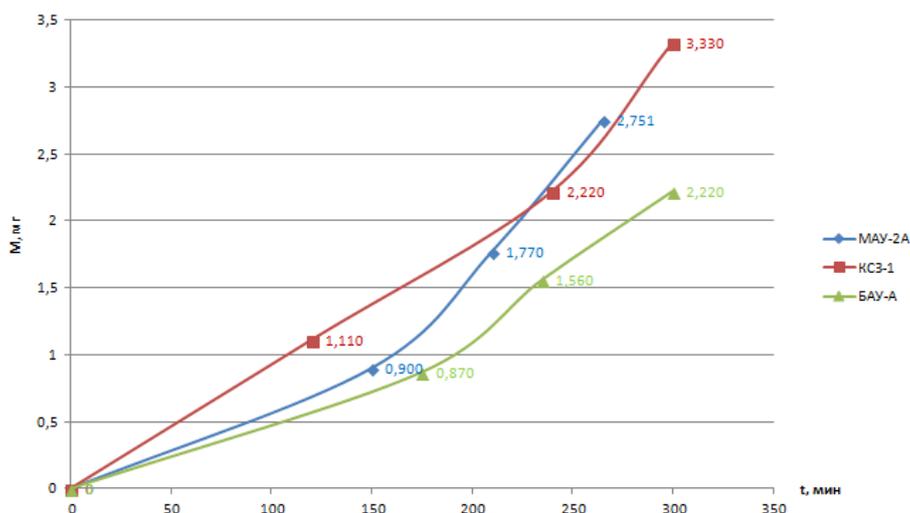


Рисунок 3.20. Сравнение массы извлеченных нефтепродуктов на однородных загрузках (МАУ-2А, БАУ-А) и комплексной загрузке КСЗ-1 (начальная концентрация нефтепродуктов - 0,38 мг/дм<sup>3</sup>)

Как видно из графиков 3.19 и 3.20 эффективность изъятия нефтепродуктов при применении комплексной загрузки КСЗ-1 при низкой начальной концентрации (до 0,4 мг/дм<sup>3</sup>) были выше, чем при применении однородных загрузок из тех же марок активированных углей. При более высокой концентрации нефтепродуктов (до 4,0 мг/дм<sup>3</sup>) эффективность работы КСЗ-1, БАУ-А и МАУ-2А результаты были примерно одинаковы.

**6 режим** работы лабораторной установки проводился при концентрации исходных загрязнений в модельном растворе: по нефтепродуктам – 0,17 мг/дм<sup>3</sup>, по фенолам – 0,023 мг/дм<sup>3</sup>. Скорости фильтрования варьировалась в диапазоне 1,23 – 3,33 м/ч. Объем отфильтрованного модельного раствора через фильтр с КСЗ-1 составил 14 л, продолжительность работы фильтров - 248 мин.

Результаты экспериментальных исследований работы фильтра с комплексной загрузкой КСЗ-1 в 6-ом режиме показаны на рисунке 3.21.

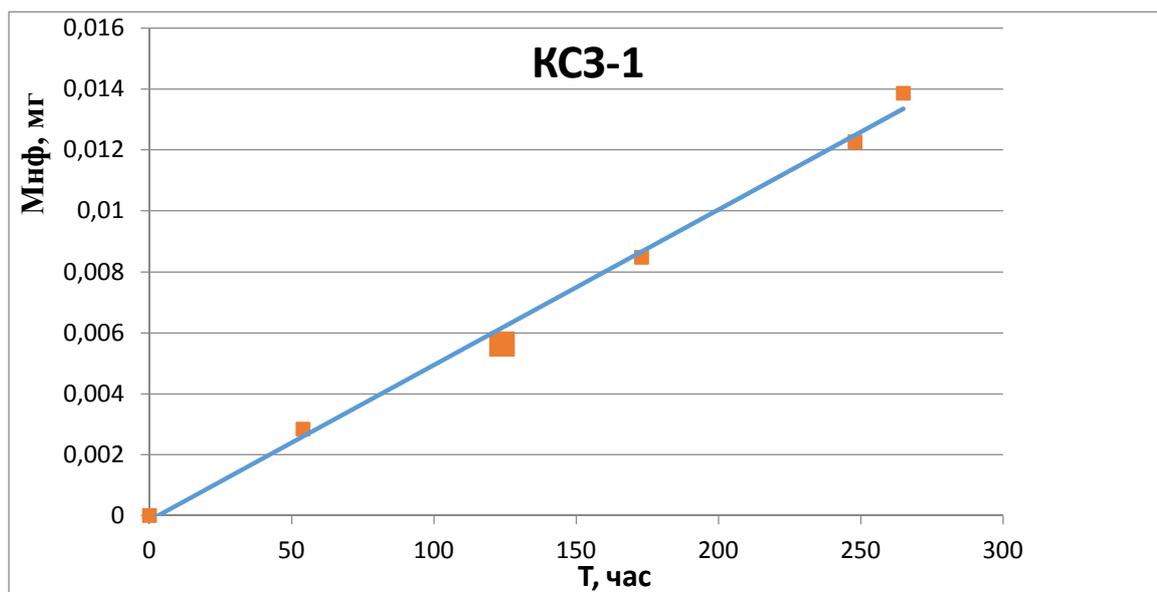


Рисунок 3.21. Изменение массы извлеченных нефтепродуктов на комплексной загрузке КСЗ-1 (6-ой режим, начальная концентрация нефтепродуктов - 0,17 мг/дм<sup>3</sup>)

Анализ результатов проведенных исследований эффективности работы сравниваемых видов сорбционных загрузок позволяет сделать следующие выводы:

- процесс сорбции нефтепродуктов в динамических условиях на комплексной загрузке КСЗ-1 протекал более эффективно по сравнению с однородными загрузками из АУ марок БАУ-А и МАУ-2А;

- соединения фенольной природы сорбировались всеми испытанными видами загрузок практически одинаково;

- сорбционная емкость всех испытанных видов загрузок по нефтепродуктам и фенолам определялась, прежде всего, начальной концентрацией загрязнений  $C_0$ .

- 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;

- изменение массы адсорбированных нефтепродуктов и фенолов в ходе опыта для всех видов испытанных загрузок имеет прямолинейный характер, что свидетельствует о постоянстве скорости процесса при испытанной продолжительности работы фильтра (за исключением начального участка).

Результаты исследований сорбционного фильтра с КСЗ-1 в динамических условиях во всех проведенных режимах приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Результаты исследований сорбционного фильтра с КСЗ-1 в динамических условиях (1-6 режимы)

Режим работы сорбционного фильтра с загрузкой КСЗ-1	Исходная концентрация нефтепродуктов $C_{о\text{нф}}$ , мг/дм <sup>3</sup>	Средняя скорость сорбции нефтепродуктов $r_{\text{нф}}$ , мг/(г*мин)	Исходная концентрация фенолов $C_{о\text{ф}}$ , мг/дм <sup>3</sup>	Средняя скорость сорбции фенолов $r_{\text{ф}}$ , 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

### 3.5. Результаты исследования по очистке дренажных вод на сорбционных фильтрах с комплексной загрузкой

Исследования проводились на одной из главных районных электростанций Сибири – Березовской ГРЭС, с целью определения эффективности применения КСЗ -1 при очистке дренажных вод, и использования этой загрузки при реконструкции очистных сооружений предприятия. Дренажные воды содержали небольшие количества различных легких моторных масел и иных нефтепродуктов. На существующих очистных сооружениях эти воды усредняются в резервуаре – отстойнике и после направляются на очистку в сорбционные модули, загруженные

макропористым АУ марки ДАК. Концентрация нефтепродуктов в дренажных водах электростанции составляла  $3,0 - 4,0 \text{ мг/дм}^3$ .

Исследования проводились в лаборатории предприятия на натуральных дренажных водах с применением однородных загрузок из АУ марок МАУ-2А и БАУ-А и с комплексной загрузки КСЗ-1. Схема собранной лабораторной установки приведена на рисунке 3.22.

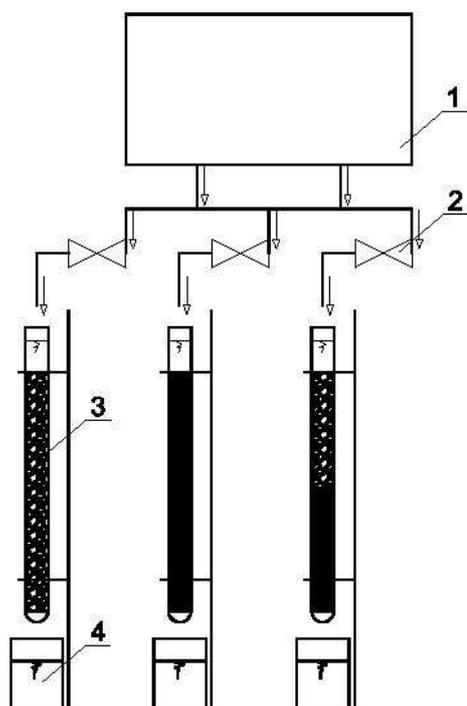


Рисунок 3.22. Схема и внешний вид лабораторной установки СФ с различные загрузки: 1 – резервуар из полиэтилена; 2 – зажимы; 3 – фильтровальная колонка; 4 – стакан для отбора проб

Концентрация нефтепродуктов в дренажных стоках составила  $3,7 \text{ мг/дм}^3$ . Объем сорбционной загрузки в колонках с однородными загрузками: МАУ-2А –  $0,34 \text{ дм}^3$ ; БАУ-А –  $0,25 \text{ дм}^3$ ; с комплексной КСЗ-1 -  $0,28 \text{ дм}^3$ , скорости фильтрования варьировались в диапазоне  $2,28 - 5,7 \text{ м/ч}$ . Объем отфильтрованного модельного раствора через каждый фильтр составил  $10 \text{ дм}^3$ , продолжительность каждого опыта – 109 - 130 мин.

Результаты опыта приведены в Приложении У.

Динамика процесса сорбции нефтепродуктов за время эксперимента на фильтровальных колонках с различными видами сорбционных загрузок показаны на рисунке 3.24. Как видно из полученных данных (рисунок 3.23) масса адсорбированных нефтепродуктов при  $T=109$  мин КСЗ -1 – 34,95 мг; БАУ – 30 мг, МАУ – 28,7 мг.

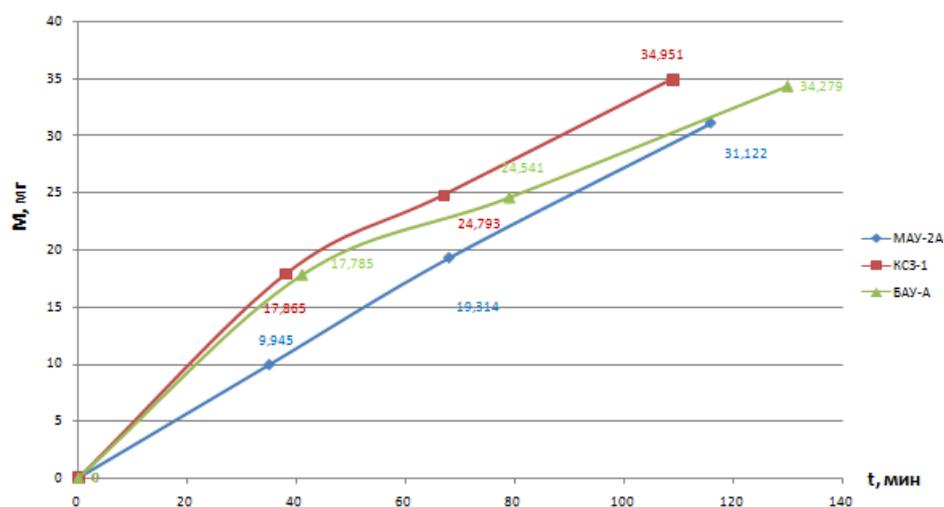


Рисунок 3. 23. Сравнение массы извлеченных нефтепродуктов на загрузках: МАУ-2А, БАУ-А, КСЗ-1 (дренажные воды, начальная концентрация нефтепродуктов – 3,74 мг/дм<sup>3</sup>)

Таким образом, результаты исследования по очистке натуральных нефтесодержащих (дренажных) вод на сорбционных фильтрах с различными видами сорбционных загрузок подтвердили результаты ранее проведенных опытов на модельных растворах и показали, что комплексная загрузка КСЗ-1 имела более высокую сорбционную емкость, чем однородные загрузки из АУ марок МАУ-2А и БАУ – А.

### Выводы по третьей главе

1. Сравнительные исследования комплексных загрузок с разным соотношением объемов АУ марок БАУ-А и МАУ-2А в динамических условиях 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  $C_0$ , а соединения фенольной природы сорбировались всеми испытанными видами комплексных

загрузок практически одинаково. Предпочтение имеет комплексная загрузка КСЗ-1 с меньшим объемом АУ марки БАУ (в сравнении с загрузками КСЗ-3 и КСЗ-4), ввиду повышенной зольности, неоднородности частиц и низкой прочности этого сорбента по сравнению с АУ марки МАУ-2А.

2. При исследовании динамической сорбционной емкости СФ с комплексной загрузкой КСЗ-1 установлено, что в процессе его работы имеются две зоны: 1-ая зона, где скорость изъятия загрязнений постоянна и не зависит от продолжительности работы фильтра; во 2-ой зоне скорость сорбции постепенно снижалась 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.

3. Результаты сравнительных исследований эффективности работы однородных и комплексной загрузок в динамическом режиме 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.

4. Проведенными экспериментальными исследованиями динамики сорбции на однородных загрузках из АУ марок БАУ-А и МАУ-2А, и комплексных загрузках КСЗ установлено, что сорбционная емкость всех испытанных видов загрузок по нефтепродуктам и фенолам определялась, прежде всего, начальной концентрацией загрязнений  $C_0$ .

5. Результаты исследования по очистке натуральных нефтесодержащих (дренажных) вод на сорбционных фильтрах с различными видами сорбционных загрузок подтвердили результаты ранее проведенных опытов на модельных растворах и показали, что комплексная загрузка КСЗ-1 имела более высокую сорбционную емкость, чем однородные загрузки из АУ марок МАУ-2А и БАУ – А.

## ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОРБЦИОННЫХ ФИЛЬТРОВ

### 4.1. Характеристика структуры потока жидкости в сорбционных фильтрах

Структура потока жидкости в сорбционных фильтрах оказывает существенное влияние на эффективность его работы. Она определяет характер прохождения потока через слой загрузки, скорость переноса загрязнений к зернам загрузки, продолжительность пребывания отдельных элементов жидкости в сооружении. Гидравлические свойства сорбционных фильтров зависят как от конструктивных, так и от технологических параметров (свойств загрузки, скорости фильтрования, вида распределительных и сборных устройств жидкости), что должно находить отражение при анализе опытных данных и расчете фильтров. Экспериментальное получение таких зависимостей затруднено неустановившимся характером движения и неравномерностью распределения жидкости, сложностью прямого измерения скоростей в тонких слоях протекающей по загрузке жидкости. Определение фактических скоростей потока жидкости в загрузке фильтра представляется технически сложным, также сложным является и обработка полей скоростей по объему сооружения, учитывая неоднородность потока, наличия локальных течений.

Как правило, при экспериментальных исследованиях и на практике не учитывают влияние пристеночного эффекта [76, 77] выполняя ряд требований:

- внутренний диаметр колонки либо СФ должен в 8 - 10 раз превышать диаметр зерен сорбента;
- отношение диаметра колонки к высоте равно или менее  $1/20$ ;
- оптимальная высота загрузки фильтра - не менее 0,5 м.

На практике для анализа структуры потока в сооружениях со сложной гидродинамикой, обычно определяют лишь отдельные обобщающие его

характеристики, которые относительно просто поддаются измерению. Математическое описание структуры потока основывается на упрощенных или условных моделях с учетом экспериментально полученных обобщающих характеристиках. Наиболее распространенными моделями такого рода являются гидродинамические модели идеального вытеснения, идеального смешения, диффузионные одно- и двух- параметрические модели, модель последовательно соединенных идеальных смесителей (ячеечная) [78-80]. Математическое описание этих моделей базируется на уравнении материального баланса и уравнениях, аналогичных описанию процесса диффузии.

Режим идеального смешения соответствует системе с сосредоточенными параметрами, описание этой модели выражается:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{Q}{W}(C_0 - C) \quad (4.1)$$

Для режима идеального вытеснения, соответствующего системе с рассредоточенными параметрами, уравнение модели имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4.2)$$

Диффузионная модель представляет систему с рассредоточенными параметрами, в которой дополнительно учитывается продольное и поперечное перемешивание потока. Уравнение однопараметрической диффузионной модели (с продольным перемешиванием) имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} \quad (4.3)$$

а уравнение двухпараметрической диффузионной модели (с продольным и поперечным перемешиванием):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V_x \frac{\partial C}{\partial x} + D_R \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left[ R \left( \frac{\partial C}{\partial R} \right) \right] \quad (4.4)$$

В модели последовательно соединенных смесителей степень перемешивания потока условно выражена через число ячеек идеального смешения  $m$ .

В таблице 4.1 приведены некоторые типы моделей структуры потока и соответствующие им дифференциальные функции распределения элементов потока по времени их пребывания в сооружении, являющиеся частным решением представленных выше уравнений (4.1-4.2). Более подробно этот вопрос рассмотрен в ряде специальных работ по гидродинамике [81-83].

Адекватность той или иной гидродинамической модели реальной структуре потока в сооружении устанавливается анализом данных о распределении времени пребывания отдельных элементов жидкости в этом сооружении. Эти данные получают экспериментально, путем трассирования потока инертным веществом, либо внесением в систему гидродинамического возмущения [81, 82], (в частности, теоретические функции распределения, представленные в таблице 4.1 получены для импульсного ввода трассера на входе в систему).

Практика показывает, что в насадочных аппаратах перемешивание потока в макромасштабе весьма существенно. Это обуславливает значительную неравномерность распределения времени пребывания элементов жидкости в этих сооружениях. Степень перемешивания потока зависит от особенностей конструкции аппарата и его масштаба. Обычно в фильтрах продольное перемешивание значительно превышает перемешивание в радиальном направлении. Например, для сплошного потока через слой зернистой загрузки коэффициент продольного перемешивания примерно в 5,5 раз больше коэффициента поперечного рассеивания потока [84]. Таким образом, для описания структуры потока в сорбционных фильтрах достоверными гидродинамическими моделями могут служить однопараметрическая диффузионная и ячеечная модели. Диффузионная модель отвечает гауссовскому распределению вероятности и может использоваться при невысокой степени перемешивания. Ячеечная модель в большей степени

соответствует распределению Пуассона и применима при значительном рассеивании потока.

Таблица 4.1. Типы гидродинамических моделей и соответствующие им дифференциальные функции распределения вещества

№ п/п	Гидродинамическая модель	Дифференциальная функция распределения	Принятые обозначения
1	Идеальный вытеснитель	$\frac{C}{C_0} \rightarrow 1, \theta = 1$ $\frac{C}{C_0} = 1, \theta \rightarrow 1$	$C_0 = \frac{G_{ин0} \cdot \Delta t}{Q}, \Delta t \rightarrow 0$ $\theta = \frac{t}{\tau_{cp}}$
2.	Вытеснитель с застойной зоной	$\frac{C}{C_0} \rightarrow 1, \theta = (1 - \alpha)$ $\frac{C}{C_0} = 0, \theta \neq (1 - \alpha)$	$\tau_{cp} = \frac{L}{V}$ $\alpha = \frac{W_{з.з.}}{W}$
3	Вытеснитель с байпасированием потока	$\frac{C}{C_0} \rightarrow \beta, \theta = 0$ $\frac{C}{C_0} \rightarrow (1 - \beta), \theta = \frac{1}{(1 - \beta)}$ $\frac{C}{C_0} = 0, \theta \neq 0, \theta \neq \frac{1}{(1 - \beta)}$	$\beta = \frac{Q_{байп}}{Q}$
4	Однопараметрическая диффузионная модель	$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2\sqrt{\pi\theta D_L / VL}} \exp\left[-\frac{(1 - \theta)^2}{4\theta D_L / VL}\right]$	
5	Идеальный смеситель	$\frac{C}{C_0} = e^{-\theta}$	$\theta = \frac{t}{\tau_{cp}}$ $\tau_{cp} = \frac{W}{Q}$
6	Смеситель с застойной зоной	$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{(1 - \beta)} e^{-\theta / (1 - \alpha)}$	$\alpha = \frac{W_{з.з.}}{W}$
7	Смеситель с байпасированием потока	$\frac{C}{C_0} = (1 - \beta)^2 \cdot e^{-(1 - \beta)\theta}$	$\beta = \frac{Q_{байп}}{Q}$
8	Смеситель с застойной зоной и байпасом	$\frac{C}{C_0} = \frac{(1 - \beta)^2}{(1 - \alpha)} e^{-(1 - \beta)\theta / (1 - \alpha)}$	
9	Ячеечная	$\frac{C}{C_0} = \frac{m^m \cdot \theta^{m-1} \cdot e^{-m\theta}}{(m-1)!}$	$W_1 = W_2 = W_3 = \dots$

Параметры указанных моделей определяются при анализе экспериментальных кривых распределения, в частности, среднее время пребывания соответствует центральному моменту 1-го порядка, а степень перемешивания, выраженная

коэффициентами  $D_x$  (для диффузионной модели) и  $m$  (для ячеечной модели), связана с центральным моментом второго порядка.

В отдельных случаях, для идентификации кривых распределения, определяют также моменты 3-го порядка (характеризующие асимметрию кривой), и 4-го порядка (характеризующие очертания вершины кривой) [81, 83].

