

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС)

Вурдова Надежда Георгиевна

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕМБРАННЫХ И СОРБЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ В ВОДОБОРОТЕ КРУПНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ
ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СБАЛАНСИРОВАННОСТИ

Специальность – 2.10.2. Экологическая безопасность

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант –
д-р техн. наук, профессор
Куликова Елена Юрьевна

Москва – 2024

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Основные производственные мощности предприятий нефтехимического комплекса относятся к I категории объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, что обязывает их разрабатывать и внедрять программу повышения экологической эффективности.

Технология переработки нефти неразрывно связана с использованием воды. Она играет важную роль в разделении, очистке и охлаждении нефтепродуктов, в производстве теплоносителей. Водоемкость большинства процессов достигает $100 \text{ м}^3/\text{т}$ нефти (*крупнотоннажное* производство).

Современное развитие нефтехимического комплекса требует пересмотра всего водного хозяйства предприятий в связи с новыми более жесткими требованиями к качеству используемой воды. В этой связи стоят задачи по разработке и внедрению экономически доступных и экологически приемлемых технологий очистки сточных вод (СВ), утилизации отходов, повторного использования очищенной воды с организацией замкнутых водооборотных циклов (ЗВС).

Анализ эффективности использования воды в совокупности с решением указанных задач становится неотъемлемым элементом стратегического планирования и управления, направленного на обеспечение устойчивого развития производственных процессов и соблюдение стандартов комплексного использования и охраны водных ресурсов (КИОВР), повышение экологической безопасности предприятий нефтехимического комплекса.

Для решения научно-технической задачи создания экономически обоснованных ЗВС необходимо, чтобы затраты на очистку СВ до приемлемого на производстве качества были ниже суммы стоимости получения технической воды из свежей и затрат на очистку СВ для сброса в водоем. В этом суть *принципа эколого-экономической сбалансированности* (ПЭЭС).

Обоснованный подход к развитию ЗВС базируется на решении ряда экологических, экономических, инженерно- и научно-технических проблем, характеризующихся: - усложнением и быстрым изменением современных промышленных процессов; - необходимостью значительных капитальных вложений для массовой замены существующих водоочистных технологий на малоотходные согласно новым требованиям перехода на НДТ; - необходимостью снижения экологических рисков (ЭР) за счет своевременного принятия обоснованных решений по реконструкции, модернизации или новому строительству водоочистных сооружений; - нехваткой технического опыта, объема научных исследований, разработок в области конструирования, а также дефицитом оборудования и инвестиций; - необходимостью преодоления явной зависимости от импорта, что является важным шагом для повышения независимости отрасли; - недостаточностью обмена знаниями и лучшими мировыми практиками отрасли.

Накопленный в отрасли за последние два десятилетия опыт проектирования и строительства водоочистных сооружений выявил фактически

неудовлетворительное качество очистки производственных СВ, как для максимального возврата воды в производство, так и для сброса в водоемы рыбохозяйственного назначения. Анализ существующих водоочистных технологий указывает на необходимость совершенствования, в первую очередь, для достижения глубины очистки воды, методов доочистки, а именно: сорбционного метода и деминерализации. Это соответствует положениям информационного технологического справочника НДТ ИТС 8-2022 «Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнение работ и оказание услуг на крупных предприятиях».

Традиционное для сорбционной очистки применение активированного угля (АУ) является затратным из-за его высокой стоимости, специальных требований к качеству предварительно подготовленной воды, а также отсутствием методов его восстановления. В этой связи особый интерес представляют природные материалы – дисперсные кремнеземы, в том числе, опоки. Основные их преимущества состоят в практически неограниченных запасах, широком распространении и дешевизне. Проведенные ранее исследования были направлены, в основном, на улучшение их адсорбционных свойств путем термохимической обработки, что удорожало материал и делало бесперспективным для применения в больших объемах. Обоснование использования опоки с позиции применения как фильтрующей, так и сорбционной загрузки, а также получения из отработанного материала вместо отхода вторичного материального ресурса (ВМР) не проводилось.