Анализ кривых распределения с целью выбора типа модели может быть произведен с помощью функции интенсивности, отражающей меру вероятности выхода частицы из сооружения в пределах определенного интервала времени [83].

При импульсном возмущении потока функция интенсивности  $\Phi_{и}$  имеет вид:

$$\Phi_{и}(t) = -\frac{\partial}{\partial t} \ln\left[\tau_{ср} \left(1 - \int_0^{\theta} C \cdot \partial\theta\right)\right] \quad (4.5)$$

Функция интенсивности позволяет, определить не только вид гидравлической модели, но также установить наличие в реальном сооружении застойных зон, байпасов и циркуляционных локальных потоков.

При выборе типа модели предпочтение следует отдавать тем, которые в большей мере отвечают физическому смыслу происходящих явлений. С этих позиций для фильтров нельзя, например, признать пригодными модели с обратным перемешиванием, предусматривающие возможность движения жидкости в направлении противоположном основному потоку.

Для фильтров, в общем случае, характерно отсутствие стабильного движения жидкости через загрузку. При подобном характере потока обычно определяют лишь отдельные его характеристики, которые относительно просто поддаются измерению и достаточно полно отражают влияние структуры потока на протекание массообменных и химических процессов. В качестве таких характеристик при анализе структуры потока жидкости в фильтрах приняты: продолжительность пребывания жидкости в загрузке, средняя скорость ее движения, степень перемешивания потока и некоторые другие.

Фактическое время пребывания жидкости в загрузке фильтра является одним из основных гидродинамических параметров, характеризующих структуру потока жидкости, скорости массообменных процессов, определяющих эффективность работы сооружения в целом.

Для экспериментального определения продолжительности пребывания жидкости в загрузке фильтра применяют метод трассирования проходящего через загрузку потока жидкости определенными индикаторами.

В качестве трассера используют инертные вещества, в частности, хлориды (поваренная соль). При использовании в качестве трассера хлоридов, получены удовлетворительные результаты по балансу вещества [85, 86]. Эти вещества, легко определяемые аналитически, и были, затем, использованы в исследованиях.

#### **4.2. Программа и методика проведения исследований**

Для проведения исследований в качестве трассера выбран хлорид (поваренная соль). Для определения концентрации вещества на выходе собрана лабораторная установка на базе кондуктометра портативного HANNA HI 8733 (рисунок 4.1).

Методика определения продолжительности пребывания жидкости в различных аппаратах с применением трассера подробно изложена в ряде работ [80, 81, 83, 87]. В данном случае исследование структуры потока осуществлялось путем импульсного ввода трассера на входе в фильтр; отклик на внесенное возмущение фиксировался по концентрации трассера на выходе потока жидкости из загрузки.

Исходная концентрация хлорида в трассирующем растворе составила 110000 мг/дм<sup>3</sup>, объем разового (импульсного) ввода раствора – 5 мл, эксперимент проведен при скоростях фильтрования 0,87 - 3,02 м/ч. Высота загрузки КСЗ фильтра 470 мм, объем загрузки фильтра 0,65 дм<sup>3</sup>. Изменения содержания хлоридов в воде определялось кондуктометрическим методом, по изменению электропроводности воды, определяемой с помощью портативного – кондуктометра HANNA HI 8733.

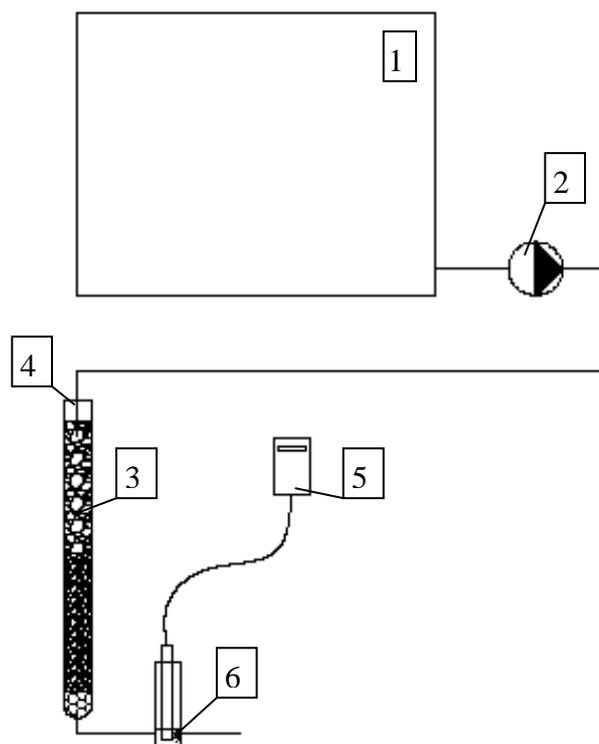


Рисунок 4. 1 Схема и внешний вид лабораторной установки: 1 – резервуар с дистиллированной водой; 2 – насос АНП-10М; 3 – фильтровальная колонка с КСЗ; 4 – точка ввода раствора хлорида; 5- кондуктометр портативный HANNA HI 8733; 6 – проточная колонка.

### 4.3. Результаты исследований структуры потока жидкости в сорбционных фильтрах

Результаты проведенных экспериментов, полученных на лабораторной установке сорбционного фильтра при разных скоростях фильтрования и при импульсном возмущении (введении трассера) приведены в Приложении Ф. Эти данные показывают характер распределения времени пребывания жидкости в загрузке фильтра. Для более наглядного сравнения различных кривых отклика, экспериментальные данные по изменению концентрации хлоридов в выходящей их фильтра жидкости представлены в виде относительного показателя  $\frac{C_t}{C_{\max}}$ , где  $C_t$  и  $C_{\max}$  – соответственно, текущая и максимальная концентрации хлоридов.

По полученным результатам построены кривые отклика для каждой скорости фильтрования, показанные на рисунке 4.2.

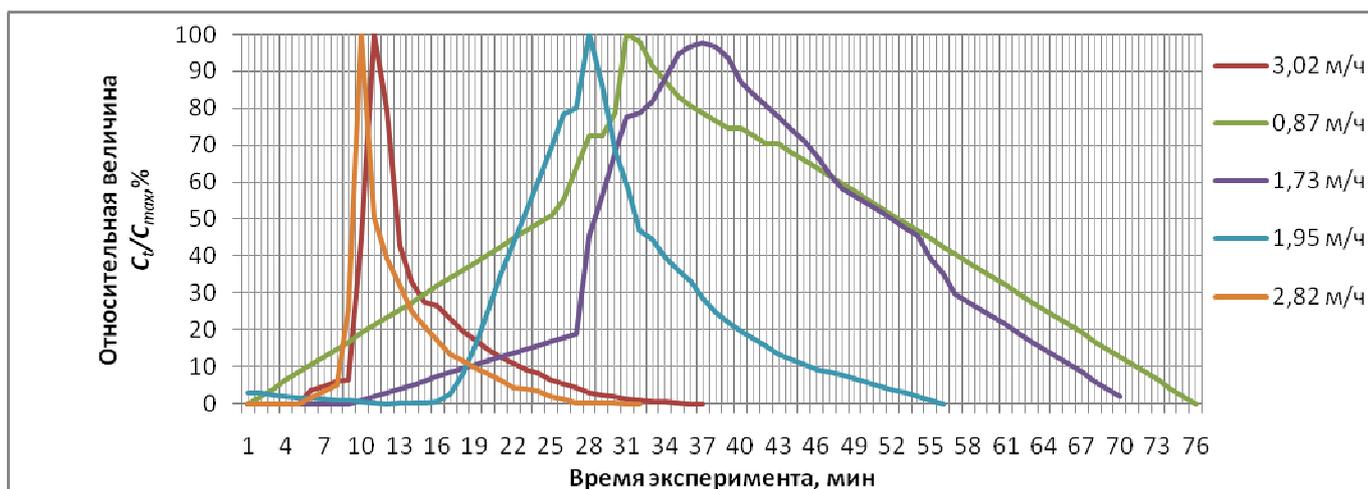


Рисунок 4.2. Кривые распределения времени пребывания жидкости в сорбционном фильтре при скоростях фильтрования: а – 0,87 м/ч; б - 1,73 м/ч; в – 1,95 м/ч; г – 2,82 м/ч; д – 3,02 м/ч; е – сводный график.

Среднее время пребывания жидкости в загрузке фильтра по полученным кривым распределения определялось как:

$$\tau_{cp} = \frac{\int_0^{\infty} t f(t) \cdot dt}{\int_0^{\infty} f(t) \cdot dt} \quad (4.6)$$

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:

$$\sigma_t^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \tau_{cp})^2 \cdot f(t) \cdot dt}{\int_0^{\infty} f(t) \cdot dt} \quad (4.7)$$

или в безразмерном виде

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_t^2}{\tau_{cp}^2} \quad (4.8)$$

Характер экспериментальных кривых распределения времени пребывания жидкости в загрузке, (рисунок 4.2), показывает, что для описания структуры потока жидкости в сорбционных фильтрах можно применить диффузионную или ячеечную

модели. Распределение вещества для однопараметрической диффузионной модели потока имеет вид (4.9) [85]:

$$\frac{C_t}{C_{\max}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{D_L}{VL}\right)^2 + 1} - \frac{D_L}{VL}}{\sqrt{t/\tau}} \exp\left(-1 - \frac{t}{\tau} - 2\sqrt{\left(\frac{D_L}{VL}\right)^2 + 1} \frac{t}{\tau}\right) \frac{D_L}{VL} \quad (4.9)$$

В ячеечной модели распределение вещества в потоке описывается (4.10) [85]:

$$\frac{C_t}{C_{\max}} = \left[\frac{m \cdot t/\tau}{m-1}\right]^{m-1} \exp\left(m-1 - m \cdot \frac{t}{\tau}\right) \quad (4.10)$$

В табл. 4.2 приведены значения параметров  $\tau_{\text{ср}}$ ,  $\sigma_t^2$ ,  $\sigma^2$ , определенные при обработке экспериментальных данных по уравнениям (4.6) – (4.8).

Таблица 4.2 Значения  $\tau_{\text{ср}}$ ,  $\sigma_t^2$ ,  $\sigma^2$  для установки сорбционного фильтра

№ п/п	Скорость фильтрации, м/ч	$\tau_{\text{ср}}$ , мин	$(\sigma_t)^2$	$\sigma^2$
1	0,87	41,60134	490,86	0,283624
2	1,73	34,66565	408,9556	0,340312
3	1,95	21,84634	305,6056	0,64033
4	2,82	12,10779	101,9781	0,695628
5	3,02	14,00708	202,4562	1,031896

Учитывая, что  $m=1$  - идеальный смеситель, а  $m = \infty$  - идеальный вытеснитель, между ними и расположена ячеечная модель.

### Выводы по четвертой главе

1. Структура потока жидкости в сорбционных фильтрах определяет характер прохождения потока через слой загрузки, продолжительность пребывания отдельных элементов жидкости в сооружении, скорость переноса загрязнений к зернам загрузки, и оказывает существенное влияние на эффективность его работы. Гидравлические свойства сорбционных фильтров зависят как от конструктивных, так и от технологических параметров (свойств загрузки, скорости фильтрования, вида распределительных и сборных устройств жидкости), что должно находить отражение при анализе опытных данных и расчете фильтров.

2. На практике для описания структуры потока в фильтрах используются упрощенные модели с учетом экспериментально полученных обобщающих характеристик. Наиболее распространенными моделями такого рода являются гидродинамические модели идеального вытеснения, идеального смешения, диффузионные одно- и двух- параметрические модели, модель последовательно соединенных идеальных смесителей (ячеечная).

3. Адекватность гидродинамической модели реальной структуре потока в сооружении устанавливается анализом экспериментальных данных о распределении времени пребывания отдельных элементов жидкости в этом сооружении.

4. Результаты проведенных опытов по трассированию потока жидкости, проходящей через загрузку фильтра, показали, что в нем имеет место весьма существенное перемешивание потока, поэтому для описания его структуры в сорбционных фильтрах могут служить диффузионная и ячейчатая модели.

5. Полученные данные позволили, определить величины средней продолжительности пребывания жидкости в загрузке сорбционного фильтра, а также дисперсии распределения продолжительности пребывания отдельных элементов жидкости в загрузке фильтра, которые служат характеристикой степени перемешивания потока. Полученные результаты опубликованы в рецензируемом издании [88].

## ГЛАВА 5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ СОРБЦИИ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ НА КОМПЛЕКСНОЙ СОРБЦИОННОЙ ЗАГРУЗКЕ

### 5.1. Математическое описание структуры потока жидкости в сорбционных фильтрах

Полученные экспериментальные данные по изучению гидродинамических свойств сорбционного фильтра (глава 4) позволили, определить величину среднего времени пребывания жидкости в загрузке фильтра  $\tau_{cp}$ , в зависимости от скорости фильтрования. Характер этой зависимости приведен на рисунке 5.1.

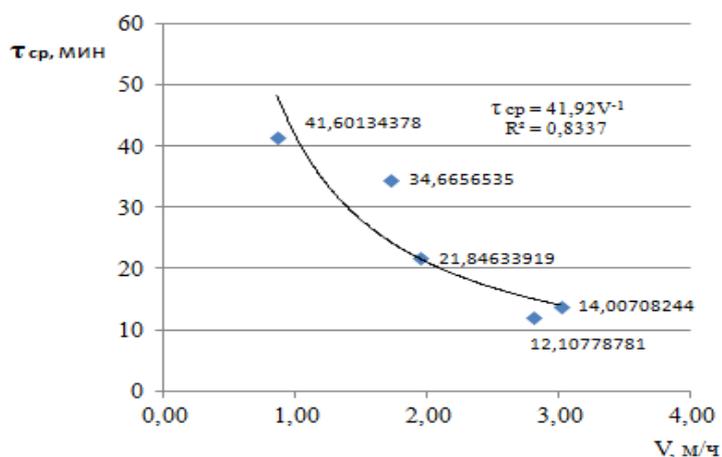


Рисунок 5.1. Зависимость среднего времени пребывания жидкости в загрузке фильтра  $\tau_{cp}$ , от скорости фильтрования  $V$

При анализе кривых распределения трассера по времени в выходящем потоке было установлено [85, 86], что среднее время пребывания жидкости в загрузке фильтров практически прямо пропорционально ее высоте. Неизменность гидродинамических параметров от высоты загрузки в насадочных аппаратах подтверждается и литературными данными [78, 89, 90].

Математическая обработка представленных данных (рисунок 5.1) позволила, установить следующую связь между средней продолжительностью пребывания

жидкости в загрузке  $\tau_{cp}$  для сорбционных фильтров малой производительности в зависимости от скорости фильтрации (в пределах до 4 м/ч) в виде (5.1):

$$\tau_{cp} = 83,8 \cdot H \cdot V^{-0,992}, \text{ мин.} \quad (5.1),$$

Интенсивность перемешивания жидкости в загрузке фильтре зависит от конструкции аппарата, вида загрузки, скорости фильтрования, способа подачи и распределения жидкости. Степень перемешивания жидкости в сооружении оценивается коэффициентом продольного перемешивания  $D$ , или критерием Пекле, связь между которыми установлена выражением (5.2) [85]:

$$Pe = \frac{v \cdot l}{D}, \quad (5.2)$$

где:  $D$  - коэффициент продольного перемешивания.

Для различных типов аппаратов установлены зависимости между критерием Пекле и дисперсией распределения  $\sigma^2$  [85].

В частности, для "закрытых" резервуаров, т.е. сооружений, где трассер смешивается со всем потоком поступающей жидкости на входе, а отклики на возмущение фиксируются также в общем потоке на выходе из сооружения, эта зависимость имеет вид:

$$\sigma^2 = \frac{2}{Pe} - 2 \left( \frac{1}{Pe} \right)^2 \cdot (1 - e^{-Pe}) \quad (5.3)$$

По условиям проведения вышеупомянутых опытов методом трассирования потока (глава4), фильтры с сорбционной загрузкой представляли собой "закрытые" аппараты. Пользуясь выражением (5.3) по экспериментально полученным данным были определены значения критерия  $Pe$  (таблица 5.1).

Таблица 5.1. Значения критерия  $Pe$ 

№ п/п	Скорость фильтрации, м/ч	$\tau_{cp}$ , мин	$\sigma^2$	Величина критерия $Pe$	Величина $D/vl$
1	0,87	41,60	0,28	7,14	0,14
2	1,73	34,66	0,34	5,88	0,17
3	1,95	21,85	0,64	3,02	0,33
4	2,82	12,11	0,69	2,96	0,34
5	3,02	14,01	1,00	1,94	0,52

Для выбора модели структуры потока жидкости в фильтре проведен анализ формул (3.8) и (3.9) [85, 86]. Результаты расчетов показали, что диффузионная модель дает несколько худшую корреляцию с экспериментальными данными, чем ячеечная. Причем погрешность в первом случае возрастает с увеличением скорости фильтрования. Таким образом, в качестве математической модели структуры потока жидкости в сорбционных фильтрах может быть выбрана ячеечная модель.

Экспериментально найденные значения  $\sigma^2, D_L/VL = 1/Pe$  для модели сорбционного фильтра с загрузки из АУ приведены в главе 4.2. Используя эти данные можно также определить значения  $m$  для ячеечной модели:

$$m = \frac{Pe^2}{2[Pe - 1 + e^{-Pe}]} \quad (5.4.)$$

Результаты расчетов приведены в таблице 5.2 и на рисунке 5.2.

Таблица 5.2. Значения числа ячеек  $m$  сорбционного фильтра с КСЗ-1

№ п/п	Скорость фильтрации, м/ч	$\sigma^2$	$\tau_{cp}$ , мин	$m$
1	0,87	0,28	41,60	4,15
2	1,73	0,34	34,66	3,54
3	1,95	0,64	21,85	2,24
4	2,82	0,69	12,11	2,14
5	3,02	1,00	14,01	1,73

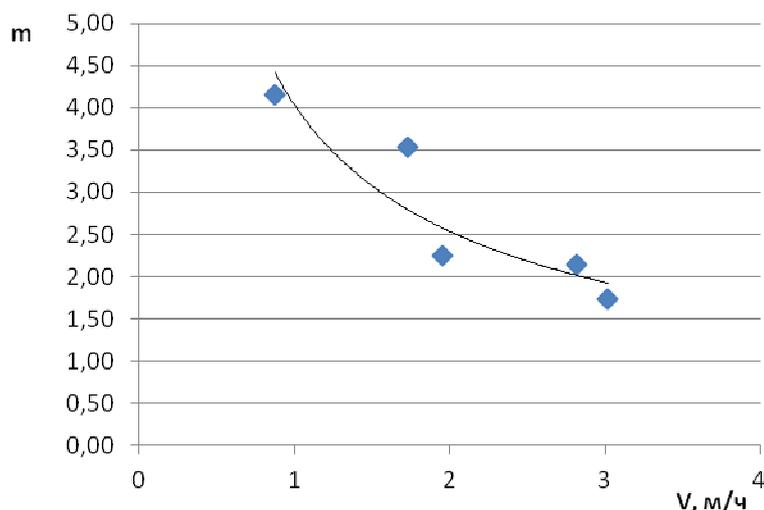


Рисунок 5.2. Зависимость параметра  $m$  ячеечной модели сорбционного фильтра от скорости фильтрации  $V$

Анализ полученных данных позволил, получить корреляционное уравнение для определения параметра  $m$  ячеечной модели сорбционного фильтра от скорости фильтрации  $V$ :

$$m = 4,0 \cdot V^{0,67} \quad (5.5),$$

а учитывая уравнение (5.1), можно получить зависимость между параметра  $m$ , средним временем пребывания жидкости в фильтре  $\tau_{cp}$ , и высотой  $H$  (5.6):

$$m = 4 \cdot (83,8 \cdot H / \tau_{cp})^{-0,67} \quad (5.6),$$

где  $\tau_{cp}$  - средним временем пребывания жидкости в фильтре, в мин.

## 5.2. Математическое описание изменений сорбционной емкости комплексной загрузки в статических и динамических условиях.

Обработка результатов исследований процесса сорбции нефтепродуктов и фенолов в статических и динамических условиях на однородных и на комплексной загрузках (глава 2) показала следующее.

Изотермы сорбции растворенных нефтепродуктов и фенольных соединений, полученные в результате экспериментов (глава 2) по принятой классификации [49, 50, 62] можно отнести к разному типу изотерм. Так изотермы изъятия

нефтепродуктов относятся к изотермам  $L$  - типа по классификации Гильса, или к I – му типу по классификации БЭТ, (рисунки 2.1, 2.5 и 2.9), а изотермы изъятия фенолов - к изотермам  $S$ - типа по классификации Гильса, или к III – му типу по классификации БЭТ (рисунки 2.3, 2.7 и 2,10). Подобные изотермы были получены при сорбционной очистке воды и другими исследователями [63-65].

Целесообразно рассмотреть полученные данные в областях небольших остаточных концентраций загрязнений  $C_p$ , которые представляют особый интерес при сорбционной очистке воды. С этой целью проведена статистическая обработка экспериментальных данных процесса сорбции в статических условиях (глава 2). В результате получены следующие зависимости сорбционной емкости комплексной загрузки КСЗ-1 от величины  $C_p$  в начальных областях изотерм сорбции (5.7-5.12).

По нефтепродуктам:

в области до  $C_p=3,0$  мг/дм<sup>3</sup> (1-я серия опытов при  $C_{исх\ неф}= 148$  мг/ дм<sup>3</sup>)

$$A_{неф} = 24,29 \cdot e^{0,523 \cdot C_p} \quad (5.7)$$

в области до  $C_p=10$  мг/ дм<sup>3</sup> (3-я серия опытов при  $C_{исх\ неф}= 100$  мг/ дм<sup>3</sup>)

$$A_{неф} = 22,64 \cdot C_p \quad (5.8)$$

в области до  $C_p=9,7$  мг/ дм<sup>3</sup> (3-я серия опытов при  $C_{исх\ неф}= 10$  мг/ дм<sup>3</sup>)

$$A_{неф} = 3,86 \cdot C_p \quad (5.9)$$

По фенолам:

в области до  $C_p=3,0$  мг/ дм<sup>3</sup> (1-я серия опытов при  $C_{исх\ ф}= 948$  мг/ дм<sup>3</sup>)

$$A_{ф} = 29,08 \cdot C_p^{0,43} \quad (5.10)$$

в области до  $C_p=3,0$  мг/ дм<sup>3</sup> (2-я серия опытов при  $C_{исх\ ф}= 100$  мг/ дм<sup>3</sup>)

$$A_{ф} = 9,56 \cdot C_p^{0,306} \quad (5.11)$$

в области до  $C_p=9,7$  мг/ дм<sup>3</sup> (3-я серия опытов при  $C_{исх\ ф}= 10$  мг/ дм<sup>3</sup>)

$$A_{ф} = 0,0625 \cdot C_p \quad (5.12)$$

Как видно из этих эмпирических уравнений (5.7) - (5.12), часть из них (уравнения 5.8, 5.10 и 5.11) достаточно хорошо описывает процесс изъятия

нефтепродуктов и фенолов на комплексной загрузке КСЗ-1 (в начальных областях изотерм сорбции в статических условиях) уравнением вида:

$$A = k \cdot C^n \quad (5.13)$$

схожим по форме с уравнением Фрейндлиха, а часть полученных уравнений (5.8, 5.12) вида:

$$A = k \cdot C \quad (5.14)$$

Соответствует уравнению Генри [37].

Следует отметить, что вид изотерм сорбции, вид эмпирических уравнений зависимости сорбционной способности КСЗ-1 в значительной степени зависит не только от вида загрязнений, но и от их концентрации. Сравнение экспериментальных данных по полной статической сорбционной емкости комплексной загрузки КСЗ, полученных в статических условиях (1, 2 и 3-ем циклах опытов, глава 2), показало, что СУС зависит от начальной концентрации вещества в растворе  $C_{исх}$  (таблица 5.3).

Таблица 5.3. Полная статическая сорбционная емкость СУС комплексной загрузки КСЗ

Цикл опытов	Исходная концентрация нефтепродуктов $C_{исх}$ , мг/ дм <sup>3</sup>	СУС <sub>нп</sub> по нефтепродуктам, мг/г	Исходная концентрация фенолов $C_{исх}$ , мг/ дм <sup>3</sup>	СУС <sub>ф</sub> по фенолу, мг/г
1	148	304	948	683
2	100	294	100	129
3	10	58	10	21

На рисунке 5.3 показана зависимость полной статической сорбционной емкости СУС комплексной загрузки КСЗ по нефтепродуктам от начальной концентрации загрязнений, а на рисунке 5.4 – зависимость СУС по фенольным соединениям от  $C_{исх}$ .

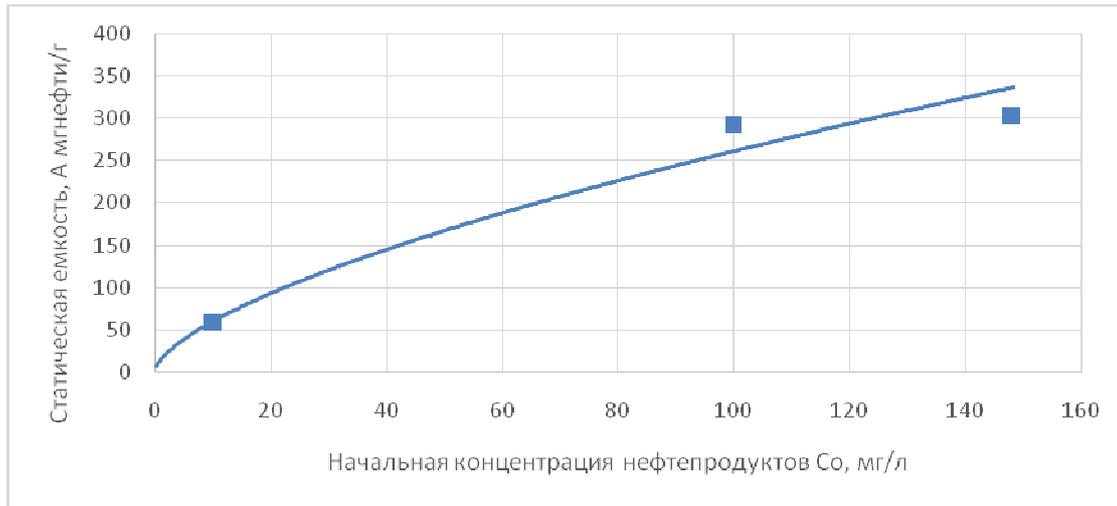


Рисунок 5.3. Зависимость полной статической сорбционной емкости СУС комплексной загрузки КСЗ по нефтепродуктам от начальной концентрации загрязнений  $C_{исх}$

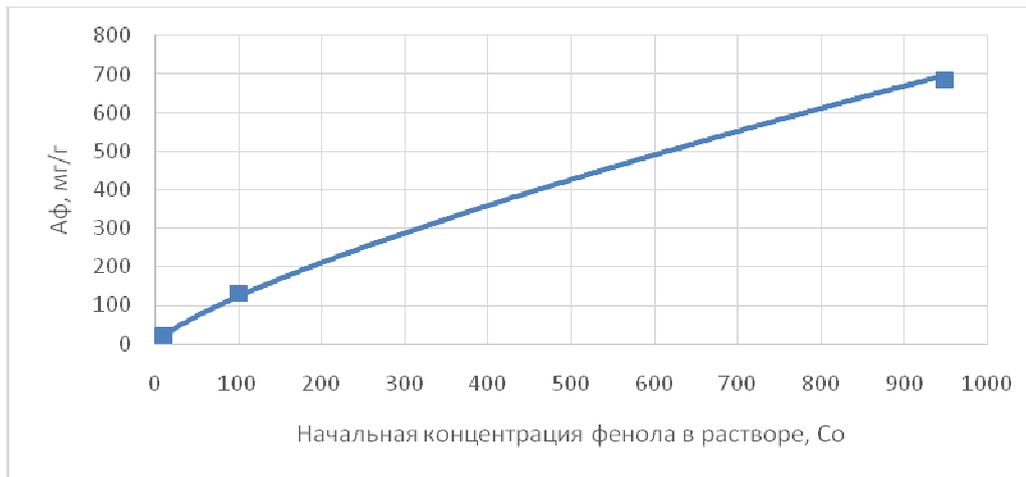


Рисунок 5.4 Зависимость полной статической сорбционной емкости СУС комплексной загрузки КСЗ по фенолу от начальной концентрации загрязнений  $C_{исх}$

Обработкой данных таблицы 5.3 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 5.15 и 5.16):

$$СУС_{нф} = 13,33 \cdot C_0^{0,646} \quad (5.15)$$

$$СУС_{\phi} = 3,67 \cdot C_0^{0,76} \quad (5.16)$$

Обработкой экспериментальных данных сорбционной емкости в динамических условиях (раздел 3.3) 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 5.5 (а - по нефтепродуктам, б – по фенолам).

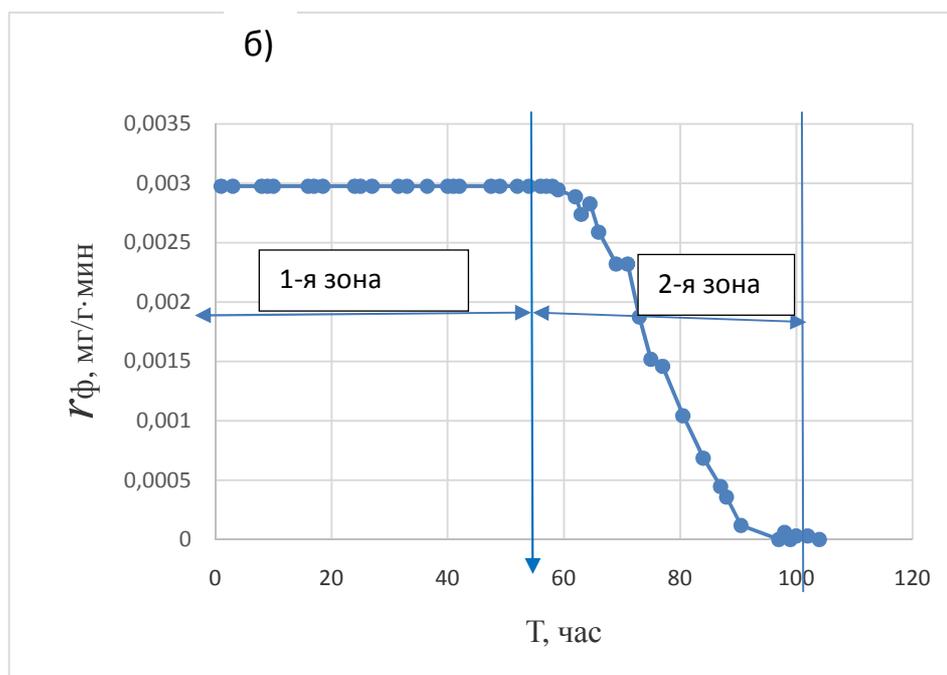
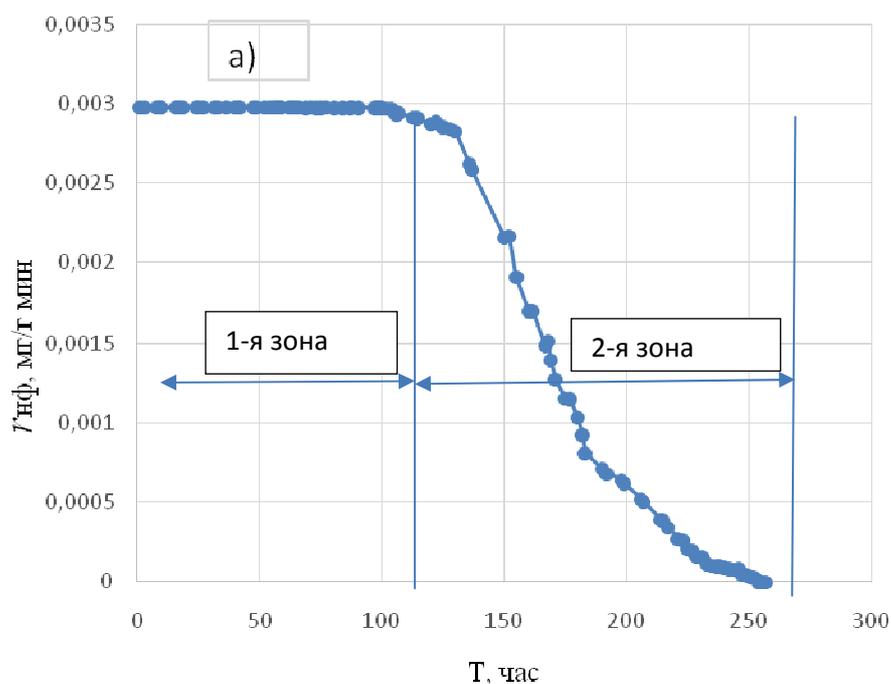


Рисунок 5.5. Изменение скорости сорбции: а) нефтепродуктов; б) фенолов во времени на комплексной загрузке КСЗ-1

Как видно из рисунка 5.5 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.

Скорость изъятия загрязнений на фильтре с сорбционной загрузкой КСЗ-1 при начальной концентрации нефтепродуктов и фенолов  $10 \text{ мг/дм}^3$  в 1-ой зоне составляла:

- по нефтепродуктам -  $r_{\text{нф}} = 0,00298 \text{ мг/г} \cdot \text{мин}$ , или  $0,179 \text{ мг/г} \cdot \text{час}$ .

- по фенолам -  $r_{\text{ф}} = 0,00298 \text{ мг/г} \cdot \text{мин}$ , или  $0,179 \text{ мг/г} \cdot \text{час}$ .

Результаты исследований по определению динамической емкости комплексной сорбционной загрузки КСЗ-1 из раствора нефтепродуктов и фенолов (с концентрацией  $10 \text{ мг/дм}^3$  и  $10 \text{ мг/дм}^3$ ) сведены в таблицу 5.4.

Таблица 5.4. 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 [91, 92] по нефтепродуктам 0,05-0,1 мг/дм<sup>3</sup> и по фенолам – 0,001 мг/дм<sup>3</sup>, 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 5.3 и 5.4) при одинаковых начальных концентрациях загрязнений в растворе, позволяет установить следующие соотношения между ними (уравнения 5.17-5.20):

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

- по нефтепродуктам:

$$\text{ДУС}_{\text{нф}} = 0,519 \cdot \text{СУС}_{\text{нф}} \quad (5.17)$$

- по фенолам:

$$\text{ДУС}_{\text{ф}} = 0,641 \cdot \text{СУС}_{\text{ф}} \quad (5.18)$$

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

- по нефтепродуктам

$$\text{РДУС}_{\text{нф}} = 0,575 \cdot \text{ДУС}_{\text{нф}} \quad (5.19)$$

- по фенолам

$$\text{РДУС}_{\text{ф}} = 0,73 \cdot \text{ДУС}_{\text{ф}} \quad (5.20)$$

### **5.3. Математическое описание скорости сорбции нефтепродуктов и фенолов на комплексной сорбционной загрузке.**

Обработка экспериментальных данных о скорости сорбции нефтепродуктов и фенолов на комплексной загрузке КСЗ-1, полученных в динамических условиях

(глава 3, таблица 3.1), позволила получить зависимости скорости сорбции от исходной концентрации загрязнений. На рисунке 5.6 показана зависимость между скоростью сорбции нефтепродуктов от исходной их концентрации в растворе при разных режимах работы СФ, на рисунке 5.7 - зависимость между скоростью сорбции фенолов от исходной их концентрации в растворе.

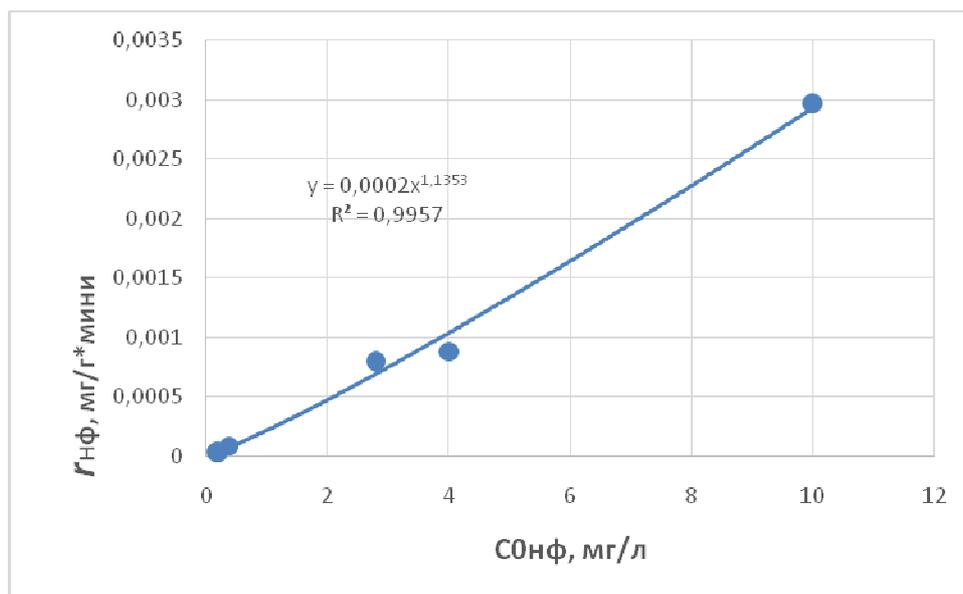


Рисунок 5.6. Зависимость между скоростью сорбции нефтепродуктов от исходной их концентрации в растворе

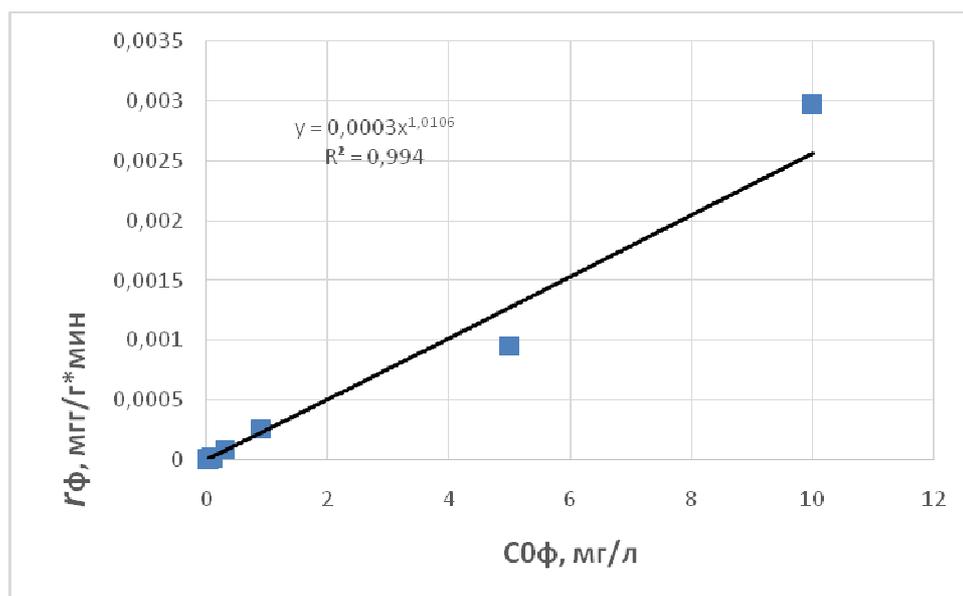


Рисунок 5.7. Зависимость между скоростью сорбции фенолов от исходной их концентрации в растворе

Статистической обработкой данных, представленных в таблице 3.14 получены эмпирические уравнения зависимости величины скорости сорбции нефтепродуктов и фенолов от исходной концентрации загрязнений на комплексной загрузке КСЗ-1 для 1-ой зоне изотермы сорбции (рисунок 5.5) в виде уравнений (5.21) и (5.22):

- скорость сорбции нефтепродуктов

$$r_{\text{нф}} = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot C_{\text{о нф}}^{1,1353} \quad (5.21)$$

- скорость сорбции фенолов:

$$r_{\text{ф}} = 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot C_{\text{о ф}}^{1,0106} \quad (5.22)$$

Во 2-ой зоне изотермы сорбции, как видно из рисунка 5.5, скорость изъятия загрязнений меняется во времени, постепенно снижаясь от максимальной скорости (равной скорости изъятия загрязнений в 1-ой зоне, где она постоянна) до нуля при полном исчерпании емкости сорбента.

Обработкой экспериментальных данных, представленных в 3 главе (таблица 3.5), получены эмпирические уравнения, отражающие изменение скорости сорбции нефтепродуктов и фенолов на комплексной загрузке КСЗ-1 во 2-ой зоне изотерм сорбции, в виде (5.23) и (5.24):

- по нефтепродуктам:

$$r_{\text{т}}/r_{\text{max}} = 1 - 0,0023 \cdot (T - T_1)/\tau_{\text{ср}} \quad (5.23)$$

- по фенолам:

$$r_{\text{т}}/r_{\text{max}} = 1 - 0,0094 \cdot (T - T_1)/\tau_{\text{ср}} \quad (5.24)$$

где:  $r_{\text{т}}$ ,  $r_{\text{max}}$  – скорость сорбции, соответственно, в 1-ой и 2-ой зонах изотермы сорбции загрязнений на комплексной загрузке КСЗ-1, мг/г·мин;

$T$ ,  $T_1$  – продолжительность работы сорбционного фильтра, соответственно, общая и в 1-ой зоне изотермы сорбции, час;

#### **5.4. Технологические схемы очистки поверхностных и подземных природных вод на МУВ с применением КСЗ.**

При подготовке воды питьевого качества из водоемов, подверженных значительному антропогенному загрязнению, на мобильных установках перед сорбционными фильтрами с КСЗ необходимо предусмотреть блоки предварительной обработки воды и обеззараживания, которые выбираются в зависимости от состава и свойств исходной воды. Предварительная очистка исходной воды должна обеспечить поступление на сорбционные фильтры не более  $3,0 \text{ мг/дм}^3$  нефтепродуктов. Кроме того, выбор блоков предварительной обработки воды зависит от вида и производительности мобильной установки.

Ниже приведены рекомендуемые технологические схемы для установок различной производительности:

- носимые СФ малой производительности до  $0,3 \text{ м}^3/\text{ч}$  (рисунок 5.8);
- переносные установки средней производительности до  $10,0 \text{ м}^3/\text{ч}$  (рисунок 5.9);
- мобильные установки высокой производительности более  $10,0 \text{ м}^3/\text{ч}$  (рисунок 5.9, 5.10).

Технологическая схема носимого фильтра производительностью до  $0,3 \text{ м}^3/\text{ч}$  (рисунок 5.8) включает зону коагуляции и флокуляции, сорбционный фильтр с комплексной загрузкой КСЗ-1 и зону обеззараживания. В первой зоне находится камера смешения, где располагаются таблетки коагулянта и флокулянта, а также камера хлопьеобразования, в нижней зоне размещаются таблетки с гипохлоритом натрия. Исходная вода заливается в установку, или подается ручным насосом. Эта схема водоподготовки отличается от аналогов тем, что в фильтре применена комплексная сорбционная загрузка, а также тем, что камеры смешения, флокуляции и обеззараживания устраиваются отдельными. Это позволяет увеличить сорбционную емкость и срок службы загрузки фильтра [93].