На стадии деминерализации СВ возможно применение методов ионного обмена, обратного осмоса или электродиализа. Для воды с соленостью до 6-8 г/дм³ бóльший потенциал имеет метод электродиализа (ЭД). Его применение облегчает предварительную подготовку воды перед стадией обессоливания. Тогда как обратноосмотические мембраны обладают высокой чувствительностью к образованию осадка карбоната кальция (*IL* - индекс Ланжелье), что требует применения дополнительной химической обработки. Это преимущество делает электродиализ более устойчивым к изменениям химического состава исходной воды. Кроме того, возможно снизить эксплуатационные затраты за счет уменьшения объема промывных вод по сравнению с другими методами. Существует резерв по интенсификации ЭД за счет использования импульсного электрического тока (ИЭТ) вместо традиционного постоянного, так как кроме величины плотности тока появляются дополнительные параметры регулирования. Путем варьирования формой амплитудой и частотой тока (либо потенциалом) можно управлять электрохимическим процессом диализа, главным образом, снизить удельные затраты электроэнергии – ключевом сдерживающем факторе применения ЭД

Отмеченные направления в большинстве своем находятся в стадии активного изучения, но примеров их реализации недостаточно, особенно в крупнотоннажных производствах. Поэтому совершенствование мембранных и сорбционных технологий в водообороте крупных предприятий и разработка механизмов оптимизации инвестиций при проектировании и строительстве

водоочистных сооружений является актуальной научно-практической проблемой.

Степень разработанности. Большой вклад в развитие теории и практики очистки промышленных нефтесодержащих сточных вод внесли отечественные ученые: Адельшин А.Б., Апельцин Э.И., Гришин Б.М., Ксенофонтов Б.С., Мацнев А.И., Мишуков Б.Г., Морозова К.М., Пономарев В.Г., Швецов В.Н., Серпокрылов Н.С., Смирнов В.И., Стрелков А.К., Степанов С.В., Яковлев С.В.

Теория адсорбции и современный опыт ведущих ученых в области создания сорбционных материалов для очистки сточных вод отражены в трудах Алыкова Н.М., Аюкаева Р.И., Бузаевой М.В., Кагановского А.М., Климова Е.С., Лисичкина Г.В., Николаевой Л.А., Политаевой (Собгайда) Н.А., Свергузовой С.В., Сироткина А.С., Смирнова А.Д., Тарасевича Ю.И. и др.

Российскими и зарубежными исследователями показана актуальность комплексной очистки сточных вод нефтехимических производств с применением мембранных методов и на их основе новых технологических схем. Сформулированы основы и продолжают развиваться теоретические положения электромембранного разделения. Существенный вклад в развитие теории электрохимической очистки сточных вод, в т. ч. электродиализа, внесли работы ученых: Виноградова С.С., Гнусина Н.П., Генкина, В.Е., Гребенюка В.Д., Духина С.С., Заболоцкого В.И., Кудрявцева В.Н., Краснобородько И.Г., Ласкорина Б.Н., Назарова В.Д., Никоненко В.В., Первова А.Г., Равичева Л.В., Рогова В.М., Смагина В.Н., Фесенко Л.Н., Фомичева В.Т., Харламовой Т.А., Шапошника В.А. и др.

Экологическая безопасность любого промышленного предприятия требует решения эколого-экономических задач, которые неразрывно связаны с вопросами оценки экологических рисков (ЭРПП). Современные представления об экологических и техногенных рисках сформированы учеными Вагановым П.А., Азаровым В.Н., Гусевым А.А., Куликовой Е.Ю., Мочаловой Л.А., Мурзиным А.Д., Музалевским А.А., Новоселовым А.Л., Тихомировым Н.П., Рюминой Е.В. и др.

Для поддержки реализации эколого ориентированных проектов важно установить качественные индикаторы и одновременно решить научную проблему - совершенствование существующих и разработка новых методов оценки и управления ЭР предприятия, связанных с внедрением современных ресурсосберегающих и природоохранных технологий.

Данная работа выполнена в рамках Федеральных проектов «Оздоровление Волги» и «Внедрение наилучших доступных технологий» Национального проекта «Экология» (НП «Экология») на 2018-2024 гг., соответствует задачам, поставленным в Федеральных законах №416 «О водоснабжении и водоотведении», № 390-ФЗ от 28.12.2010 «О безопасности», согласуется с задачами Федерального закона «Об охране окружающей среды» №7-ФЗ от 10.01.2002.