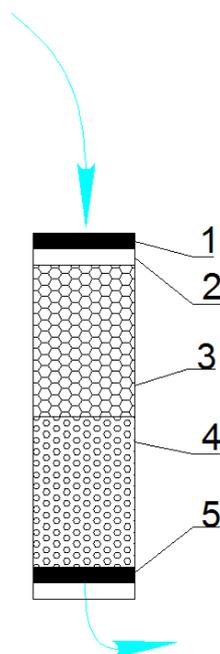


Рисунок 5.8. Технологическая схема установки производительностью до 0,3 м<sup>3</sup>/час: 1 - таблетка с флокулянтом; 2 - блок хлопьеобразования; 3 – верхний слой СФ; 4 – нижний слой СФ; 5 - таблетка с гипохлоритом натрия

В технологической схеме переносной и мобильной установки производительностью до 10 м<sup>3</sup>/ч (рис. 5.9) предусмотрен узел реагентного хозяйства с баками рабочих растворов коагулянта и флокулянта, блоки флотации, фильтрования на скором фильтре с песчаной загрузкой, совмещенное с удалением избыточного кислорода, блоки УФ-обеззараживания с последующей сорбцией с комплексной загрузкой КСЗ-1, и обеззараживанием в виде добавления консервирующей дозы хлора в целях хранения воды или доставки её потребителю. Подача исходной воды на установку производится насосом, подача реагентов с помощью эжекторов. Масса комплекта - 50 - 100 кг, максимальные габариты - 500 × 450 × 1400 мм. При необходимости обессоливания воды можно применять отдельные обратноосмотические блоки в качестве дополнения к рекомендуемой технологической схеме.

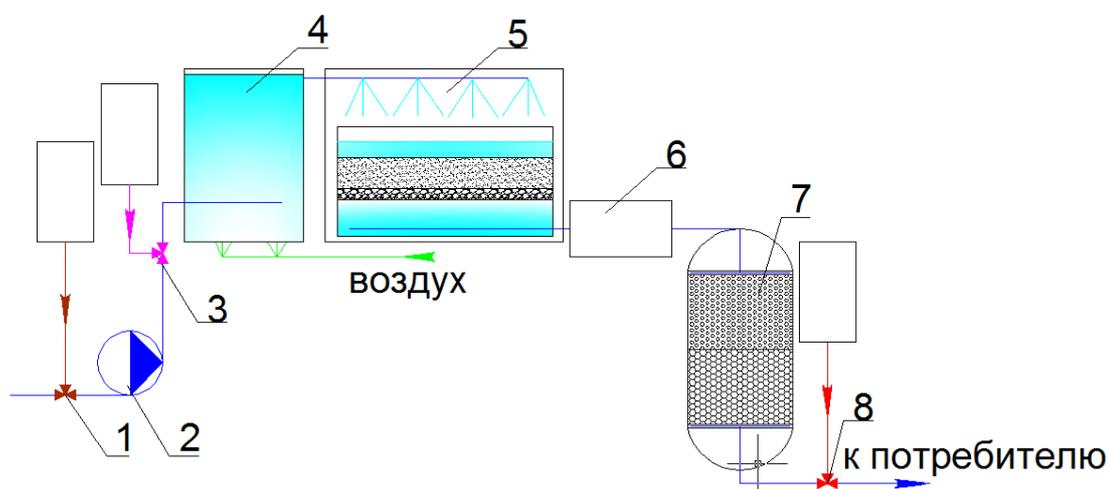


Рисунок 5.9. Технологическая схема переносной или мобильной установки производительностью до  $10,0 \text{ м}^3/\text{час}$ : 1 – эжектор подачи раствора коагулянта, 2 – насос, 3 – эжектор подачи раствора флокулянта, 4 – флотатор, 5 – скорый фильтр, 6 – блок УФ-обеззараживания, 7 – СФ с КСЗ, 8 – эжектор подачи раствора гипохлорита натрия.

При использовании естественных средств предварительной очистки можно отказаться от коагуляции с флокуляцией, в таком случае, технологическая схема МУВ (рисунок 5.10) будет включать в себя: фильтрование на скором фильтре с песчаной загрузкой, совмещенное с удалением избыточного кислорода, УФ-обеззараживание с последующей сорбцией на СФ с комплексной загрузкой, и обеззараживание в виде добавления консервирующей дозы хлора в целях хранения воды или доставки её потребителю.

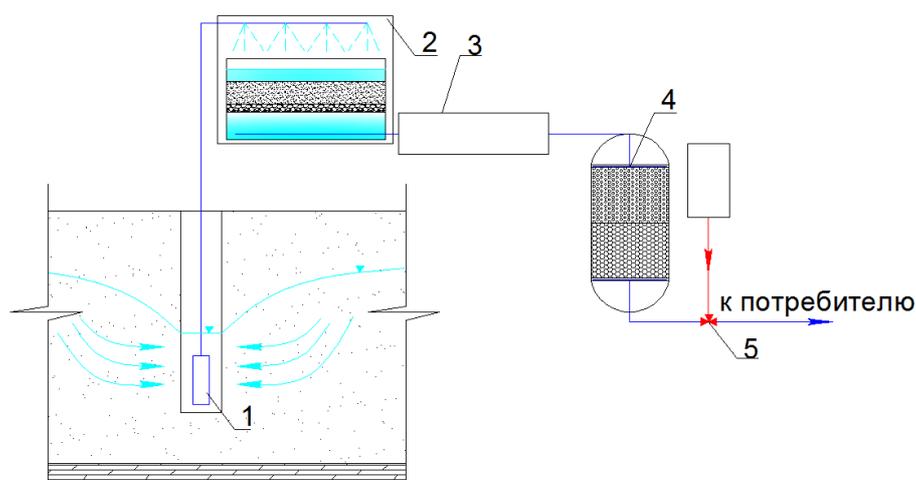


Рисунок 5.10. Технологическая схема мобильной установки производительностью более  $10 \text{ м}^3/\text{час}$  при использовании инфильтрационного водозабора: 1 – насос, смонтированный в скважине

инфильтрационного водозабора, 2 - скорый фильтр [105], 3 - блок УФ- обеззараживания, 4 - СФ с КСЗ, 5 - эжектор подачи раствора гипохлорита натрия.

Основное преимущество технологических схем с применением инфильтрационных водозаборов (рисунок 5.10) - использование безреагентных методов очистки воды при водоподготовке.

При всех положительных сторонах использования инфильтрационных водозаборов существуют следующие особенности работы [31, 33]:

- снижение производительности ввиду заиливания русла реки, возникшего в результате превышения оптимальных объемов добычи воды из скважин;

- изменение дебета скважин и качества добываемой воды в зависимости от времени года;

- проникновение гидробионтов в скважины при высоких гидравлических градиентах потоков;

- увеличение концентрации загрязнений при повышенном антропогенного воздействия на поверхностный водоем;

- увеличение концентрации железа и марганца, обусловленное природными факторами (наличием этих элементов в грунте и подземных водах), также жесткости и др.

Для решения вышеперечисленных проблем, прежде всего, необходимо определить все факторы, влияющие на процессы естественной предочистки. Совместное использование вышеуказанных схем и МУВ с комплексной загрузкой сорбционного фильтра позволяет, упростить технологическую схему МУВ (исключить блок предварительной физико-химической обработки воды).

### 5.5. Рекомендации по расчету и проектированию МУВ с комплексной сорбционной загрузкой

При расчете мобильных установок водоподготовки (МУВ) с комплексной сорбционной загрузкой (КСЗ) следует учитывать ряд ограничений:

- максимальная концентрация нефтепродуктов на входе в СФ: не более 3,0 мг/дм<sup>3</sup>;

максимальная концентрация фенолов на входе в СФ: не более 0,3 мг/дм<sup>3</sup>;

- максимальная скорость фильтрования - 4,0 м/ч;

- высота загрузки СФ: для носимых СФ: 0,3-0,5 м, для остальных типов: 0,5 - 2,0 м.

Вид загрузки СФ: КСЗ-1 из активированных углей марок БАУ-А и МАУ-2А, в соотношении 50% к 50% с послойным распределением внутри СФ, где верхний слой образован из макропористого АУ (БАУ-А), нижний слой из мезопористого АУ (МАУ-2А), либо их аналоги.

Расчет сорбционных фильтров с комплексной загрузкой (КСЗ-1) производится в следующей последовательности:

- в зависимости от исходной концентрации загрязнений (нефтепродуктов и фенолов) по уравнениям 5.15 и 5.16 определяются величины статической емкости комплексной загрузки КСЗ-1 - СУС;

- по уравнениям 5.17-5.20 по найденной величине СУС определяются значения полной и «рабочей» динамической сорбционной емкости ДУС и РДУС по нефтепродуктам и фенолам;

- по уравнениям 5.21 и 5.22 вычисляются скорости изъятия нефтепродуктов и фенолов в 1-ой зоне сорбции на комплексной загрузке и определяется продолжительность работы загрузки до «проскока» загрязнений  $T_1$ ;

- задаваясь значениями расхода подаваемой воды  $q$  и скоростью фильтрации  $V$  и высотой слоя загрузки  $h$ , определяют время пребывания воды в загрузке фильтра  $\tau_{\text{ср}}$ , потребную массу и объем загрузки, а также диаметр фильтра;

- по уравнениям 5.23 и 5.24 вычисляется соотношение скоростей сорбции нефтепродуктов и фенолов в 1-ой и 2-ой зонах и определяется продолжительность работы фильтра до полного исчерпания сорбционной емкости загрузки.

Блок - схема расчета продолжительности работы СФ с загрузкой КСЗ-1 по нефтепродуктам представлена на рисунке 5.11. Блок - схема расчета продолжительности работы СФ с загрузкой КСЗ-1 "до проскока" по фенолам представлена на рисунке 5.12.

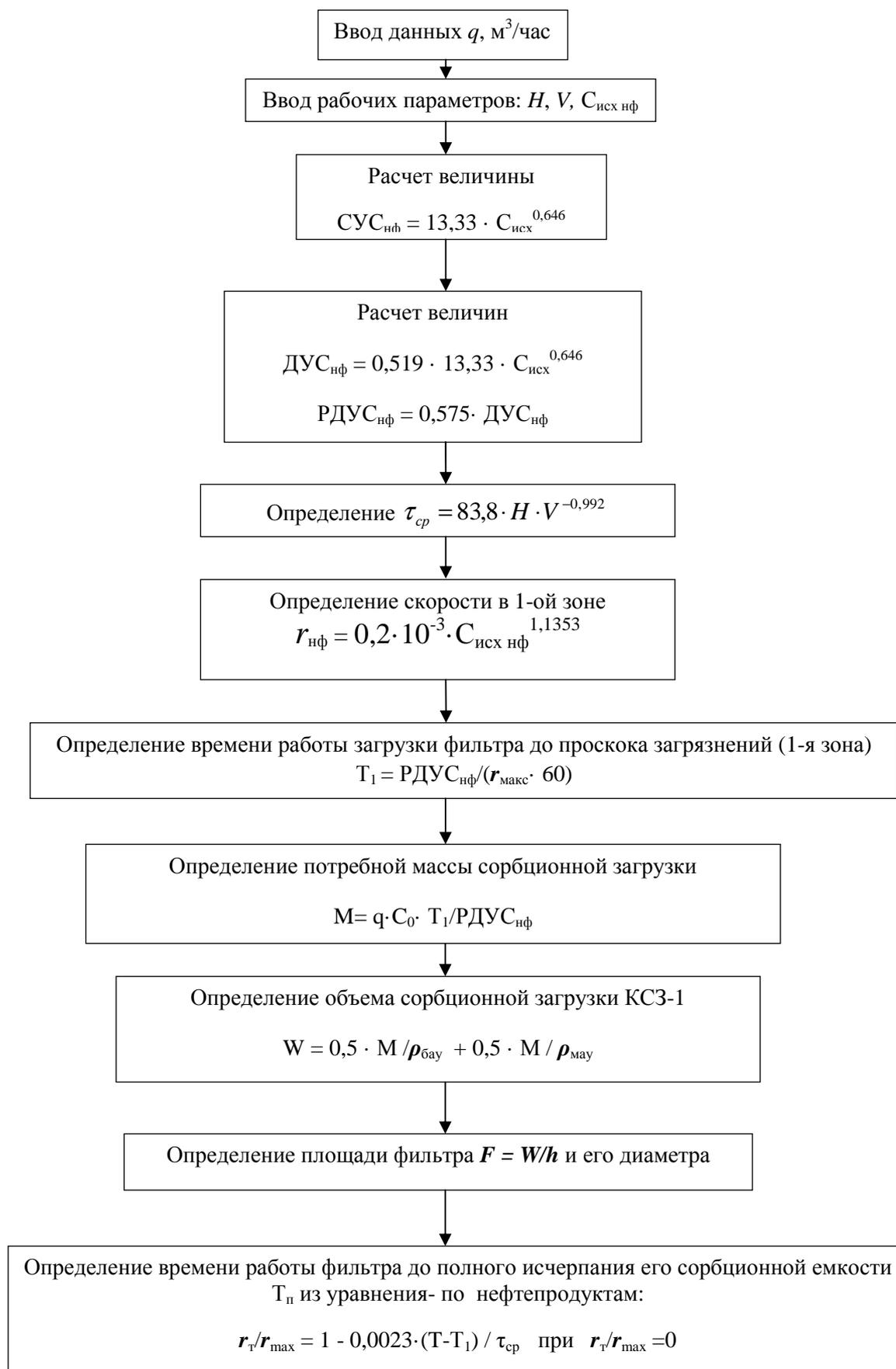


Рисунок 5.11. Блок - схема расчета продолжительности работы СФ с загрузкой КСЗ-1 по нефтепродуктам "до проскока"

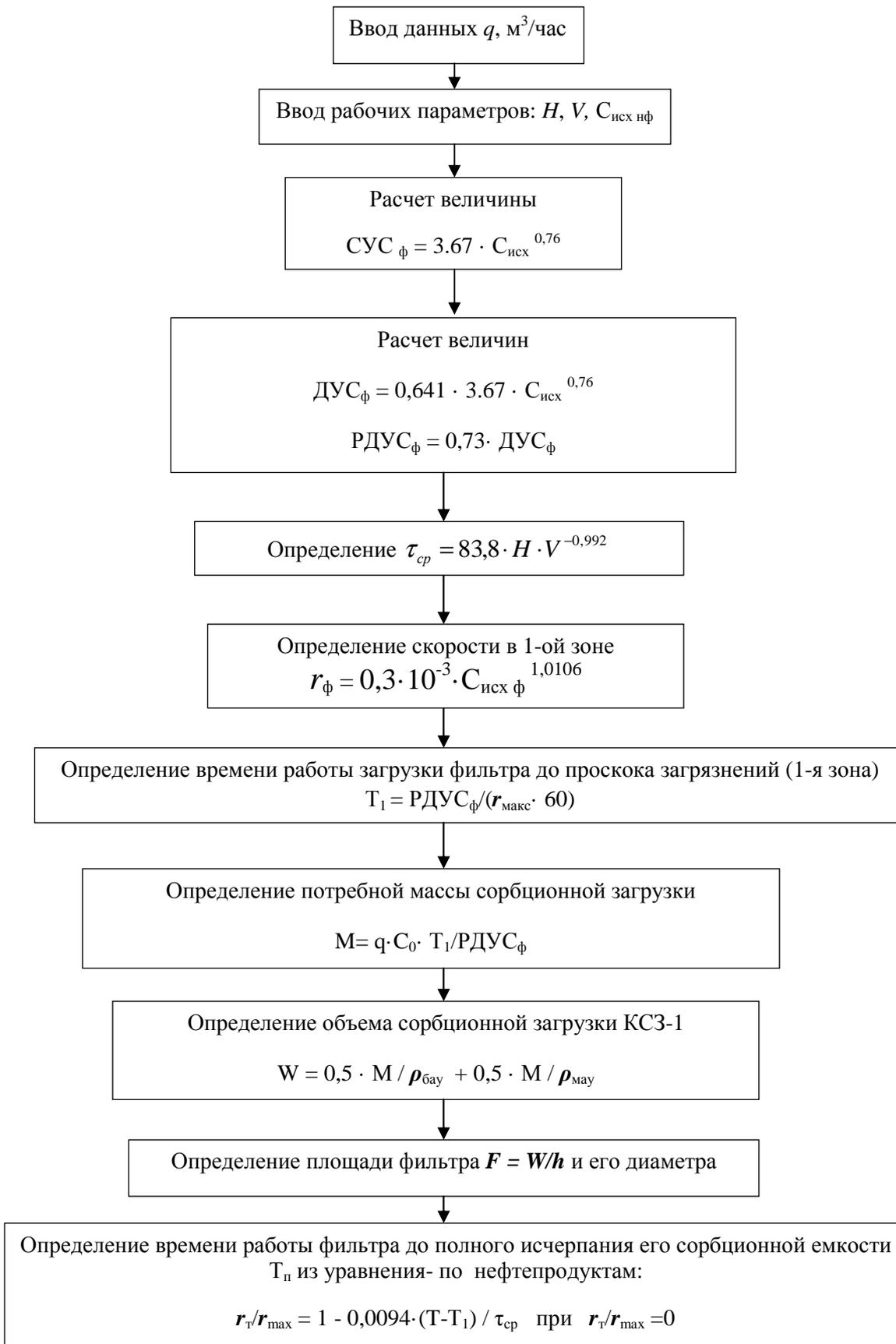


Рисунок 5.12. Блок - схема расчета продолжительности работы СФ с загрузкой КСЗ-1 по фенолам "до проскока"

## 5.6. Техничко-экономические показатели применения СФ с комплексной сорбционной загрузкой в составе МУВ

В таблице 5.5 приведены результаты расчета СФ с комплексной загрузкой КСЗ-1 в составе МУВ разной производительности.

Таблица 5. 5. Результаты расчета СФ с комплексной загрузкой КСЗ-1 в составе МУВ разной производительности

Производительность МУВ, м3/час	0,03	0,01	1,00	10,00
Исходная концентрация загрязнений: нефтепродуктов, мг/л фенолов, мг/л	3,0 0,2	3,0 0,3	1,0 0,3	1,0 0,3
Высота загрузки, м	0,4	0,60	1	2
Скорость фильтрации, м/час	2,0	3,0	3,0	3,0
Потребная масса сорбционной загрузки, кг.	1,7	5,65	83,33	833,3
Рабочий объем сорбционного фильтра, м3	0,0072	0,024	0,35	3,5
Продолжительность работы загрузки фильтра до проскока загрязнений, Т <sub>1</sub> , час	152,46	152,46	367,27	367,27
Продолжительность работы фильтра до полного исчерпания его сорбционной емкости Т <sub>п</sub> , час:	275	275	571	776

Для технико - экономических расчетов принято:

- стоимость загрузки КСЗ-1 – 142,5 руб/кг; загрузки из АУ марки МАУ-2А – 200 руб/кг (в ценах 2015);

- сорбционная емкость и потребная масса комплексной загрузки КСЗ-1 в 1,126 раз выше, чем у однородной загрузки из АУ марки МАУ-2А;

- соотношение продолжительность фильтроцикла при применении однородной загрузки из АУ марки МАУ-2А и комплексной загрузки КСЗ-1 составляет 0,937.

Результаты сравнительного технико-экономического расчета сорбционных фильтров в составе МУВ с комплексной загрузкой КСЗ-1 и с однородной загрузкой из АУ марки МАУ-2А, приведены в таблице 5. 6.

Таблица 5.6. Технико-экономическое сравнение СФ с комплексной загрузкой КСЗ-1 и с однородной загрузкой из АУ марки МАУ-2А

№ п/п	Показатели	Сорбционный фильтр с комплексной загрузкой КСЗ-1 в составе МУВ	Сорбционный фильтр с однородной загрузкой из АУ марки МАУ-2А в составе МУВ
1.	Производительность установки, м <sup>3</sup> /час	10,0	10,0
2.	Концентрация загрязнений в исходной воде, мг/л	нефтепродуктов – 1,0, фенолов - 0,3	нефтепродуктов – 1,0 , фенолов - 0,3
3.	Потребная масса сорбционной загрузки, кг.	833,3	928,3
4.	Рабочий объем сорбционного фильтра, м <sup>3</sup>	3,5	3,5
5.	Продолжительность фильтроцикла, час	367	343,8
6.	Себестоимость очистки 1 м <sup>3</sup> воды, руб/м <sup>3</sup>	<b>32,35</b>	<b>54,00</b>
7.	Годовые эксплуатационные затраты , руб/год	2833	4730

Экономическая эффективность применения комплексной загрузки КСЗ-1 в сравнении с однородной загрузкой из АУ марки МАУ-2А, как видно из таблицы 5.6, заключается в повышении сорбционной емкости и продолжительности работы СФ с комплексной загрузкой, что позволяет на 40% снизить эксплуатационные затраты и

себестоимость очистки воды и на 10% увеличить продолжительность фильтроцикла.

### **Выводы по пятой главе**

1. При обработке результатов гидродинамических исследований сорбционного фильтра установлена взаимосвязь и определена математическая зависимость между средней продолжительностью пребывания жидкости в загрузке и скоростью фильтрования. Установлено, что для описания структуры потока жидкости в СФ может быть использована диффузионная или ячеечная модели, выбрана ячеечная модель, которая давала меньшую погрешность, получено корреляционное уравнение для определения параметра ячеечной модели сорбционного фильтра в зависимости от скорости фильтрации.

2. Установлено, что изотермы сорбции загрязнений на КСЗ-1, полученные в статических условиях, относятся к разному типу изотерм, в частности, процесс изъятия нефтепродуктов относится к изотермам  $L$  - типа по классификации Гильса, или к I – му типу по классификации БЭТ, а изотермы изъятия фенолов - к изотермам  $S$  - типа по классификации Гильса, или к III – му типу по классификации БЭТ.

3. Обработка изотерм сорбции в областях небольших остаточных концентраций загрязнений, представляющих особый интерес при сорбционной очистке воды, показала, что процесс изъятия нефтепродуктов и фенолов на комплексной загрузке КСЗ-1 описывается уравнениями схожими по форме с уравнениями Фрейндлиха, или Генри.

4. Характер изотерм сорбции и величины полной статической сорбционной емкости комплексной загрузки в значительной степени зависят от вида загрязнений и их исходной концентрации в растворе, получены эмпирические уравнения этих зависимостей по нефтепродуктам и фенолам.

5. 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.

6. Обработкой экспериментальных данных сорбционной емкости в динамических условиях получены эмпирические зависимости, описывающие изменения скорости сорбции нефтепродуктов и фенолов в 1-ой и 2-ой зонах процесса сорбции при работе СФ с комплексной загрузкой КСЗ-1.

7. Получены 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.

8. 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.

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%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Возрастающий уровень антропогенного воздействия на водные объекты приводит к повсеместному увеличению степени их загрязнения. Значительная загрязненность источников водоснабжения, несоблюдение норм их санитарной охраны, низкая эффективность существующих технологий водоподготовки, не соответствующих качеству поступающей воды, являются причинами неудовлетворительного качества водопроводной воды. Особенно остро стоит задача водоподготовки для нужд небольших населенных мест и отдельно расположенных мобильных объектов, в т.ч. в условиях ЧС.

К мобильным установкам водоподготовки (МУВ) предъявляется ряд требований: простота устройства, технологичность, компактность, низкие эксплуатационные затраты, надежность и устойчивость к перегрузкам. Из всех известных типов малогабаритных очистных сооружений этим требованиям наиболее полно соответствуют мобильные установки средств полевого водообеспечения. Между тем, их работа изучена в недостаточной мере, а применяемые технологические схемы этих сооружений ограничены традиционными решениями, которые имеют ряд недостатков (низкую эффективность, малый ресурс работы, высокую стоимость, недостаточно высокую надежность в работе и др.).

2. Анализ литературных данных показал, что основным элементом глубокой очистки вод от органических загрязнений на МУВ являются сорбционные фильтры (СФ) с однородной загрузкой АУ, которые обеспечивают требуемую эффективность очистки и качество очищенной воды, но имеют ряд недостатков.

3. Наиболее распространенными и строго нормируемыми видами органических соединений, присутствующими в поверхностных и подземных источниках являются нефтепродукты и фенолы. Учитывая разный размер молекул различных видов органических загрязнений, их сорбционная способность ограничена из-за сферической недоступности микропор для больших молекул этих

веществ. Более эффективно для этой цели применение АУ с развитой переходной пористостью, но получение таких углей экономически не целесообразно.

4. **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.

5. Проведенными экспериментальными исследованиями установлено, что комплексная сорбционная загрузка, в виде послойного расположенных слоев разных активированных углей марок БАУ-А и МАУ-2А позволяет, увеличить сорбционную емкость сорбционного фильтра по нефтепродуктам в сравнении с однородной загрузкой. Соединения фенольной природы одинаково сорбируются различными видами испытанных сорбентов МАУ-А, БАУ-А и КСЗ

6. Исследованиями по выбору оптимального вида КСЗ для изъятия разных органических загрязнений (нефтепродуктов и фенолов) установлено, что большей эффективностью и сорбционной емкостью обладает комплексная загрузка КСЗ-1 из активированных углей марок БАУ-А и МАУ- 2А в пропорции 50% и 50% с послойным их распределением.

7. Исследования гидродинамических свойств сорбционных фильтров показали, что в них имеет место весьма существенное перемешивание потока жидкости, что должно учитываться при обработке экспериментальных данных и расчете сооружений. Установлено, что для описания структуры потока в сорбционных фильтрах может служить ячеечная модель.

8. Полученные экспериментальные данные позволили, определить фактическую продолжительность пребывания жидкости в загрузке сорбционного фильтра, а также параметра  $m$  ячеечной модели, характеризующего степень перемешивания потока в зависимости от скорости фильтрования.

9. 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, схожим по форме с уравнениями Фрейндлиха, или Генри. 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.

10. Получены зависимости для расчета сорбционных фильтров с комплексной загрузкой, позволяющие производить расчет этих фильтров на требуемый эффект очистки исходной воды от нефтепродуктов.

11. Предложены технологические схемы очистки загрязненных вод от нефтепродуктов и фенолов на мобильных установках с применением фильтров с комплексной сорбционной загрузкой.

12. Разработаны рекомендации по расчету и проектированию мобильных установок с применением фильтров с комплексной сорбционной загрузкой.

13. Экономическая эффективность применения фильтров с комплексной сорбционной загрузкой в составе МУВ заключается в сокращении объема фильтра, снижении стоимости загрузки, увеличении срока работы фильтра без его регенерации. Применение фильтров с комплексной сорбционной загрузкой для мобильной установки производительностью 10 м<sup>3</sup>/ч позволяет, снизить стоимость загрузки на 40%, по сравнению с однородной загрузкой фильтра АУ марки МАУ-2А и увеличить фильтроцикл на 10%.

14. 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.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

1. Внедрение результатов работы в систему полевого водообеспечения.
2. Очистка слабозагрязненных сточных вод, дренажных вод.
3. Реконструкция действующих очистных сооружений.

## Список литературы

1. О водоснабжении и водоотведении : [федер. закон от 7 декабря 2011 г. N 416-ФЗ: принят Гос. Думой 23 ноября 2011 г.: по состоянию на 10 дек. 2011г.] - М.: Российская газета, 2011. - 6 с.
2. Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года: [утв. Правительством Российской Федерации: 27.08.2009] – М.: 2009. – С.1-2, 4.
3. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2009 году»/ Министерство природных ресурсов и экологии РФ — М. : НИА-Природа, 2010. — 66, 81-89 с.
4. ГОСТ Р 22.6.02 - 95 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мобильные средства очистки поверхностных вод. Общие технические требования: – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1998. – 2-3 с.
5. Кириленко, В. И. Современные средства водоподготовки западных армий / В. И. Кириленко, М. С. Ряховский // Армейский сборник. - 2012. - №9. - С. 50-52.
6. Фальковский, Н. И. История водоснабжения в России/ Н. И. Фальковский – Л.: Изд-во комм. хоз-ва СССР, 1947. - 40-48, 100-105, 141- 146, 188-199, 206-216, 258- 271 с.
7. Копосов, Е. В. Блочно-модульные установки подготовки питьевой воды, применяемые в чрезвычайных ситуациях / Е. В. Копосов, А. Л. Васильев, Л. А. Васильев// Инновации. - 2009. - №3 - С. 45-47.
8. Васильев, А. Л. Переносные средства водоподготовки для питьевых целей / А. Л. Васильев, Л. А. Васильев, О. В. Подгорнова, И. В. Бокова // Великие реки 2007: междунар. науч.-пром. форум: тез. докл. междунар. конгр./ Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. - Н. Новгород, 2007. - С. 390 - 391.
9. Васильев, А. Л. Разработка технологий и установок для производства питьевой воды из поверхностных источников с использованием озона: дисс. д-ра техн. наук: 05.23.04 / Васильев Алексей Львович. – Нижний Новгород, 2011. – 18, 102, 205-214, 277-278 с.

10. Обеспечение войск водой в полевых условиях. Учебно-методическое пособие / В. И. Кириленко - СПб.: ВАМТО, 2012.- 252 – 260 с.
11. Феофанов, Ю.А. Мобильные установки для водоподготовки/ Ю. А. Феофанов, М. С. Ряховский// Армейский сборник – 2011. - №9 (208) – С. 54-55.
12. Беляков, В.Д. Военная гигиена и эпидемиология/ В.Д. Беляков, Е.Г. Жук – М.: Изд-во «Медицина», 1988. – 50-55 с.
13. Кошелев, Н.Ф. Гигиена водоснабжения войск/ Н.Ф. Кошелев, В.И. Нарыков, В.М. Осипов – СПб.: ИД «Петроглиф», 2008г.
14. Кузубова, Л. И. Органические загрязнители питьевой воды: Аналит. обзор/ Л. И. Кузубова, С. В. Морозов – Новосибирск: Изд-во ГПНТБ СО РАН, НИОХ СО РАН, 1993. – 115, 117 – 119, 121, 125 – 126, 132 - 133, 135 с.
15. Журба М.Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений. Том 2 Очистка и кондиционирование природных вод/ М.Г. Журба, Л.И. Соколов, Ж.М. Говорова – М.: Изд-во асс-и стр-х вузов, 2004. – 234-238, 264-275 с.
16. Ким, А.Н. Лабораторные исследования активированного угля марки БАУ-А, модифицированного фуллеренами, применяемого для кондиционирования водопроводной воды / А. Н. Ким, Н. А. Грун // Доклады 67-й научной конференции – Санкт-Петербург, 2009. – С. 42-46.
17. Веприкова, Е. В. Особенности очистки воды от нефтепродуктов с использованием нефтяных сорбентов, фильтрующих материалов и активных углей / Е. В. Веприкова // Журнал Сибирского Федерального Университета. Химия. – 2010. - №3. – С. 299, 301.
18. Фарберова, Е. А. Разработка модифицированного углеродного сорбента для обеззараживания воды / Е. А. Фарберова, А. В. Виноградова, Е. С. Шергина// Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. – 2010. - №11. – С. 22 -30.
19. Хохрякова Е.А. Водоподготовка: Справочник / Е. А. Хохрякова, Я. Е. Резник – М.: ИД «Аква-терм», 2007. – 144 – 145 с.

20. Технический справочник по обработке воды: в 2 т., Т. 1 – Спб.: Новый журнал, 2007. – 3 - 4 с.
21. Кусковский, В. С. Влияние искусственного берегоукрепительного пляжа на качество воды инфильтрационного водозабора / В. С. Кусковский // Создание искусственных пляжей, островов и других сооружений в береговой зоне морей, озер и водохранилищ : тр. Междунар. конф. «Создание и использование искусств. земельных участков на берегах и акватории водоемов», Новосибирск, 20-25 июля 2009 г. - Новосибирск, 2009. - С. 303-307
22. Клячко, В. А. Очистка природных вод / В. А. Клячко, И. Э. Апельцин - М.: Изд-во литературы по строительству, 1971. - 42 с.
23. Воробьева, Л. Б. Физико - химические процессы в техносфере / Л. Б. Воробьева, С. А. Степанова - Новосибирск: СГГА, 2006. - 22 - 25 с.
24. Грачев, М. А. О современном состоянии экологической системы озера Байкал [электронный ресурс] - Режим доступа: [http://lin.irk.ru/grachev/t2\\_3.htm](http://lin.irk.ru/grachev/t2_3.htm)
25. Васильев, А. Л. Использование естественных биоценозов водоемов при очистке природных вод / Л. А. Васильев, А. Л. Васильев // Водоснабжение и санитарная техника. - 1993. - № 11/12. - С. 29 -31.
26. Васильев А. Л. Предпосылки к созданию биологических устройств для предварительной очистки питьевой воды / Л. А. Васильев, А. Л. Васильев // Известия вузов. Серия "Строительство". - 1996. - №2 - 85 с.
27. Васильев А. Л. Разработка экологически безопасных технологий подготовки питьевой воды с использованием естественных биоценозов / Е. В. Копосов, Л. А. Васильев, И. В. Бокова, О. А. Шарова // Приволжский научный журнал / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. - Н. Новгород, 2009. - № 4 - С. 142 - 147.
28. Кузубова, Л. И. Химические методы подготовки воды (хлорирование, озонирование, фторирование): Аналит. обзор / Л. И. Кузубова, В. Н.

- Кобрина – Новосибирск: Изд-во ГПНТБ СО РАН, НИОХ СО РАН, 1996. – 29 - 30 с.
29. Мякишев, В. А. Предотвращение образования хлорорганических соединений на станциях очистки днепровской воды в Крыму / В. А. Мякишев, С. Д. Бойчук, Сафонов А.Н., Котовская Е. Е. // Строительство и техногенная безопасность. - 2005. - №12 - 170 - 176 с.
30. Спиренкова, О. В. Пространственно-временное распределение летучих фенолов в Новосибирском водохранилище и последующая трансформация фенола и его хлорпроизводных на различных стадиях водоподготовки: автореф. дис. канд. техн. наук: 25.00.27 / Спиренкова Ольга Владимировна – Барнаул, 2013. – 16 - 18 с.
31. Феофанов, Ю. А., 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>.
32. Феофанов, Ю. А. 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>.
33. Феофанов, Ю. А. Управление качеством воды при использовании береговой фильтрации / 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.
34. Васильев, Л. А. О применении сорбентов для очистки в технологиях подготовки питьевой воды / Л. А. Васильев, Е. А. Дергунов // Научно-технические и социально-экономические проблемы охраны окружающей среды: тез. докл. 7-й начн.-техн. конф. - Н. Новгород, 1993. - С. 28.

35. Васильев А. Л. О применении сорбционных методов в технологиях получения питьевой воды / А. Л. Васильев, Л. А. Васильев // Вода: экология и технология: тез. докл. третьего междунар. конгр. - М.: СИБИКО Интернешнл, 1998. - С. 315 - 316.
36. Васильев А. Л. Сорбционная очистка как один из перспективных методов водоподготовки / А. Л. Васильев, Л. А. Васильев // Архитектура и строительство: тез. докл. научн. - техн. конф. - преподават. состава, аспирантов и студентов - Н. Новгород, 2000. - Ч. VI. - С. 160 - 161.
37. Исследования сбросов сточных вод в реки Санкт-Петербурга: аналит. обзор, август 2011 - СПб: Greenpeace, 2011.
38. Баев, А. С. Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 1998 году / А. С. Баев – Санкт-Петербург: Авторский коллектив, «Сезам», 1999. - 180-184, 196-202 с.
39. Голубев, Д. А. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге в 2011 году / Д. А. Голубев - СПб: ООО «Сезам-Принт», 2012. – 27 - 48 с.
40. Фрог, Б. Н. Водоподготовка: учебн. пособие для вузов / Б. Н. Фрог, А. П. Левченко – М.: Изд-во МГУ, 1996 г. – С. 655, 661.
41. Домрачева, В.А. Теоретическое обоснование и разработка технологий получения углеродных сорбентов для извлечения ценных компонентов из сточных вод и техногенных образований: дис. док. техн. наук: 25.00.13 / Домрачева Валентина Андреевна. – Иркутск, 2006. – 284 с.
42. Колышкин, Д.А. Активные угли. Свойства и методы испытаний. Справочник / Д.А. Колышкин, К.К. Михайлова. – Л.: Изд-во «Химия», 1972. – 56 с.
43. Васильев, А. Л. О применении порошкообразного угля в технологиях водоподготовки / А. Л. Васильев, Л. А. Васильев // Строительный комплекс-97: тез. докл. научн. - техн. конф. проф. - преподават. состава, аспирантов и студентов - Н. Новгород, 1997. - Ч. V. - С. 51 - 53.

44. Когановский, А.М. Очистка и использование сточных вод в промышленном водоснабжении / А.М. Когановский, Н.А. Клименко, Т.М. Левченко, Р. М. Марутовский, И. Г. Рода. – М.: Химия, 1983. – 288 с.
45. Кельцев, Н.В. Основы адсорбционной техники / Н.В. Кельцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1984. – 592 с.
46. Макарец, В. И. Автономные системы снабжения населения питьевой водой / В. И. Макарец, Н. П. Фрог // 7-й Международный конгресс и выставка. Вода: экология и технология АКВАТЭК-2006 – Москва, 2006. – С. 11-12.
47. Сергеев, В. В. Очистка стоков с инженерных сооружений / В. В. Сергеев, Н. М. Папурин, А. В. Готовцев // Экология производства. – 2009. - №10. – С. 66.
48. Тарасевич, Ю. И. Природные сорбенты в процессах очистки воды/ Ю. И. Тарасевич – Киев: Наук. думка, 1981. – 174, 176 с.
49. Пальтиель, Л.Р. Физическая химия поверхностные явления и дисперсные системы / Л. Р. Пальтиель, Г.С. Зенин, Н.Ф. Волынец – СПб.: РИО СЗГТУ, 2004.
50. Смирнов, А. Д. Сорбционная очистка воды / А. Д. Смирнов – Л.: Химия, 1982. - 28 - 29, 159, 161 – 162 с.
51. Трусова, В. В. Очистка оборотных и сточных вод предприятий от нефтепродуктов сорбентом на основе бурых углей: дис. канд. техн. наук : 05.23.04 / Трусова Валентина Валерьевна – Иркутск, 2014. – 40, 51, 58, 64-66 с.
52. Смирнова, И. И. Исследование процесса очистки природных вод биосорбционно-мембранным методом: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.23.04 / Смирнова Ирина Ивановна – М., 2009. – 7 с.
53. Назаров, В. Д. Очистка нефтесодержащих вод: автореф. дис. д-ра. техн. наук : 11.01.11 / Назаров Владимир Дмитриевич - М., 1996. – 31 с.

54. Назаров, М. В. Очистка природных и сточных вод с применением электрохимических методов: автореф. дис. канд. техн. наук : 03.00.16 / Назаров Максим Владимирович - Уфа, 2008. – 7 с.
55. Исаков, В. Д. Компактные станции озонирования промышленных, бытовых сточных вод и первичного озонирования питьевой воды / В. Д. Исаков // 7-й Международный конгресс и выставка. Вода: экология и технология АКВАТЭК-2006 – Москва, 2006. – С. 50.
56. Мухленов, И. П. Основы химической технологии / И. П. Мухленов, А. Е. Горштейн, Е. С. Тумаркина, В. Д. Тамбовцева – М.: высш. школа, 1983г. – 177 – 179, 181 с.
57. Сергеев, В. В. Применение углеродных сорбентов нового поколения для очистки питьевой и сточной воды (промышленной и ливневой) / В.В. Сергеев, И.И. Якимова, Н.М. Папурин // Вода: Технологии, материалы, оборудование, экология. – 2003. – № 6. – С. 2–4.
58. Косач, П. В. Формирование и очистка поверхностных и мочных сточных вод (на примере Москвы) / П.В. Косач, Е.В. Алексеев // Сантехника. – 2001. – № 3. – С. 50–53.
59. Глазкова, Е.А. Извлечение нефтепродуктов из водных сред многослойными фильтрами: дис. канд. техн. наук : 02.00.13 / Глазкова Елена Алексеевна. – Томск, 2005. – 112 с.
60. ПНД Ф 14.1:2:4.168-2000. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах питьевых, природных и очищенных сточных вод методом ИК-спектрофотометрии. М.: Изд-во стандартов, 2000.
61. РД 52.24.480-2006. Массовая концентрация летучих фенолов в водах. Методика выполнения измерений ускоренным экстракционно-фотометрическим методом без отгонки. М.: Изд-во стандартов, 2000.

62. Киселев, В. Я. Адсорбция на границе раздела "твердое тело - раствор" / В. Я. Киселев, В. М. Комаров - М.: МИТХТ им. М. В. Ломоносова, 2005г. - 27 с.
63. Парфит, Г. Адсорбция из растворов на поверхности твердых тел: Пер. с англ. / Под ред. Г. Парфита, К. Рочестера. – М.: Мир, 1986. – 488 с.
64. Грег, С. Адсорбция, удельная поверхность, пористость: Пер. с англ. / С. Грег, К. Синг. – 2-е изд. – М.: Мир, 1984. – 306 с.
65. Краснова, Т. А. Исследование адсорбционного извлечения фенольных соединений различными активными углями / Т. А. Краснова, Н. В. Гора, Н. С. Голубева // Ползуновский вестник. - 2014. - № 3. - С. 237 - 239.
66. Феофанов, Ю.А. Сравнительная оценка сорбционных емкостей однородных и комплексной загрузки при очистке воды / Ю. А. Феофанов, М. С. Ряховский // ВОДА: ХИМИЯ и ЭКОЛОГИЯ. - 2015. - №7. - С. 82-87
67. Васильев, А. Л. О проблемах питьевого водоснабжения в условиях старой части города и индивидуальной застройки / А. Л. Васильев, Л. А. Васильев, Б. А. Минеев // Проблемы реконструкции исторических центров крупных городов России: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. - Н. Новгород, 1994. - С. 112-116.
68. Дзюбо, В. В. Подготовка подземных вод для питьевого водоснабжения малых населенных пунктов Западно - Сибирского региона: дис. д-ра техн. наук : 05.23.04 / Дзюбо Владимир Васильевич - Томск, 2007г. - \_\_\_\_ с.
69. Гляденов, С.Н. Фильтрующие материалы: практика применения / С.Н. Гляденов, С.С. Прокуева // Экология и промышленность России. – 2002 – ноябрь. – С. 35–38.
70. ГОСТ Р 51592-2000 Вода. Общие требования к отбору проб. - М. : Изд - во стандартов, 2000.
71. ГОСТ 17.1.4.01-80 Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к методам определения нефтепродуктов в природных и сточных водах. - М. : Изд - во стандартов, 1980.