Цель исследования состоит в совершенствовании мембранных и сорбционных технологий очистки воды для максимального повторного использования и разработке механизмов оптимизации инвестиций при проектировании и строительстве водоочистных сооружений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие научно-технические задачи:

1. Исследовать современный уровень эффективности использования воды на предприятиях отрасли с учетом постоянного роста и развития производств, разработать концепцию развития водного хозяйства, направленную на комплексное использование и охрану водных ресурсов.

2. На основании анализа известных технологий и опыта в проектировании и строительстве водоочистных сооружений определить критерии выбора рациональных решений.

3. Исследовать целесообразность использования природного сорбента - опоки вместо традиционных сорбционных и фильтрующих материалов, обосновать возможность ее применения в крупнотоннажных водооборотных системах.

4. Исследовать эффективность электродиализа на импульсном электрическом токе при сравнении с постоянным для очистки сточных вод.

5. Разработать технологии с использованием изученных сорбционных и электрохимических методов водоочистки.

6. Провести анализ различных методик оценки капитальных и эксплуатационных затрат на модернизацию, реконструкцию или строительство объектов водного хозяйства промышленного предприятия и разработать методику обоснования инвестиций на основе ПЭЭС.

7. Инициировать развитие производства отечественного экологического оборудования (в соответствии с ФП «Внедрение НДТ»).

Основная идея работы состоит в разработке и внедрении удовлетворяющих экологическим требованиям экономически приемлемых технологий для максимального использования оборотной воды на предприятии, основанном на принципе эколого-экономической сбалансированности.

Объектом исследования являются системы водоснабжения и водоотведения промышленных предприятий нефтехимического комплекса.

Предмет исследований – технологии очистки сточных вод, удовлетворяющие новым требованиям к качеству очищенной воды; модели и методы управления экологической устойчивостью предприятий, основанные на количественной оценке экологических рисков; методы проектирования современных малоотходных систем водоподготовки и водоотведения.

Область исследования соответствует п.п. 3, 10, 11 паспорта специальности 2.10.2 «Экологическая безопасность».

Методы исследования. В основу исследований свойств СВ, сорбционных материалов, ионообменных мембран положены современные взаимодополняющие физические и физико-химические методы исследований: сканирующая электронная микроскопия, электронная микроскопия, метод низкотемпературной адсорбции азота, спектрофотометрия, рентгенофазовый анализ, импульсная вольт-амперометрия, фотометрия.

В исследовании эколого-экономических рисков применены теория управления предприятием, концепция устойчивого развития, теории экологического и риск-менеджмента, а также методы экспертных оценок.

Исследования включали изучение и систематизацию требований к проектированию объектов водопроводно- канализационного хозяйства на опасных производствах, фундаментальных принципов наилучших доступных технологий.

Обработку результатов экспериментов производили с использованием программно-инструментальных методов математической статистики. Выполнен регрессионный анализ ряда экспериментальных данных с использованием коэффициента детерминации R^2 .

Научная новизна заключается в следующем:

1. Впервые разработана система развития водного хозяйства промышленных предприятий с большой водоемкостью, заключающаяся в комплексной оценке эффективности использования воды и утилизации образующихся отходов, что позволяет организовать ЗВС; на основе принципа эколого-экономической сбалансированности разработаны критерии оценки технологий и оборудования, применяемых для очистки сточных вод в крупнотоннажных системах.

2. Обосновано применение перспективных технологий, основанных на сорбционном методе и деминерализации электродиализом, для организации крупных водооборотных систем предприятий нефтехимического комплекса для осуществления перехода на принципы НДТ; процент использования воды в обороте увеличивается до 90% и более.

3. На основании структурной оценки и физико-химических свойств опоки обоснована и экспериментально подтверждена возможность и целесообразность ее использования взамен традиционных фильтрующих и сорбционных материалов; установлены общие закономерности, влияющие на технологические показатели сорбционной очистки сточных вод; полученный сорбент в 20 раз дешевле АУ, но обладает достаточной высокой сорбционной емкостью, что позволяет в 2-3 раза чаще производить его замену, при этом научно обоснована технология получения из отработанного сорбента вторичного материального ресурса с позиции показателя степени опасности.

4. Теоретически и экспериментально подтверждены закономерности электродиализного метода очистки сточных вод с использованием импульсного электрического тока. Впервые установлено, что использование импульсного униполярного электрического тока плотностью 5-15 мА/см², частотой 500±20 Гц, скважностью импульсов 2, позволяет более, чем в 2 раза снизить энергозатраты на деминерализацию и в 1,2-1,5 раза увеличить скорость массообмена. Показана возможность регулирования явлений электроконвекции, кислотной диссоциации и подавления генерации ионов водорода и гидроксила. Впервые предложен механизм массопереноса, лежащий в основе преимуществ использования импульсного электрического тока, таких как, уменьшение поляризации мембран, снижение образования отложений на мембранах.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- На основе полученных данных была усовершенствована технология доочистки производственных сточных вод с использованием опоки. Выполнены расчеты промышленных фильтров с двухслойной загрузкой. Применение опоки в качестве фильтрующего материала вместо песка позволило уменьшить объем

промывной воды и частоту промывок, уменьшить типоразмер промывных насосов, что повлияло на энергоэффективность станции в целом. Из отработанного фильтрующего и сорбционного материала получен вторичный материальный ресурс вместо отхода III класса опасности;

- Обоснованы технологические и конструктивные параметры промышленных электродиализаторов в крупнотоннажных водооборотных системах. Это решение позволяет снизить затрат электроэнергии в 1,2-2,4 раза и увеличивает обменную производительность мембраны в 2 раза по сравнению с использованием постоянного электрического тока;

- На примере трех предприятий нефтехимического комплекса (ООО «ЗапСибНефтехим», ООО «НГХК», НПЗ ЮАО) показана эффективность применения опоки, как с позиции рационального природопользования, так и с экономической;

- Разработана методика выбора оптимальных решений на ранних стадиях подготовки к модернизации, реконструкции или новому строительству водоочистных сооружений, базирующаяся на системе оценок экологических рисков, капитальных и эксплуатационных затрат и позволяющая выбрать проект с приемлемой эффективностью;

- Подготовлены и реализованы проекты модернизации, реконструкции и строительства водоочистных сооружений промышленных предприятий, основанные на концептуальном подходе к обоснованию инвестиций, разработанных методиках эколого-экономических расчетов, которые позволяют оптимизировать проектные решения на начальной стадии с поэтапным внедрением. По ряду проектов получено положительное заключение государственной экспертизы проектной документации. Резюме проектов приведено в работе в Приложении Б;

- Разработанные технические и технологические решения по очистке сточных вод вод защищены 6 патентами. На их основе разработаны и внедрены технологии и технические устройства: ТУ3859-002-44487397-2005. «Блочно-модульная установка «UniRain»; ТУ3859-001-44487397-2005. «Блочно-модульная установка «UniDEF»; ТУ 28.2912-097-00137182-2022. «Установки водоподготовки»; ТУ 28.2912-098-00137182-2022. «Установки очистки сточных вод».

- На основании результатов работы освоен серийный выпуск экологического оборудования предприятиями машиностроения АО «ГМС Нефтемаш», ООО «ЮниЭкоПром».

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработана концепция совершенствования водохозяйственной системы предприятий нефтехимического комплекса, позволяющая организовать замкнутые водооборотные системы, направленная на комплексное использование и охрану водных ресурсов; принцип эколого-экономической сбалансированности, позволяющий установить критерии оценки технологий и оборудования, применяемых для очистки сточных вод в крупнотоннажных системах.

2. Установлены общие закономерности, влияющие на технические и технологические показатели сорбционной очистки сточных вод. Применение опоки в качестве сорбционной и фильтрующей загрузки вместо традиционно применяемых на практике материалов, позволяет решать двуединую задачу минимизации экономических затрат с одновременно высокой степенью очистки воды для организации замкнутых водооборотных систем и вовлечения в оборот экологически безопасных вторичных материальных ресурсов. Обоснована возможность применения для этих целей дисперсных кремнеземов различных месторождений.

3. Обоснован механизм и эмпирические зависимости массопереноса при электродиализном обессоливании сточных вод с использованием импульсного электрического тока взамен традиционного постоянного тока.

4. Обоснованы с экономических и технологических позиций усовершенствованные процессы для организации крупных водооборотных систем, соответствующие НДТ, и базирующиеся на использовании отечественного оборудования и материалов.