72. ПНД Ф 12.15.1-08 Методические указания по отбору проб для анализа сточных вод. - М. : Изд - во стандартов, 2008 г.
73. ПНД Ф 14.1:2:4.5-95. Количественный химический анализ вод. Методика измерений массовой концентрации нефтепродуктов в питьевых, поверхностных и сточных водах методом ИК-спектрометрии: – М., 1995.
74. Методика выполнения измерений массовой концентрации суммы летучих фенолов в пробах природных и сточных вод фотометрическим методом. ЦВ 3.04.11 – 99 «А». ФР. 1.31.2000.00153: - СПб, 2001.
75. Когановский, А.М. Адсорбция органических веществ из воды / А.М. Когановский, Н.А. Клименко, Т.М. Левченко, И.Г. Рода. – Л.: Химия, 1990. – 256 с.
76. Лебедев, К.Б. Иониты в цветной промышленности / К.Б. Лебедев, Е.И. Казанцев, В.М. Розманов, В.С. Пахолков, В.А. Чемезов. – М.: «Металлургия», 1975. – 352 с.
77. Жуков, А.И. Канализация промышленных предприятий / А.И. Жуков, Л.Г. Демидов, И.Л. Монгайт, И.Д. Родзиллер. – М.: Издательство литературы по строительству, 1969. – 374 с.
78. Шифрин, С.М. Расчет сооружений биохимической очистки городских и промышленных сточных вод/ С. М. Шифрин, Б. Г. Мишуков, Ю. А. Феофанов – Л.: ЛИСИ, 1977. –24 – 28, 30 – 38, 51 с.
79. Феофанов, Ю. А. Биореакторы с неподвижной загрузкой для очистки воды: моногр./ СПбГАСУ. – СПб., 2012. –18, 25-26, 28, 32, 40-41, 100, 102, 112 с.
80. Феофанов, Ю. А. Характеристика гидродинамических процессов в орошаемых биореакторах – В кн.: Совершенствование систем водоотведения и очистки сточных вод: Межвуз. темат. сб. тр. / Ю. А. Феофанов – Л.: ЛИСИ, 1984. - 134-141 с.
81. Левеншпиль, О. Инженерное оформление химических процессов. Пер. с англ. / О. Левеншпиль – М.: Химия, 1969. – 620 с.
82. Романков, П. Г. Гидромеханические процессы химической технологии / П. Г. Романков, М. И. Курочкин – Л.: Химия, 1977. - 288 с.

83. Кафаров, В. В. Основы массопередачи / В. В. Кафаров – М.: Высшая школа, 1979. – 439 с.
84. Брайнес, Я. М. Введение в теорию и расчеты химических и нефтехимических реакторов / Я. М. Брайнес – М.: Химия, 1976. – 232 с.
85. Феофанов, Ю. А. Очистка сточных вод на биологических фильтрах: дис. д-ра техн. наук: 05.23.04 / Феофанов Юрий Александрович. – Л., 1986. - 21, 146-187 с.
86. Палашин, С. М. Интенсификация очистки оборотной воды промышленных рыболовных хозяйств: дис. канд. техн. наук: 05.23.04 / Палашин Сергей Михайлович – Л., 1989. - 108 - 123 с.
87. Рамм, В. М. Абсорбция газов / В. М. Рамм – М.: 1976 г. – 656 с.
88. Феофанов, Ю.А. Исследование гидродинамических характеристик сорбционных фильтров/ Ю. А. Феофанов, М. С. Ряховский// журнал "Водоснабжение и канализация" - 2015. - №7. - С. \_\_\_\_
89. Батунер, Л. М. Математические методы в химической технологии / Л. М. Батунер - Л.: Химия, 1971. - 84 с.
90. Заявка 2161240 ЕР Франция, МКИ2 В - 01 F 35/00. Биофильтр для очистки сточных вод/ Заявл. 15.01.1973 - С. 8.
91. СанПиН 2.1.4.1074-01. «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем водоснабжения. Контроль качества»
92. Гигиенические нормативы ГН 2.1.5.1315-03. « Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования»
93. Феофанов, Ю. А. Результаты исследований по выбору сорбентов для комплексной загрузки фильтра / Ю. А. Феофанов, М. С. Ряховский // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Природопользование. – 2013. - №1 (166). – С. 269 – 273

94. Reverse Osmosis Water Purification Unit setup and operation. Air force handbook 10-222, vol. 9 – США, 2011 – Режим доступа: <http://www.e-publishing.af.mil>, свободный. – Загл. с экрана.
95. On the Move Hydration. Advance Planning Brief for Industry – США, 2011 – Режим доступа: <http://www.us.army.mil>, свободный. – Загл. с экрана.
96. Hiscock, K. Hydrogeology: Principles and practice/ Kevin M. Hiscock// by Blackwell Science Ltd a Blackwell Publishing company – Australia, 2005. – P. 291-292.
97. Elimelech, M. Transport and Removal of Cryptosporidium Oocysts in Subsurface Porous Media/ M. Elimelech, Ph. D., G. Miller, Z. Kuznar// The Second International Riverbank Filtration Conference. Riverbank Filtration: The Future Is NOW! Edited by: Gina Melin – National Water Research Institute – United States of America, 2003. – P. 115.
98. Prof. Dr. – Ing. Jekel, M. Riverbank Filtration: The European Experience/ Prof. Dr. – Ing. M. Jekel, Prof. Dr. – Ing. T. Grischek // The Second International Riverbank Filtration Conference. Riverbank Filtration: The Future Is NOW! Edited by: Gina Melin – National Water Research Institute – United States of America, 2003. – P. 108.
99. Stuyfzand, P. J. Riverbank filtration in the Netherlands: well fields, clogging and geochemical reactions/ Piter J. Stuyfzand, Maria H. A. Juhász-Holterman & Willem J. de Lange/ NATO Advanced Research Workshop: Clogging in Riverbank Filtration Bratislava, 7-10 Sept. 2004. – P. 11.
100. Hiscock, K. M. Attenuation of groundwater pollution by bank filtration / K. M. Hiscock, T. Grischek // Journal of Hydrology. – 2002. – Vol. 266 – P. 139 – 144.
101. Dr. rer. Nat. Schmidt, C. K. Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Wasserver- und -entsorgung, Teil I: Trinkwasser. Uferfiltration Schlussbericht Teilprojekt B6/ Dr. rer. Nat. Carsten K. Schmidt, Dr. rer. Nat. Frank Thomas Lange// Bonn:DVGW Water Technology Center, Karlsruhe - Germany, 2005. – S. 26-30, 54-55.

102. Grützmacher, G. Bank filtration and aquifer recharge for drinking water production: application, efficiency and perspectives – an integration of NASRI outcomes and international experiences/ G. Grützmacher, B. Wiese, I. Hülshoff, D. Orlikowski, E. Hoa and Y. Moreau-Le Golvan/ Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH – Berlin, Germany, 2012. - P. X, 3-4
103. Bartak R. Beach Sand Filtration as Pre-Treatment for RO Desalination/ R. Bartak, T. Grischek, K. Ghodeif, C. Ray// International Journal of Water Sciences. – 2012. – Vol. 1 – P. 1 – 10.
104. Labunska I. Russian Refuse III. Investigation of organic and heavy metal contaminants input and distribution in selected rivers of the Russian Federation/ Iryna Labunska, Kevin Brigden, David Santillo, Alexey Kiselev, Paul Johnston// Greenpeace Research Laboratories Technical Note 04/2011 – P. 14 – 18.
105. de Vet W. W. J. M./ W. W. J. M. de Vet, C. C. A. van Genuchten, M. C. M. van Loosdrecht, and J. C. van Dijk// Drinking Water. Engineering and Science – 2010. – Vol. 3 – P. 79 – 90.

## Приложения

### Приложение А. АКТ ВНЕДРЕНИЯ № 41 от 04 мая 2013г.

НЕКОММЕРЧЕСКОЕ ПАРТНЕРСТВО

«ЦЕНТР ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СЕРТИФИКАЦИИ – ЗЕЛЕННЫЕ СТАНДАРТЫ»



Исх. № *41* от «*04*» *мая* 201*3*г.  
 На № от « » 201\_г.

#### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Выдан Ряховскому Михаилу Сергеевичу в том, что результаты его диссертационного исследования «Применение комплексных сорбционных загрузок для очистки природных вод» были использованы в ходе разработки Системы добровольной сертификации объектов недвижимости – «Зеленые стандарты» для России в 2011 г.

Ряховский М. С. принимал участие в разработке раздела документа «Рекомендации и решения» для критериев группы № 3 «Рациональное водопользование, регулирование ливневых стоков и предотвращение загрязнения» Системы добровольной сертификации объектов недвижимости – «Зеленые стандарты».

Некоммерческое партнерство «Центр экологической сертификации – Зеленые стандарты» выражает благодарность Ряховскому М. С. за качественную и оперативную работу по разработке вышеуказанного документа.

Директор



Р.А. Исмаилов

## Приложение Б. АКТ ВНЕДРЕНИЯ от 14 июля 2014г.

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«ПОЛИХИМ»



188540, г. Сосновый Бор Ленинградской обл.,  
а/я 321/5. ИНН/ КПП 4714002716/472601001  
<http://www.polihim.info>  
Тел: (81369) 73138, 73139,  
(812) 7157915, 7156952; факс: (81369) 73136  
Р/с 40702810365000000169 в ф-ле Ленинградский  
областной ОАО «Банк ВТБ» г. Тосно  
к/с 30101810400000000729, БИК 044106729  
ОКОНХ 95120, ОКПО 23363751

УТВЕРЖДАЮ  
Главный инженер  
ООО НПП «Полихим»

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт составлен в том, что, разработанные Санкт-Петербургским архитектурно-строительным университетом рекомендации по применению комплексных сорбционных загрузок для очистки природных вод (исполнитель Ряховский М. С.) переданы в ООО НПП «Полихим» и использованы при проектировании и строительстве ряда объектов Вельская птицефабрика, Раевская птицефабрика, ООО «НТФФ»Полисан», ЗАО «Данон», Приморский торговый порт, ТЭЦ-15.

Технико-экономическая эффективность внедренных разработок будет определена после проведения строительного-монтажных и пуско-наладочных работ.



Главный инженер  
Сергеев В.В.

## Приложение В. Протокол лабораторных испытаний

Санкт-Петербургский государственный технологический институт

(технический университет)

### Протокол лабораторных испытаний

№ 1

- |   |  |
|---|--|
| 1. Наименование образца                 | Активированный уголь МАУ-2А  |
| 2. Цель испытаний                       | Изотерма адсорбции фенола из водного раствора                            |
| 3. Условия испытаний                    | Начальная концентрация фенола в водном растворе – 948 мг/дм <sup>3</sup> |
| 4. Общее количество страниц в протоколе | 1  |

### Результаты испытаний

m <sub>навески</sub> , Г	C <sub>p</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	a, мг/г
22,3571	9	42
17,0364	11	55
12,9444	16	72
9,4792	38	96
5,7237	78	152
3,8341	162	205
2,7880	251	250
1,7565	342	345
0,8819	418	601
0,6622	501	675

**Примечание:** определение концентрации фенолов в воде проводилось в соответствии с РД 52.24.480-2006 "Массовая концентрация летучих фенолов в водах. Методика выполнения измерений ускоренным экстракционно-фотометрическим методом без отгонки".

Зав.кафедрой ХТМИСТ СПбГТИ(ТУ)

\_\_\_\_\_ В.В.Самонин

**Протокол лабораторных испытаний**

№ 2

1. Наименование образца Активированный уголь БАУ-М
2. Цель испытаний Изотерма адсорбции фенола из водного раствора
3. Условия испытаний Начальная концентрация фенола в водном растворе – 948 мг/дм<sup>3</sup>
4. Общее количество страниц в протоколе 1

**Результаты испытаний**

$m_{\text{навески}}, \text{Г}$	$C_p, \text{мг/дм}^3$	$a, \text{мг/г}$
20,4130	9	46
15,1290	10	62
10,9765	15	85
7,6807	34	119
5,4136	71	162
3,4199	158	231
2,1346	250	327
1,3066	313	486
0,9344	378	610
0,5964	518	721

**Примечание:** определение концентрации фенолов в воде проводилось в соответствии с РД 52.24.480-2006 "Массовая концентрация летучих фенолов в водах. Методика выполнения измерений ускоренным экстракционно-фотометрическим методом без отгонки."

### Протокол лабораторных испытаний

№ 3

- |   |  |
|---|--|
| 1. Наименование образца                 | Смесь активированных углей МАУ-2А и БАУ-М (соотношение 1:1)              |
| 2. Цель испытаний                       | Изотерма адсорбции фенола из водного раствора                            |
| 3. Условия испытаний                    | Начальная концентрация фенола в водном растворе – 948 мг/дм <sup>3</sup> |
| 4. Общее количество страниц в протоколе | 1  |

### Результаты испытаний

$m_{\text{навески}}, \text{Г}$	$C_p, \text{мг/дм}^3$	$a, \text{мг/г}$
17,1091	7	55
11,3133	9	83
8,6389	15	108
6,7206	34	136
4,6902	85	184
3,1304	156	253
2,0030	271	338
1,2037	357	491
0,8217	418	645
0,6340	515	683

**Примечание:** определение концентрации фенолов в воде проводилось в соответствии с РД 52.24.480-2006 "Массовая концентрация летучих фенолов в водах. Методика выполнения измерений ускоренным экстракционно-фотометрическим методом без отгонки."

### Протокол лабораторных испытаний

№ 4

- |   |  |
|---|--|
| 1. Наименование образца                 | Активированный уголь МАУ-2А  |
| 2. Цель испытаний                       | Изотерма адсорбции нефтепродуктов из водного раствора                            |
| 3. Условия испытаний                    | Начальная концентрация нефтепродуктов в водном растворе – 148 мг/дм <sup>3</sup> |
| 4. Общее количество страниц в протоколе | 1  |

### Результаты испытаний

$m_{\text{навески}}, \text{Г}$	$C_p, \text{мг/дм}^3$	$a, \text{мг/г}$
6,6613	0,12	21
4,5587	1,21	32
2,7722	2,18	53
1,8358	3,52	79
1,4019	5,15	102
1,2245	6,08	116
0,6929	8,52	201
0,5475	10,15	252
0,4225	17,9	308
0,382	29,8	309
0,3046	53,4	311
0,2559	68,2	312
0,1137	112,5	312

**Примечание:** определение концентрации нефтепродуктов в воде проводилось в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.168-2000 «Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах питьевых, природных и очищенных сточных вод методом ИК-спектрофотометрии»

Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)

---

**Протокол лабораторных испытаний**

№ 5

- |   |  |
|---|--|
| 1. Наименование образца                 | Активированный уголь БАУ-М   |
| 2. Цель испытаний                       | Изотерма адсорбции нефтепродуктов из водного раствора                            |
| 3. Условия испытаний                    | Начальная концентрация нефтепродуктов в водном растворе – 148 мг/дм <sup>3</sup> |
| 4. Общее количество страниц в протоколе | 1  |

**Результаты испытаний**

$m_{\text{навески}}, \text{Г}$	$C_p, \text{мг/дм}^3$	$a, \text{мг/г}$
7,4682	0,13	20
5,7819	1,14	25
4,5489	1,98	32
3,1256	2,97	46
2,3897	4,14	60
1,8336	5,53	78
0,7471	8,15	187
0,5840	10,11	236
0,5243	18,4	247
0,4699	30,2	251
0,3399	62,2	252
0,2759	77,4	256
0,1465	110,4	257

**Примечание:** определение концентрации нефтепродуктов в воде проводилось в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.168-2000 «Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах питьевых, природных и очищенных сточных вод методом ИК-спектрофотометрии»

### Протокол лабораторных испытаний

№ 6

- |   |  |
|---|--|
| 1. Наименование образца                 | Активированный уголь БАУ-А   |
| 2. Цель испытаний                       | Изотерма адсорбции нефтепродуктов из водного раствора                            |
| 3. Условия испытаний                    | Начальная концентрация нефтепродуктов в водном растворе – 148 мг/дм <sup>3</sup> |
| 4. Общее количество страниц в протоколе | 1  |

### Результаты испытаний

$m_{\text{навески}}, \text{Г}$	$C_p, \text{мг/дм}^3$	$a, \text{мг/г}$
7,2505	0,09	20
4,9161	1,01	30
3,6463	1,42	40
1,8070	2,72	80
1,2085	3,83	119
1,0573	4,52	136
0,6707	6,35	211
0,5304	7,13	266
0,4227	16,5	311
0,3728	30,8	314
0,3055	51,1	317
0,2382	71,5	321
0,1165	110,4	323

**Примечание:** определение концентрации нефтепродуктов в воде проводилось в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.168-2000 «Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах питьевых, природных и очищенных сточных вод методом ИК-спектрофотометрии»

Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)

---

### Протокол лабораторных испытаний

№ 7

- |   |  |
|---|--|
| 1. Наименование образца                 | Смесь активированных углей МАУ-2А и БАУ-М (соотношение 1:1)                      |
| 2. Цель испытаний                       | Изотерма адсорбции нефтепродуктов из водного раствора                            |
| 3. Условия испытаний                    | Начальная концентрация нефтепродуктов в водном растворе – 148 мг/дм <sup>3</sup> |
| 4. Общее количество страниц в протоколе | 1  |

### Результаты испытаний

m <sub>навески</sub> , Г	C <sub>p</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	a, мг/г
5,8702	0,07	25
3,5774	0,97	41
2,4079	1,84	61
1,6282	2,44	89
1,1898	3,08	122
1,0710	4,06	134
0,6895	6,52	205
0,5625	8,96	247
0,4605	18,1	282
0,4053	30,3	290
0,2995	58,7	298
0,2436	74,4	302
0,1189	111,8	304

**Примечание:** определение концентрации нефтепродуктов в воде проводилось в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.168-2000 «Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах питьевых, природных и очищенных сточных вод методом ИК-спектрофотометрии»

Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)

### Протокол лабораторных испытаний

№ 8

- |   |  |
|---|--|
| 1. Наименование образца                 | Активированный уголь МАУ-2А  |
| 2. Цель испытаний                       | Изотерма адсорбции фенола из водного раствора нефтепродуктов и фенола в соотношении 1:1  |
| 3. Условия испытаний                    | Начальная концентрация нефтепродуктов в водном растворе – 100 мг/дм <sup>3</sup><br>Начальная концентрация фенола в водном растворе – 100 мг/дм <sup>3</sup> |
| 4. Общее количество страниц в протоколе | 2  |

### Результаты испытаний

m навески, Г	C <sub>p</sub> (нефтепродуктов), МГ/ДМ <sup>3</sup>	C <sub>p</sub> (фенола), МГ/ДМ <sup>3</sup>	a нефтепродуктов, МГ/Г	a фенола, МГ/Г
26,4865	0	2,02	4	4
15,8621	0	8,04	6	6
7,6636	0	18	13	11
5,8919	0,84	25,1	17	13
4,8252	0,92	31	21	14
3,6652	1,15	33,3	27	18
2,1235	2,66	38,5	46	29
1,4676	4,02	42,5	65	39
1,1824	5,99	47,5	80	44
1,166	6,07	47,9	81	45
0,8839	7,02	54,3	105	52
0,6928	7,97	56,5	133	63
0,5893	8,77	62,2	155	64
0,422	11,84	65,7	209	81
0,4157	11,92	66,2	212	81
0,3359	23,4	66,5	228	100
0,2527	37,8	72,4	246	109
0,2513	37,9	72,2	247	111
0,1461	62,2	83,1	259	116
0,1342	65,2	83,3	259	124
0,1052	72,2	86,8	264	125
0,0132	96,5	98,3	265	129
0,0052	98,6	99,35	269	125

**Примечание:** определение концентрации фенолов в воде проводилось в соответствии с РД 52.24.480-2006 "Массовая концентрация летучих фенолов в водах. Методика выполнения измерений ускоренным экстракционно-фотометрическим методом без отгонки."

Определение концентрации нефтепродуктов в воде проводилось в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.168-2000 «Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах питьевых, природных и очищенных сточных вод методом ИК-спектрофотометрии»

Зав.кафедрой ХТМИСТ СПбГТИ(ТУ)

\_\_\_\_\_ В.В.Самонин

Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)

### Протокол лабораторных испытаний

№ 9

- |   |  |
|---|--|
| 1. Наименование образца                 | Активированный уголь БАУ-М   |
| 2. Цель испытаний                       | Изотерма адсорбции фенола из водного раствора нефтепродуктов и фенола в соотношении 1:1  |
| 3. Условия испытаний                    | Начальная концентрация нефтепродуктов в водном растворе – 100 мг/дм <sup>3</sup><br>Начальная концентрация фенола в водном растворе – 100 мг/дм <sup>3</sup> |
| 4. Общее количество страниц в протоколе | 2  |

### Результаты испытаний

m навески, Г	C <sub>p</sub> (нефтепродуктов), МГ/ДМ <sup>3</sup>	C <sub>p</sub> (фенола), МГ/ДМ <sup>3</sup>	a нефтепродуктов, МГ/Г	a фенола, МГ/Г
20,3469	0	0,3	5	5
12,5658	0	4,5	8	8
7,0418	0,77	18,5	14	12
6,9828	1,01	19	14	12
4,7613	1,58	26,2	21	15
4,5169	1,35	27,4	22	16
3,6037	1,98	31,8	27	19
2,4016	3,6	36,4	40	26
1,3368	4,95	40,9	71	44
0,9945	5,01	46	96	54
0,9767	6,92	46,5	95	55
0,7561	9,04	50,7	120	65
0,6084	10,1	53,7	148	76
0,4020	12,46	62,2	218	94
0,3580	19,1	65,2	226	97
0,3565	19,9	65,5	225	97
0,2957	32,2	68,4	229	107
0,2502	42,8	70,4	229	118
0,1367	68,5	82	230	132
0,1310	69,8	82,4	231	134
0,0714	83,4	90,3	232	136
0,0139	96,8	98,1	230	137
0,0120	97,2	98,4	233	133

**Примечание:** определение концентрации фенолов в воде проводилось в соответствии с РД 52.24.480-2006 "Массовая концентрация летучих фенолов в водах. Методика выполнения измерений ускоренным экстракционно-фотометрическим методом без отгонки."