5. Разработана методика выбора оптимальных решений на ранних стадиях подготовки к модернизации, реконструкции или строительству водоочистных сооружений, базирующаяся на системе оценок экологических рисков, капитальных и эксплуатационных затрат и позволяющая выбрать проект с приемлемой эффективностью.

Степень достоверности и апробация результатов. Научные результаты выполненной работы обладают высокой степенью достоверности, что обеспечивается использованием общепризнанных экспериментальных методик и метрологических характеристик поверенных средств измерения, а также статистической обработкой результатов измерений. Отдельные результаты физико-химического анализа получены в аккредитованных испытательных лабораториях (центрах). Результаты исследования подтверждаются сходимостью аналитических, лабораторных, пилотных испытаний, а также получением положительных заключений и согласований уполномоченных организаций по разработанным техническим условиям, технологическим регламентам, проектной документации.

Апробация результатов. Основные положения диссертации доложены, обсуждены и одобрены на международных и всероссийских конференциях, симпозиумах, форумах, выставках с 1996г. по н.в., в том числе: «Сертификация, экология, энергосбережение». Международная научно-практическая конференция (Анталья,1998г); «Надежность и долговечность строительных материалов и конструкций»; «Гальванотехника и обработка поверхности». Всероссийская научно-техническая конференция (г.Москва,1996-99гг); «Мембранные и сорбционные процессы». Международная конференция (г.Сочи,2000г.); «Безопасность жизнедеятельности, XXI век». Международный научный симпозиум (Волгоград,2001г.); Ежегодная международная промышленная выставка «Металл-Экспо» (г.Москва,2018-20г.г.); «Экология, промышленная безопасность и охрана труда». Ежегодный международный форум. «Seymartec Ecology» (г.Челябинск,2019г,2020г.); «Яковлевские чтения»: Системы

водоснабжения и водоотведения. Современные проблемы и решения. XVII Международная научно-техническая конференция (г.Москва, 2022г.); 80-я Всероссийская научно-техническая конференция «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре», г.Самара, 2023г.; «Современные технологии в области защиты окружающей среды и техносферной безопасности: Всероссийская научная конференция с международным участием, 2023г. г.Казань; «Технологии очистки воды: «Техновод» XIV и XV Международная научно-практическая конференция г.Кисловодск, 2023г, 2024г. и др.

Реализация работы. Диссертация базируется на результатах исследований, выполненных в течение 1996-2023г.г. лично автором и под его руководством при подготовке магистерских диссертаций (НИТУ МИСИС, НИУ ВШЭ, ВолГТУ). А также личного опыта реализации более двадцати проектов строительства и реконструкции водоочистных сооружений для предприятий ПАО «Газпром», ПАО «Роснефть», ПАО «Лукойл», ПАО «Новатэк», ПАО «Сибур холдинг, ПАО «ЧТПЗ», ЕВРАЗ, ОАО «НКМК», ПАО «НКНХ» и др. Резюме проектов приведено в диссертационной работе в Приложении Б.

Личный вклад автора включает постановку цели и задач исследования, выбор и анализ материалов из научно-технических источников, проведение теоретических исследований, планирование и выполнение экспериментальных исследований, а также обработку и анализ полученных результатов; разработке и практической реализации перспективных технологий на основе сорбционных и электрохимических методов, направленных на рациональное природопользование и экологическую безопасность промышленных предприятий; в разработке теоретических и модельных исследований и их применении в практике проектирования промышленных объектов. Научные публикации и заявки на изобретения выполнены лично автором и в соавторстве.

Опираясь на собственный научный и практический опыт, автор принимал участие в работе технической рабочей группы «Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях» (ТРГ-8), созданной Минпромторгом РФ, Приказ №809 от 15.03.2022, по актуализации справочника НДТ ИТС 8-2022.

Публикации. По теме диссертации опубликовано – 67 работ, в том числе 1 монография, 2 учебника и учебных пособий, 23 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ, из них 7 статей в рецензируемых журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Science, Scopus, CA(pt). Автор имеет - 6 патентов по теме диссертации.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения и приложений. Работа изложена на 404 страницах и содержит 108 таблиц и 101 рисунок, 7 приложений. Список использованной литературы включает 522 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, приведены общая характеристика работы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, определены объект и предмет исследования, показана научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе «Анализ использования воды на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях, проблемы и перспективы» рассмотрены основные тенденции развития отрасли (План 2030) и связанные с этим проблемы экологического воздействия предприятий на водные ресурсы в регионе размещения, а также проведен анализ направления развития их систем водоснабжения и водоотведения.

Нефтеперерабатывающие и нефтехимические предприятия (НПП и НХП) за последнее десятилетие претерпели сильные изменения, связанные с внедрением новых установок с увеличением глубины переработки и удвоением объемов выпуска сырья для последующего производства базовых компонентов – этилена и пропилена, которое вырастет более, чем в 4 раза.

С ростом глубины переработки нефти (количества стадий) возрастает водоемкость процессов (рис.1): водопотребление на производственные нужды и количество производственных сточных вод (табл.1). Например, на предприятиях, построенных по технологиям XX века, на 1т перерабатываемой нефти расходуется в среднем 0,8-1,6 м³ свежей воды и 17,0-27,0 м³ оборотной воды, а на современных НХП – в 2-10 раз больше и достигает 100 м³. По данным (табл. 1) наблюдается рост удельного водопотребления. В значительной степени это увеличение происходит за счет количества оборотной (охлаждающей) воды.

Таблица 1 – Удельное водопотребление на единицу продукции

№ пп	Тип производства (стадии переработки, рис.1)	Удельное водопотребление производства*, м ³ /т нефти
1	НПЗ простые, топливного типа (I и II стадии)	$\frac{5}{17}$
2	НПЗ сложные, топливно-масляного типа с нефтехимическим производством (III и IV стадии)	$\frac{2}{50}$
3	Нефтехимические комплексы (НХП) (V и последующие стадии)	$\frac{2}{100}$

*В числителе – расход свежей воды, в знаменателе – оборотной.

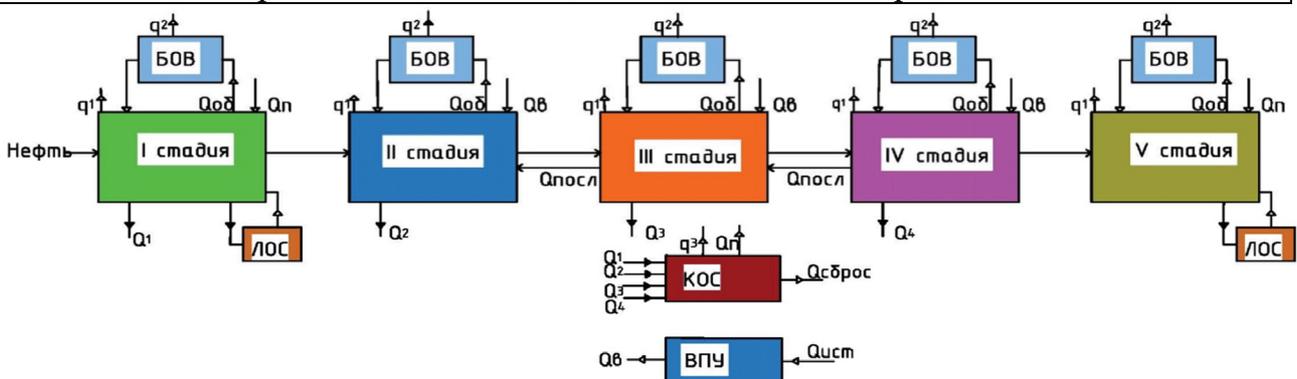


Рисунок 1 – Нефтеперерабатывающее предприятие, реализующее I-V стадии переработки: БОВ – блоки оборотного водоснабжения; КОС – канализационные очистные сооружения; ВПУ – водоподготовительная установка; $Q_{уст}$ – расход свежей воды; $Q_{в}$ – расход водопроводной воды; $Q_{об}$ – расход оборотной воды; $Q_{н}$ – расход подпиточной воды, компенсирующей безвозвратные потери; $q_1, q_2, q_3; Q_{1..II}$

– расход СВ с установок; $Q_{сбр}$ – расход очищенной сточной воды; ЛОС – локальные очистные сооружения

Производительность блоков оборотной вод (БОВ) может достигать нескольких десятков тысяч кубических метров в час на современных заводах (в составе производственных кластеров), т.е. сотни миллионов кубических метров воды в год (*крупнотоннажное* производство). Очевидно, что эффективное управление водными ресурсами становится важным фактором устойчивости предприятия и должно быть направлено на соблюдение стандартов КИОВР.