Определение концентрации нефтепродуктов в воде проводилось в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.168-2000 «Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах питьевых, природных и очищенных сточных вод методом ИК-спектрофотометрии»

Зав.кафедрой ХТМИСТ СПбГТИ(ТУ)

\_\_\_\_\_ В.В.Самонин

Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)

---

### Протокол лабораторных испытаний

№ 10

- |   |  |
|---|--|
| 1. Наименование образца                 | Смесь активированных углей МАУ-2А и БАУ-М (соотношение 1:1)  |
| 2. Цель испытаний                       | Изотерма адсорбции фенола из водного раствора нефтепродуктов и фенола в соотношении 1:1  |
| 3. Условия испытаний                    | Начальная концентрация нефтепродуктов в водном растворе – 100 мг/дм <sup>3</sup><br>Начальная концентрация фенола в водном растворе – 100 мг/дм <sup>3</sup> |
| 4. Общее количество страниц в протоколе | 2  |

### Результаты испытаний

m навески, Г	C <sub>p</sub> (нефтепродуктов), МГ/ДМ <sup>3</sup>	C <sub>p</sub> (фенола), МГ/ДМ <sup>3</sup>	a нефтепродуктов, МГ/Г	a фенола, МГ/Г
23,2326	0	0,1	4	4
12,2963	0	0,4	8	8
8,2623	0,77	1,8	12	12
6,1346	0,95	4,3	16	16
5,1968	1,26	8,2	19	18
4,0191	2,35	16	24	21
1,9446	2,38	33,3	50	34
1,1995	2,94	42,6	81	48
1,1429	3,22	43,2	85	50
1,0015	3,34	47,6	97	52
0,8303	5,01	50,4	114	60
0,7524	5,99	52,3	125	63
0,6588	6,84	53,9	141	70
0,438	7,83	62,8	210	85
0,4096	10,50	64,9	219	86
0,2964	19,80	71,3	271	97
0,2649	26,20	72	279	106
0,2430	31,50	73,3	282	110
0,1411	59,50	81,7	287	130
0,1362	60,40	82	291	132
0,1026	69,90	86,4	293	133

0,0113	96,70	98,5	292	133
0,0085	97,50	98,9	294	129

**Примечание:** определение концентрации фенолов в воде проводилось в соответствии с РД 52.24.480-2006 "Массовая концентрация летучих фенолов в водах. Методика выполнения измерений ускоренным экстракционно-фотометрическим методом без отгонки."

Определение концентрации нефтепродуктов в воде проводилось в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.168-2000 «Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах питьевых, природных и очищенных сточных вод методом ИК-спектрофотометрии»

Зав.кафедрой ХТМИСТ СПбГТИ(ТУ)

\_\_\_\_\_ В.В.Самонин

Приложение Г. Протокол лабораторных испытаний  
Санкт-Петербургский государственный технологический институт  
(технический университет)

---

**Протокол лабораторных испытаний № 1**

- |    |                                      |  |
|----|--------------------------------------|--|
| 5. | Наименование образца                 | Смесь активированных углей МАУ-2А и БАУ-А (соотношение 1:1)  |
| 6. | Цель испытаний                       | Сорбционная емкость по фенолу и нефтепродуктам из водного раствора нефтепродуктов и фенола в соотношении 1:1 в статических условиях    |
| 7. | Условия испытаний                    | Концентрация нефтепродуктов в водном растворе – 10 мг/дм <sup>3</sup><br>Концентрация фенола в водном растворе – 10 мг/дм <sup>3</sup> |
| 8. | Общее количество страниц в протоколе | 1  |

**Результаты испытаний**

	$a_{\text{нефтепродуктов}}$ , МГ/Г	$a_{\text{фенола}}$ , МГ/Г
Статическая емкость	58	21

**Примечание:** определение концентрации фенолов в воде проводилось в соответствии с РД 52.24.480-2006 "Массовая концентрация летучих фенолов в водах. Методика выполнения измерений ускоренным экстракционно-фотометрическим методом без отгонки".

Определение концентрации нефтепродуктов в воде проводилось в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.168-2000 «Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах питьевых, природных и очищенных сточных вод методом ИК-спектрофотометрии»

Зав.кафедрой ХТМИСТ СПбГТИ(ТУ)

\_\_\_\_\_ В.В.Самонин

Методика определения

Навеску сорбента ~0,5 г заливали 1 дм<sup>3</sup> раствора нефтепродуктов и фенол ( $C_{\text{нп}}=10\text{мг/ дм}^3$ ,  $C_{\text{фенола}}=10\text{ мг/дм}^3$ ) выдерживали 2 дня при периодическом перемешивании. Раствор сливали, определяли

концентрацию фенола и нефтепродуктов. Эту же навеску снова заливали 1 дм<sup>3</sup> раствором. Операции повторяли, пока концентрация раствора после контакта с сорбентом не изменялась.

m, г	1	2	3	4	5
0,498	Ск нефтепродукты, мг/дм <sup>3</sup>				
	0	0,1	1,2	9,8	10
	Ск фенол, мг/дм <sup>3</sup>				
	0,1	9,7	9,9	10	10



47,5	142,5	0	0	87	261	0,01	8,5
49	147	0	0	88	264	0	8,8

Продолжение таблицы

t работы, час	V пропущенного р-ра, л	C <sub>к</sub> нп, мг/л	C <sub>к</sub> фенола, мг/л	t работы, час	V пропущенного р-ра, л	C <sub>к</sub> нп, мг/л	C <sub>к</sub> фенола, мг/л
90,5	271,5	0,01	9,6	190	570	7,61	
97	291	0,01	10	192	576	7,71	
98	294	0	9,8	198	594	7,85	
99	297	0,01	10	199	597	7,92	
100	300	0,01	10	206	618	8,25	
102	306	0,02	9,9	207	621	8,3	
104	312	0,04	10	214	642	8,68	
105	315	0,08	10	215	645	8,7	
106	318	0,14	10	217	651	8,85	
107	321	0,12		221	663	9,09	
113	339	0,21		223	669	9,11	
114,5	343,5	0,22		225	675	9,3	
120	360	0,35		227	681	9,34	
122	366	0,31		229	687	9,46	
125	375	0,41		231	693	9,47	
128	384	0,45		233	699	9,62	
130	390	0,5		235	705	9,65	
136	408	1,2		237	711	9,67	
137	411	1,32		238	714	9,67	
150	450	2,74		240	720	9,7	
152	456	2,72		242	726	9,72	
155	465	3,58		244	732	9,73	
160	480	4,3		246	738	9,72	
161,5	484,5	4,3		247	741	9,83	
167	501	5		249	747	9,85	
168	504	4,9		250	750	9,87	
169	507	5,31		251	753	9,9	
171	513	5,72		252	756	9,9	
175	525	6,12		253	759	9,92	
177	531	6,13		254	762	9,99	
180	540	6,52		255	765	10	
182	546	6,89		256	768	10	
183	549	7,28		257	771	10	

**Примечание:** определение концентрации фенолов в воде проводилось в соответствии с РД 52.24.480-2006 "Массовая концентрация летучих фенолов в водах. Методика выполнения измерений ускоренным экстракционно-фотометрическим методом без отгонки."

Определение концентрации нефтепродуктов в воде проводилось в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.168-2000 «Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах питьевых, природных и очищенных сточных вод методом ИК-спектрофотометрии»

	$a_{\text{нефтепродуктов, МГ/Г}}$	$a_{\text{фенола, МГ/Г}}$
Динамическая емкость (до проскока)	13	11
Полная динамическая емкость (до $C_{\text{нач.}}$ )	24	14
Статическая емкость (Ср нефтепродуктов– 10 мг/дм <sup>3</sup> , Ср фенола– 10 мг/дм <sup>3</sup> в водном растворе нефтепродуктов и фенола)	58	21

Зав.кафедрой ХТМИСТ СПбГТИ(ТУ)

В.В.Самонин

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Сорбционная емкость  $A$  однородных и комплексной загрузок по нефтепродуктам из индивидуального раствора

Вид сорбционной загрузки из АУ							
Однородная МАУ-2А		Однородная БАУ-М		Комплексная КСЗ		Однородная БАУ-А	
$C_p$ , мг/дм <sup>3</sup>	$A$ , мг/г	$C_p$ , мг/дм <sup>3</sup>	$A$ , мг/г	$C_p$ , мг/дм <sup>3</sup>	$A$ , мг/г	$C_p$ , мг/дм <sup>3</sup>	$A$ , мг/г
0	0	0	0	0	0	0	0
0,12	22,2	0,13	19,8	0,07	25,2	0,09	20,4
1,21	32,2	1,14	25,4	0,97	41,1	1,01	29,9
2,18	52,6	1,98	32,1	1,84	60,7	1,42	40,2
3,52	78,7	2,97	46,4	2,44	89,4	2,72	80,4
5,15	101,9	4,14	60,2	3,08	121,8	3,83	119,3
6,08	115,9	5,53	77,7	4,06	134,4	4,52	135,7
8,52	201,3	8,15	187,2	6,52	205,2	6,35	211,2
10,15	251,8	10,11	236,1	8,96	247,2	7,13	265,6
17,9	307,9	18,4	247,2	18,1	282,1	16,5	311,1
29,8	309,4	30,2	250,7	30,3	290,4	30,8	314,4
53,4	310,6	62,2	252,4	58,7	298,2	51,1	317,2
68,2	311,8	77,4	255,9	74,4	302,1	71,5	321,1
112,5	312,26	110,4	256,7	111,8	304,4	110,4	322,8

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Сорбционная емкость  $A$  однородных и комплексной загрузок по фенолам (из индивидуального раствора)

Вид сорбционной загрузки из АУ					
Однородная МАУ-2А		Однородная БАУ-М		Комплексная КСЗ	
$C_p$ , мг/дм <sup>3</sup>	$A$ , мг/г	$C_p$ , мг/дм <sup>3</sup>	$A$ , мг/г	$C_p$ , мг/дм <sup>3</sup>	$A$ , мг/г
0	0	0	0	0	0
9	42	9	46	7	55
11	55	10	62	9	83
16	72	15	85	15	108
38	96	34	119	34	136
78	152	71	162	85	184
162	205	158	231	156	253
251	250	250	327	271	338
342	345	313	486	357	491
418	601	378	610	418	645
501	675	518	721	515	683

ПРИЛОЖЕНИЕ И. Сорбционная емкость  $A$  однородных и комплексной загрузок по нефтепродуктам (из раствора, содержащего смесь нефтепродуктов и соединений фенольной группы)

Вид сорбционной загрузки из АУ					
Однородная МАУ-2А		Однородная БАУ-М		Комплексная КСЗ	
$C_p$ , мг/дм <sup>3</sup>	$A$ , мг/г	$C_p$ , мг/дм <sup>3</sup>	$A$ , мг/г	$C_p$ , мг/дм <sup>3</sup>	$A$ , мг/г
0	0	0	0	0	0
0,84	16,83	0,71	14,1	0,77	12,01
1,15	26,97	1,35	21,84	1,26	19
2,66	45,84	1,98	27,2	2,38	50,2
4,02	65,4	3,6	40,14	2,94	80,92
6,07	80,56	4,95	71,1	3,34	96,52
7,97	132,83	6,92	95,3	5,01	114,41
8,77	154,8	9,04	120,3	6,84	141,4
11,84	208,91	12,46	217,76	7,83	210,43
23,4	228,07	19,9	224,7	19,8	270,6
37,8	247,52	32,2	229,31	31,5	281,94
62,2	258,8	68,5	230,5	60,4	290,73
72,2	264,2	83,4	232,64	69,9	293,41
98,6	269,5	97,2	233,01	97,5	294,01

ПРИЛОЖЕНИЕ К. Сорбционная емкость  $a$  однородных и комплексной загрузок по фенолу (из раствора «нефтепродукты – фенол»)

Вид сорбционной загрузки из АУ					
Однородная МАУ-2А		Однородная БАУ-М		Комплексная КСЗ	
$C_p$ , мг/дм <sup>3</sup>	$a$ , мг/г	$C_p$ , мг/дм <sup>3</sup>	$a$ , мг/г	$C_p$ , мг/дм <sup>3</sup>	$a$ , мг/г
0	0	0	0	0	0
2	3,7	0,3	4,9	0,1	4,3
8	5,8	4,5	7,6	0,4	8,1
18	10,7	19	11,6	4,3	15,6
31	14,3	26,2	15,5	16	20,9
47,5	44,4	46	54,3	43,2	49,7
54,3	51,7	53,7	76,1	52,3	63,4
66,2	81,3	65,2	97,2	64,9	85,7
72,2	110	70,4	118,3	72	105,7
83,3	124,4	82,4	134,3	81,7	129,7
98,3	128,8	98,1	136,3	98,5	133,3

## ПРИЛОЖЕНИЕ Л.

Таблица 1. Результаты опыта (1-ый режим) с применением комплексного сорбента КСЗ-3

Сорбент: КСЗ-3

М факт, г: 156,99

V загрузки, дм<sup>3</sup>: 0,66С исх. нефть, мг/ дм<sup>3</sup>: 0,2С исх. фенол, мг/ дм<sup>3</sup>: 0,31

№ п/п	Расход модельного раствора, л/ч	Скорость фильтрации, м/ч	Время продолжительности опыта, мин	Объем отфильтрованного модельного раствора, дм <sup>3</sup>	Масса адсорбированных нефтепродуктов, мг	Масса адсорбированных фенолов, мг
1	3,750	2,708	48,000	3,000	0,438	0,930
2	3,429	2,476	83,000	5,000	0,718	1,550
3	3,333	2,407	119,000	7,000	0,958	2,170
4	3,333	2,407	155,000	9,000	1,138	2,790

Таблица 2. Результаты опыта (1-ый режим) с применением комплексного сорбента КСЗ-1

Сорбент: КСЗ-1

М факт, г: 162,18

V загрузки, дм<sup>3</sup>: 0,66С исх. нефть, мг/ дм<sup>3</sup>: 0,2С исх. фенол, мг/ дм<sup>3</sup>: 0,31

№ п/п	Расход модельного раствора, л/ч	Скорость фильтрации, м/ч	Время продолжительности опыта, мин	Объем отфильтрованного модельного раствора, дм <sup>3</sup>	Масса адсорбированных нефтепродуктов, мг	Масса адсорбированных фенолов, мг
1	3,214	2,321	56,000	3,000	0,390	0,930
2	2,667	1,926	101,000	5,000	0,610	1,550
3	2,353	1,699	152,000	7,000	0,810	2,170
4	2,449	1,769	201,000	9,000	0,390	3,100

## ПРИЛОЖЕНИЕ М.

Таблица 1. Результаты опыта (2-ой режим) с применением комплексного сорбента КСЗ-4

Сорбент: КСЗ-4  
 М факт, г: 153,54  
 V загрузки, дм<sup>3</sup>: 0,66  
 С исх. нефть, мг/ дм<sup>3</sup>: 2,8  
 С исх. фенол, мг/ дм<sup>3</sup>: 0,9

№ п/п	Расход модельного раствора, л/ч	Скорость фильтрации, м/ч	Время продолжительности опыта, мин	Объем отфильтрованного модельного раствора, дм <sup>3</sup>	Масса адсорбированных нефтепродуктов, мг	Масса адсорбированных фенолов, мг
1	2,655	1,917	113,000	5,000	12,900	4,500
2	3,158	2,280	208,000	10,000	26,000	9,000
3	2,963	2,140	289,000	14,000	36,840	12,600

Таблица 2. Результаты опыта (2-ой режим) с применением комплексного сорбента КСЗ-1

Сорбент: КСЗ-1  
 М факт, г: 162,18  
 V загрузки, дм<sup>3</sup>: 0,66  
 С исх. нефть, мг/ дм<sup>3</sup>: 2,8  
 С исх. фенол, мг/ дм<sup>3</sup>: 0,9

№ п/п	Расход модельного раствора, л/ч	Скорость фильтрации, м/ч	Время продолжительности опыта, мин	Объем отфильтрованного модельного раствора, дм <sup>3</sup>	Масса адсорбированных нефтепродуктов, мг	Масса адсорбированных фенолов, мг
1	2,655	1,917	113,000	5,000	13,715	4,500
2	3,158	2,280	208,000	10,000	26,765	9,000
3	2,857	2,063	292,000	14,000	37,765	12,600

**ПРИЛОЖЕНИЕ Н. Результаты исследований (3-ий режим) динамики адсорбции нефтепродуктов и фенолов на комплексной загрузке КСЗ-1 (3-ий режим работы установки)**

Время работы Т, час	Объем пропущенного р-ра V, л	Остаточная концентрация нефтепродуктов С <sub>Т</sub> , мг/л	Остаточная концентрация фенола С <sub>Т</sub> , мг/л	Время работы Т, час	Объем Пропущенного р-ра V, л	Остаточная концентрация нефтепродуктов С <sub>Т</sub> , мг/л	Остаточная концентрация фенола С <sub>Т</sub> , мг/л
1	3	0	0	52	156	0	0
3	9	0	0	54	162	0	0
8	24	0	0	56	168	0	0
9	27	0	0	57	171	0	0
10	30	0	0	58	174	0	0
16	48	0	0	59	177	0	0,1
17	51	0	0	62	186	0	0,3
18,5	55,5	0	0	63	189	0	0,8
24	72	0	0	64,5	193,5	0	0,5
25	75	0	0	66	198	0	1,3
27	81	0	0	69	207	0,01	2,2
31,5	94,5	0	0	71	213	0	2,2
33	99	0	0	73	219	0,01	3,7
36,5	109,5	0	0	75	225	0,01	4,9
40	120	0	0	77	231	0	5,1
41	123	0	0	80,5	241,5	0,01	6,5
42	126	0	0	84	252	0,01	7,7
47,5	142,5	0	0	87	261	0,01	8,5
49	147	0	0	88	264	0	8,8
90,5	271,5	0,01	9,6	190	570	7,61	
97	291	0,01	10	192	576	7,71	
98	294	0	9,8	198	594	7,85	
99	297	0,01	10	199	597	7,92	
100	300	0,01	10	206	618	8,25	
102	306	0,02	9,9	207	621	8,3	
104	312	0,04	10	214	642	8,68	
105	315	0,08	10	215	645	8,7	
106	318	0,14	10	217	651	8,85	
107	321	0,12		221	663	9,09	
113	339	0,21		223	669	9,11	
114,5	343,5	0,22		225	675	9,3	
120	360	0,35		227	681	9,34	
122	366	0,31		229	687	9,46	
125	375	0,41		231	693	9,47	
128	384	0,45		233	699	9,62	
130	390	0,5		235	705	9,65	
136	408	1,2		237	711	9,67	
137	411	1,32		238	714	9,67	
150	450	2,74		240	720	9,7	

152	456	2,72		242	726	9,72	
155	465	3,58		244	732	9,73	
160	480	4,3		246	738	9,72	
161,5	484,5	4,3		247	741	9,83	
167	501	5		249	747	9,85	
168	504	4,9		250	750	9,87	
169	507	5,31		251	753	9,9	
171	513	5,72		252	756	9,9	
175	525	6,12		253	759	9,92	
177	531	6,13		254	762	9,99	
180	540	6,52		255	765	10	
182	546	6,89		256	768	10	
183	549	7,28		257	771	10	
Примечание. Исходный раствор- смесь нефтепродуктов и фенолов с концентрацией 10мг/л+10 мг/л							

ПРИЛОЖЕНИЕ П. Динамика удельной сорбционной емкости и скорости сорбции нефтепродуктов комплексной загрузки КСЗ-1 (3-ий режим работы установки)

Время работы Т, час	Масса сорбированных нефтепродуктов М, мг	Удельная сорбционная емкость Анп, мг/г	Скорость сорбции нефтепродуктов $r$ , мг/(г*мин)
1	30	0,178571429	0,00297619
3	90	0,535714286	0,00297619
8	240	1,428571429	0,00297619
9	270	1,607142857	0,00297619
10	300	1,785714286	0,00297619
16	480	2,857142857	0,00297619
17	510	3,035714286	0,00297619
18,5	555	3,303571429	0,00297619
24	720	4,285714286	0,00297619
25	750	4,464285714	0,00297619
27	810	4,821428571	0,00297619
31,5	945	5,625	0,00297619
33	990	5,892857143	0,00297619
36,5	1095	6,517857143	0,00297619
40	1200	7,142857143	0,00297619
41	1230	7,321428571	0,00297619
42	1260	7,5	0,00297619
47,5	1425	8,482142857	0,00297619
49	1470	8,75	0,00297619
52	1560	9,285714286	0,00297619

54	1620	9,642857143	0,00297619
56	1680	10	0,00297619
57	1710	10,17857143	0,00297619
58	1740	10,35714286	0,00297619
59	1770	10,53571429	0,00297619
62	1860	11,07142857	0,00297619
63	1890	11,25	0,00297619
64,5	1935	11,51785714	0,00297619
66	1980	11,78571429	0,00297619
69	2069,91	12,32089286	0,002973214
71	2129,91	12,67803571	0,00297619
73	2189,85	13,03482143	0,002973214
75	2249,79	13,39160714	0,002973214
77	2309,79	13,74875	0,00297619
80,5	2414,685	14,373125	0,002973214
84	2519,58	14,9975	0,002973214
87	2609,49	15,53267857	0,002973214
88	2639,49	15,71125	0,00297619
90,5	2714,415	16,15723214	0,002973214
97	2909,22	17,31678571	0,002973214
98	2939,22	17,49535714	0,00297619
99	2969,19	17,67375	0,002973214
100	2999,16	17,85214286	0,002973214
102	3059,04	18,20857143	0,002970238
104	3118,8	18,56428571	0,002964286
105	3148,56	18,74142857	0,002952381
106	3178,14	18,9175	0,002934524
107	3207,78	19,09392857	0,002940476
113	3384	20,14285714	0,00291369
114,5	3428,01	20,40482143	0,002910714
120	3587,235	21,35258929	0,002872024
122	3645,375	21,69866071	0,002883929
125	3731,685	22,21241071	0,002854167
128	3817,635	22,72401786	0,002842262
130	3874,635	23,06330357	0,002827381
136	4033,035	24,00616071	0,002619048
137	4059,075	24,16116071	0,002583333
150	4342,215	25,84651786	0,002160714

152	4385,895	26,10651786	0,002166667
155	4443,675	26,45044643	0,001910714
160	4529,175	26,959375	0,001696429
161,5	4554,825	27,11205357	0,001696429
167	4637,325	27,603125	0,001488095
168	4652,625	27,69419643	0,001517857
169	4666,695	27,77794643	0,001395833
171	4692,375	27,93080357	0,00127381
175	4738,935	28,20794643	0,001154762
177	4762,155	28,34616071	0,001151786
180	4793,475	28,53258929	0,001035714
182	4812,135	28,64366071	0,000925595
183	4820,295	28,69223214	0,000809524
190	4870,485	28,99098214	0,00071131
192	4884,225	29,07276786	0,000681548
198	4922,925	29,303125	0,000639881
199	4929,165	29,34026786	0,000619048
206	4965,915	29,55901786	0,000520833
207	4971,015	29,589375	0,000505952
214	4998,735	29,754375	0,000392857
215	5002,635	29,77758929	0,000386905
217	5009,535	29,81866071	0,000342262
221	5020,455	29,88366071	0,000270833
223	5025,795	29,91544643	0,000264881
225	5029,995	29,94044643	0,000208333
227	5033,955	29,96401786	0,000196429
229	5037,195	29,98330357	0,000160714
231	5040,375	30,00223214	0,000157738
233	5042,655	30,01580357	0,000113095
235	5044,755	30,02830357	0,000104167
237	5046,735	30,04008929	9,82143E-05
238	5047,725	30,04598214	9,82143E-05
240	5049,525	30,05669643	8,92857E-05
242	5051,205	30,06669643	8,33333E-05
244	5052,825	30,07633929	8,03571E-05
246	5054,505	30,08633929	8,33333E-05
247	5055,015	30,089375	5,05952E-05
249	5055,915	30,09473214	4,46429E-05

250	5056,305	30,09705357	3,86905E-05
251	5056,605	30,09883929	2,97619E-05
252	5056,905	30,100625	2,97619E-05
253	5057,145	30,10205357	2,38095E-05
254	5057,175	30,10223214	2,97619E-06
255	5057,175	30,10223214	0
256	5057,175	30,10223214	0
257	5057,175	30,10223214	0

ПРИЛОЖЕНИЕ Р. Динамика удельной сорбционной емкости и скорости сорбции фенолов комплексной загрузки КСЗ-1 (3-ий режим работы установки)

Время работы Т, час	Масса сорбированных фенолов Мф, мг	Удельная сорбционная емкость Аф, мг/г	Скорость сорбции фенолов $r_{\phi}$ , мг/(г*мин)
1	30	0,178571429	0,00297619
3	90	0,535714286	0,00297619
8	240	1,428571429	0,00297619
9	270	1,607142857	0,00297619
10	300	1,785714286	0,00297619
16	480	2,857142857	0,00297619
17	510	3,035714286	0,00297619
18,5	555	3,303571429	0,00297619
24	720	4,285714286	0,00297619
25	750	4,464285714	0,00297619
27	810	4,821428571	0,00297619
31,5	945	5,625	0,00297619
33	990	5,892857143	0,00297619
36,5	1095	6,517857143	0,00297619
40	1200	7,142857143	0,00297619
41	1230	7,321428571	0,00297619
42	1260	7,5	0,00297619
47,5	1425	8,482142857	0,00297619
49	1470	8,75	0,00297619
52	1560	9,285714286	0,00297619
54	1620	9,642857143	0,00297619
56	1680	10	0,00297619
57	1710	10,17857143	0,00297619
58	1740	10,35714286	0,00297619

59	1769,7	10,53392857	0,002946429
62	1857	11,05357143	0,002886905
63	1884,6	11,21785714	0,002738095
64,5	1927,35	11,47232143	0,002827381
66	1966,5	11,70535714	0,002589286
69	2036,7	12,12321429	0,002321429
71	2083,5	12,40178571	0,002321429
73	2121,3	12,62678571	0,001875
75	2151,9	12,80892857	0,001517857
77	2181,3	12,98392857	0,001458333
80,5	2218,05	13,20267857	0,001041667
84	2242,2	13,34642857	0,000684524
87	2255,7	13,42678571	0,000446429
88	2259,3	13,44821429	0,000357143
90,5	2262,3	13,46607143	0,000119048
97	2262,3	13,46607143	0
98	2262,9	13,46964286	5,95238E-05
99	2262,9	13,46964286	0
100	2263,2	13,47142857	2,97619E-05
102	2263,8	13,475	2,97619E-05
104	2263,8	13,475	0

ПРИЛОЖЕНИЕ С. Результаты опыта (4-ый режим) с применением сорбента марки  
МАУ-2А, БАУ-А, КСЗ-1

Сорбент: МАУ-2А

М факт, г: 172,82

V загрузки, дм<sup>3</sup>: 0,692

С исх. нефть, мг/дм<sup>3</sup>: 4,0

С исх. фенол, мг/дм<sup>3</sup>: 5,0

№ п/п	Расход модельного раствора, л/ч	Скорость фильтрации, м/ч	Время продолжительности опыта, мин	Объем отфильтрованного модельного раствора, дм <sup>3</sup>	Масса адсорбированных нефтепродуктов, мг	Масса адсорбированных фенолов, мг
1	4,615	3,333	13,000	1,000	3,420	5,000
2	1,714	1,238	48,000	2,000	6,750	10,000
3	2,222	1,605	75,000	3,000	9,850	15,000
4	2,400	1,733	100,000	4,000	13,080	20,000
5	2,500	1,805	124,000	5,000	16,340	25,000

Сорбент: БАУ-А

М факт, г: 133,63

V загрузки, дм<sup>3</sup>: 0,692

С исх. нефть, мг/ дм<sup>3</sup>: 4

С исх. фенол, мг/ дм<sup>3</sup>: 5

№ п/п	Расход модельного раствора, л/ч	Скорость фильтрации, м/ч	Время продолжительности опыта, мин	Объем отфильтрованного модельного раствора, дм <sup>3</sup>	Масса адсорбированных нефтепродуктов, мг	Масса адсорбированных фенолов, мг
1	3,000	2,166	20,000	1,000	3,900	5,000
2	2,400	1,733	45,000	2,000	7,760	10,000
3	2,143	1,547	73,000	3,000	11,470	15,000
4	2,500	1,805	97,000	4,000	13,770	20,000
5	2,308	1,667	123,000	5,000	16,270	25,000

Сорбент: КСЗ -1

М факт, г: 153,22

V загрузки, дм<sup>3</sup>: 0,69

С исх. нефть, мг/ дм<sup>3</sup>: 4

С исх. фенол, мг/ дм<sup>3</sup>: 5

№ п/п	Расход модельного раствора, л/ч	Скорость фильтрации, м/ч	Время продолжительности опыта, мин	Объем отфильтрованного модельного раствора, дм <sup>3</sup>	Масса адсорбированных нефтепродуктов, мг	Масса адсорбированных фенолов, мг
1	2,857	2,063	21,000	1,000	3,390	5,000
2	2,400	1,733	46,000	2,000	6,490	10,000
3	2,400	1,733	71,000	3,000	9,810	15,000
4	2,069	1,494	100,000	4,000	13,070	20,000
5	2,400	1,733	125,000	5,000	16,710	25,000

## ПРИЛОЖЕНИЕ Т.

Таблица 1. Результаты опыта (5-ый режим) с применением сорбента БАУ-А

Сорбент: БАУ-А

М факт, г: 133,63

V загрузки, дм<sup>3</sup>: 0,692С исх. нефть, мг/ дм<sup>3</sup>: 0,38С исх. фенол, мг/ дм<sup>3</sup>: 0,09

№ п/п	Расход модельного раствора, л/ч	Скорость фильтрации, м/ч	Время продолжительности опыта, мин	Объем отфильтрованного модельного раствора, дм <sup>3</sup>	Масса адсорбированных нефтепродуктов, мг	Масса адсорбированных фенолов, мг
1	1,029	0,743	175,000	3,000	0,870	0,270
2	3,000	2,166	235,000	6,000	1,560	0,540
3	2,769	2,000	300,000	9,000	2,220	0,810

Таблица 2. Результаты опыта (5-ый режим) с применением сорбента МАУ-2А

Сорбент: МАУ-2А

М факт, г: 172,82

V загрузки, дм<sup>3</sup>: 0,692С исх. нефть, мг/ дм<sup>3</sup>: 0,38С исх. фенол, мг/ дм<sup>3</sup>: 0,09

№ п/п	Расход модельного раствора, л/ч	Скорость фильтрации, м/ч	Время продолжительности опыта, мин	Объем отфильтрованного модельного раствора, дм <sup>3</sup>	Масса адсорбированных нефтепродуктов, мг	Масса адсорбированных фенолов, мг
1	1,200	0,867	150,000	3,000	0,900	0,270
2	3,000	2,166	210,000	6,000	1,770	0,540
3	3,273	2,363	265,000	9,000	2,751	0,810

Таблица 3.3. Результаты опыта (5-ый режим) с применением сорбента КСЗ-1

Сорбент: КСЗ -1

М факт, г: 153,22

V загрузки, дм<sup>3</sup>: 0,692С исх. нефть, мг/ дм<sup>3</sup>: 0,38С исх. фенол, мг/ дм<sup>3</sup>: 0,09

№ п/п	Расход модельного раствора, л/ч	Скорость фильтрации, м/ч	Время продолжительности опыта, мин	Объем отфильтрованного модельного раствора, дм <sup>3</sup>	Масса адсорбированных нефтепродуктов, мг	Масса адсорбированных фенолов, мг
1	1,500	1,083	120,000	3,000	1,110	0,270
2	1,500	1,083	240,000	6,000	2,220	0,540
3	3,000	2,166	300,000	9,000	3,330	0,810

## ПРИЛОЖЕНИЕ У.

Таблица 1. Результаты опытов по очистке дренажных вод с применением однородного сорбента МАУ-2А

Сорбент: МАУ-2А  
 М факт, г: 87,66  
 V загрузки, дм<sup>3</sup>: 0,3496  
 С исх. нефть, мг/ дм<sup>3</sup>: 3,74

№ п/п	Расход модельного раствора, л/ч	Скорость фильтрации, м/ч	Время продолжительности опыта, мин	Объем отфильтрованного модельного раствора, дм <sup>3</sup>	Масса адсорбированных нефтепродуктов, мг
1	5,143	3,714	35,000	3,000	9,945
2	5,455	3,939	68,000	6,000	19,314
3	5,000	3,611	116,000	10,000	31,122

Таблица 2. Результаты опытов по очистке дренажных вод с применением однородного сорбента БАУ-А

Сорбент: БАУ-А  
 М факт, г: 54,73  
 V загрузки, дм<sup>3</sup>: 0,2572  
 С исх. нефть, мг/ дм<sup>3</sup>: 3,74

№ п/п	Расход модельного раствора, л/ч	Скорость фильтрации, м/ч	Время продолжительности опыта, мин	Объем отфильтрованного модельного раствора, дм <sup>3</sup>	Масса адсорбированных нефтепродуктов, мг
1	7,317	5,284	41,000	5,000	17,785
2	3,158	2,280	79,000	7,000	24,541
3	3,529	2,549	130,000	10,000	34,279

Таблица 3. Результаты опытов по очистке дренажных вод с применением комплексного сорбента КСЗ-1

Сорбент: КСЗ-1  
М факт, г: 61,58  
V загрузки, дм<sup>3</sup>: 0,2893  
С исх. нефть, мг/ дм<sup>3</sup>: 3,74

№ п/п	Расход модельного раствора, л/ч	Скорость фильтрации, м/ч	Время продолжительности опыта, мин	Объем отфильтрованного модельного раствора, дм <sup>3</sup>	Масса адсорбированных нефтепродуктов, мг
1	7,895	5,701	38,000	5,000	17,865
2	4,138	2,988	67,000	7,000	24,793
3	4,286	3,095	109,000	10,000	34,951

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ф.

Таблица 1. Результаты эксперимента при скорости фильтрации 0,87 м/ч

№ п/п	Время эксперимента, мин	Показание, $\mu\text{S}$	Относительная величина $C/C_{\text{max}}$ , %
1	1	86,00	0,00
2	2	87,00	2,13
3	3	88,00	4,26
4	4	89,00	6,38
5	5	90,00	8,51
6	6	91,00	10,64
7	7	92,00	12,77
8	8	93,00	14,89
9	9	94,00	17,02
10	10	95,00	19,15
11	11	96,00	21,28
12	12	97,00	23,40
13	13	98,00	25,53
14	14	99,00	27,66
15	15	100,00	29,79
16	16	101,00	31,91
17	17	102,00	34,04
18	18	103,00	36,17
19	19	104,00	38,30
20	20	105,00	40,43
21	21	106,00	42,55
22	22	107,00	44,68
23	23	108,00	46,81
24	24	109,00	48,94
25	25	110,00	51,06
26	26	112,00	55,32
27	27	116,00	63,83
28	28	120,00	72,34
29	29	120,00	72,34
30	30	123,00	78,72
31	31	133,00	100,00
32	32	132,00	97,87
33	33	129,00	91,49
34	34	127,00	87,23
35	35	125,00	82,98
36	36	124,00	80,85
37	37	123,00	78,72
38	38	122,00	76,60
39	39	121,00	74,47
40	40	121,00	74,47

41	41	120,00	72,34
42	42	119,00	70,21
43	43	119,00	70,21
44	44	118,00	68,09
45	45	117,00	65,96
46	46	116,00	63,83
47	47	115,00	61,70
48	48	114,00	59,57
49	49	113,00	57,45
50	50	112,00	55,32
51	51	111,00	53,19
52	52	110,00	51,06
53	53	109,00	48,94
54	54	108,00	46,81
55	55	107,00	44,68
56	56	106,00	42,55
57	57	105,00	40,43
58	58	104,00	38,30
59	59	103,00	36,17
60	60	102,00	34,04
61	61	101,00	31,91
62	62	100,00	29,79
63	63	99,00	27,66
64	64	98,00	25,53
65	65	97,00	23,40
66	66	96,00	21,28
67	67	95,00	19,15
68	68	94,00	17,02
69	69	93,00	14,89
70	70	92,00	12,77
71	71	91,00	10,64
72	72	90,00	8,51
73	73	89,00	6,38
74	74	88,00	4,26
75	75	87,00	2,13
76	76	86,00	0,00

Таблица 2. Результаты эксперимента при скорости фильтрования 1,73 м/ч

№ п/п	Время эксперимента, мин	Показание, $\mu\text{S}$	Относительная величина $C/C_{\text{max}}$ , %
1	1	97,00	0,00
2	2	97,00	0,00
3	3	97,00	0,00
4	4	97,00	0,00

5	5	97,00	0,00
6	6	97,00	0,00
7	7	97,00	0,00
8	8	97,00	0,00
9	9	97,00	0,00
10	10	98,00	1,06
11	11	99,00	2,13
12	12	100,00	3,19
13	13	101,00	4,26
14	14	102,00	5,32
15	15	103,00	6,38
16	16	104,00	7,45
17	17	105,00	8,51
18	18	106,00	9,57
19	19	107,00	10,64
20	20	108,00	11,70
21	21	109,00	12,77
22	22	110,00	13,83
23	23	111,00	14,89
24	24	112,00	15,96
25	25	113,00	17,02
26	26	114,00	18,09
27	27	115,00	19,15
28	28	140,00	45,74
29	29	150,00	56,38
30	30	161,00	68,09
31	31	170,00	77,66
32	32	171,00	78,72
33	33	174,00	81,91
34	34	180,00	88,30
35	35	186,00	94,68
36	36	188,00	96,81
37	37	189,00	97,87
38	38	188,00	96,81
39	39	185,00	93,62
40	40	179,00	87,23
41	41	176,00	84,04
42	42	173,00	80,85
43	43	170,00	77,66
44	44	167,00	74,47
45	45	164,00	71,28
46	46	160,00	67,02
47	47	156,00	62,77
48	48	152,00	58,51
49	49	150,00	56,38
50	50	148,00	54,26

51	51	146,00	52,13
52	52	144,00	50,00
53	53	142,00	47,87
54	54	140,00	45,74
55	55	134,00	39,36
56	56	130,00	35,11
57	57	125,00	29,79
58	58	123,00	27,66
59	59	121,00	25,53
60	60	119,00	23,40
61	61	117,00	21,28
62	62	115,00	19,15
63	63	113,00	17,02
64	64	111,00	14,89
65	65	109,00	12,77
66	66	107,00	10,64
67	67	105,00	8,51
68	68	103,00	6,38
69	69	101,00	4,26
70	70	99,00	2,13

Таблица 3. Результаты эксперимента при скорости фильтрования 1,95 м/ч

№ п/п	Время эксперимента, мин	Показание, $\mu\text{S}$	Относительная величина $C/C_{max}$ , %
1	1	113,00	3,26
2	2	110,00	2,94
3	3	106,00	2,50
4	4	103,00	2,18
5	5	100,00	1,85
6	6	98,00	1,63
7	7	96,00	1,41
8	8	94,00	1,20
9	9	92,00	0,98
10	10	88,00	0,54
11	11	85,00	0,22
12	12	83,00	0,00
13	13	86,00	0,33
14	14	85,00	0,22
15	15	86,00	0,33
16	16	89,00	0,65
17	17	109,00	2,83
18	18	159,00	8,27
19	19	232,00	16,21

20	20	322,00	26,01
21	21	402,00	34,71
22	22	482,00	43,42
23	23	562,00	52,12
24	24	642,00	60,83
25	25	722,00	69,53
26	26	802,00	78,24
27	27	818,00	79,98
28	28	1002,00	100,00
29	29	875,00	86,18
30	30	713,00	68,55
31	31	618,00	58,22
32	32	513,00	46,79
33	33	493,00	44,61
34	34	447,00	39,61
35	35	416,00	36,24
36	36	387,00	33,08
37	37	345,00	28,51
38	38	311,00	24,81
39	39	285,00	21,98
40	40	265,00	19,80
41	41	245,00	17,63
42	42	226,00	15,56
43	43	208,00	13,60
44	44	193,00	11,97
45	45	180,00	10,55
46	46	170,00	9,47
47	47	162,00	8,60
48	48	155,00	7,83
49	49	146,00	6,86
50	50	137,00	5,88
51	51	128,00	4,90
52	52	119,00	3,92
53	53	110,00	2,94
54	54	101,00	1,96
55	55	92,00	0,98
56	56	83,00	0,00

Таблица 4. Результаты эксперимента при скорости фильтрования 2,82 м/ч

№ п/п	Время эксперимента, мин	Показание, $\mu\text{S}$	Относительная величина $C/C_{max}$ , %
1	1	135,00	0,00
2	2	135,00	0,00
3	3	135,00	0,00
4	4	135,00	0,00
5	5	135,00	0,00

6	6	170,00	1,58
7	7	209,00	3,34
8	8	250,00	5,19
9	9	700,00	25,51
10	10	2350,00	100,00
11	11	1250,00	50,34
12	12	1008,00	39,41
13	13	845,00	32,05
14	14	689,00	25,01
15	15	604,00	21,17
16	16	515,00	17,16
17	17	435,00	13,54
18	18	397,00	11,83
19	19	352,00	9,80
20	20	317,00	8,22
21	21	277,00	6,41
22	22	237,00	4,60
23	23	228,00	4,20
24	24	209,00	3,34
25	25	181,00	2,08
26	26	162,00	1,22
27	27	144,00	0,41
28	28	143,00	0,36
29	29	140,00	0,23
30	30	139,00	0,18
31	31	138,00	0,14
32	32	138,00	0,14

Таблица 5. Результаты эксперимента при скорости фильтрования 3,02 м/ч

№ п/п	Время эксперимента, мин	Показание, $\mu\text{S}$	Относительная величина $C_t/C_{max}$ , %
1	1	47,00	0,00
2	2	47,00	0,00
3	3	47,00	0,00
4	4	47,00	0,00
5	5	47,00	0,00
6	6	101,00	3,67
7	7	116,00	4,68
8	8	139,00	6,25
9	9	145,00	6,65
10	10	701,00	44,40
11	11	1520,00	100,00
12	12	1213,00	79,16
13	13	675,00	42,63
14	14	534,00	33,06
15	15	453,00	27,56

16	16	436,00	26,41
17	17	389,00	23,22
18	18	334,00	19,48
19	19	299,00	17,11
20	20	264,00	14,73
21	21	234,00	12,70
22	22	207,00	10,86
23	23	185,00	9,37
24	24	170,00	8,35
25	25	142,00	6,45
26	26	129,00	5,57
27	27	112,00	4,41
28	28	92,00	3,05
29	29	83,00	2,44
30	30	75,00	1,90
31	31	68,00	1,43
32	32	61,00	0,95
33	33	58,00	0,75
34	34	55,00	0,54
35	35	52,00	0,34
36	36	49,00	0,14
37	37	47,00	0,00