В работе предложено проводить анализ эффективности использования воды на предприятии не менее, чем по восьми параметрам с сопоставлением достигаемых технологических показателей, характеризующих каждую из применяемых на объекте технологий, с установленными нормативными документами в области охраны окружающей среды технологическими показателями НДТ. Для оценки водоэффективности определяли коэффициенты (табл. 2).

Таблица 2 – Коэффициенты водоэффективности

Коэффициенты	Уравнение
Процент использования воды в обороте	$P_{об} = \frac{Q_{об}}{Q_{ист} + Q_{об} + Q_c} \cdot 100\%$, (1)
Коэффициент рациональности использования воды источника	$K_{и} = \frac{Q_{ист} + Q_c - Q_{сбр}}{Q_{ист} + Q_c} \leq 1$, (2)
Процент потерь воды	$P_{пот} = \frac{Q_{ист} + Q_c - Q_{сбр}}{Q_{посл} + Q_{ист} + Q_{об} + Q_c} \cdot 100\%$, (3)

где $Q_{ист}$, $Q_{об}$ – количество воды, забираемой из источника и используемой в обороте, Q_c – количество воды, поступающей с сырьем (0,5% по ГОСТ Р 55858-2020), в среднем $P_{об} \approx 60\%$, на некоторых промышленных предприятиях $P_{об}$ доходит до 90-96%; $Q_{сбр}$ – количество сбрасываемой воды, в среднем $K_{и} \approx 0,27$; на некоторых промышленных предприятиях $K_{и} = 0,75-0,87$; $Q_{посл}$ – количество воды, используемой последовательно, в среднем по промышленным предприятиям страны $P_{пот} = 2,5$.

На рис.1 приведена схема предприятия, реализующего V стадий переработки нефти, его водный баланс представлен в табл.3.

Таблица 3 – Водный баланс, тыс.м³/сут, для НХП третьего типа, мощностью переработки сырья 15 млн.т в год

Параметры	Значение							
	q1	q2	q3	Qп	Qв	Qпосл	Qлос	
Q _I	18,0	3,0	0,4	0,5	21,9	-	-	1,0
Q _{II}	10,0	1,0	0,2	0,1	-	11,3	-	-
Q _{III}	11,9	3,0	0,4	0,5	-	9,7	6,1	-
Q _{IV}	0,7	0,5	0,1	0,1	-	1,1	0,3	-
Q _V	0	0,1	0,1	0,1	-	0,3	-	8,0
Q _{сброс}	34,2							
Q _{ист}	50,7							
Q _{об}	240							

Рассчитанные значения коэффициентов показывают, что несмотря на наличие БОВ и доли воды в обороте $P_{об} = 83\%$, эффективность ее использования достаточно низкая $K_{и} = 0,33$. Это

свидетельствует о большом объеме водоотведения на КОС и далее – в реку ввиду

отсутствия необходимой степени очистки воды для производственных нужд. При этом количество свежей воды из реки остается достаточно большим.

На рис.2 представлена схема классической технологии очистки СВ предприятий отрасли, которая включает отстаивание и/или механическую фильтрацию (МО), физико- химический (ФХО) и биохимический метод (БХО), а также методы доочистки – сорбцию и обеззараживание (рис. 2, I).

Редко применяют доочистку деминерализацией и умягчением. Каждый метод позволяет получить определенный эффект очистки по конкретным показателям. Очищенные СВ, как правило, отводят в близлежащие водоемы.

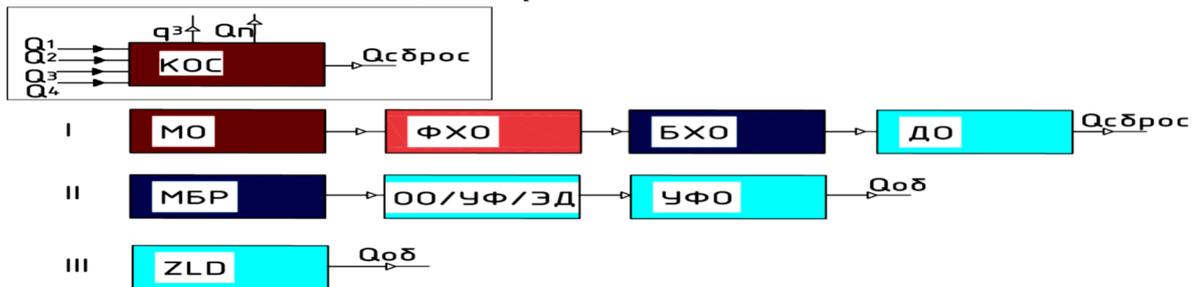


Рисунок 2 – Последовательность перехода на технологии «нулевого сброса»: I - классическая технология: МО – механическая очистка, ФХО – физико-химическая очистка, БХО – биохимическая очистка, ДО – доочистка (фильтрование, обеззараживание), II – глубокая доочистка: МБР – мембранное илоразделение, ОО/УФ/ЭД – обратный осмос/ ультрафильтрация/ электродиализ; УФО – УФ-обеззараживание, III - нулевой жидкий сброс: ZLD – технология с получением твердых солей и высокоочищенной воды; остальные обозначения см.рис.1

Проведенный анализ работы очистных сооружений показал, что достижение требуемых нормативов к сбросу в водоемы первой категории водопользования практически никогда не соблюдается. Это относится и к низкой эффективности работы основного блока сооружений (рис. 2, I), но в большей степени к сооружениям доочистки (рис. 2, II). Первые два метода (МО, ФХО) являются минимальными для возврата части воды. Каждый последующий позволяет вернуть все больший процент. Для современных хорошо работающих сооружений он составит, %, соответственно: 20 → 60 → 80 → 93 → 98 (рис.3). То есть, для возврата максимального количества очищенных стоков в оборот решающими являются методы дополнительной очистки в соответствии с НДТ, в том числе сорбционный и электродиализ.

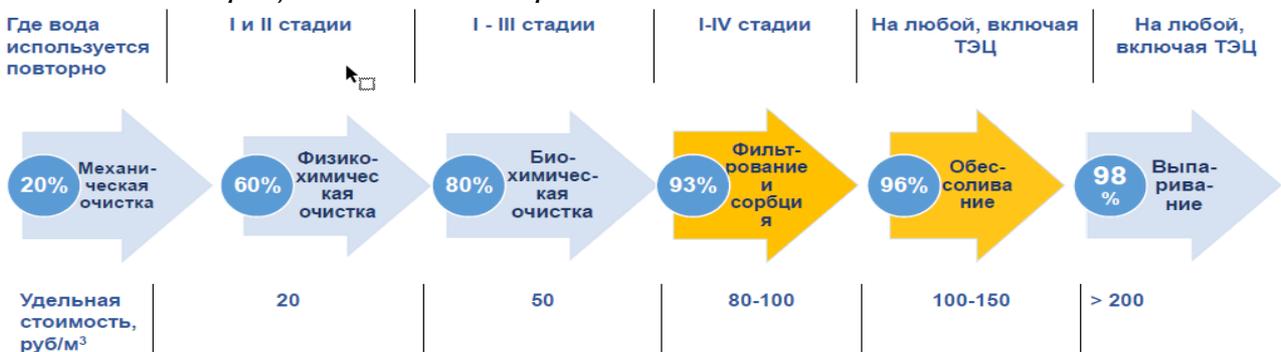


Рисунок 3 - Полный цикл очистки сточных вод для организации замкнутых водооборотных систем, % возврата воды в производство, удельная стоимость куб. м очищенной воды

В работе выполнен анализ технологий очистки СВ крупнейших предприятий отрасли. Лишь немногие нефтехимические гиганты смогли запустить или запланировать замкнутые водооборотные системы (рис.2, I+II+III), применяя так называемые технологии *ZLD* (рис.2, III), что, несомненно, является перспективным направлением модернизации производства. Ввиду высокой стоимости жизненного цикла таких систем (рис.3) для поддержки принятия решения об инвестициях необходимо предварительно разработать: 1) технико-экономическое обоснование (несколько вариантов); 2) провести маркетинговые исследования; 3) осуществить выбор поставщиков, а также оценить возможные последствия от реализации или «не запуска» проекта с технической, экономической и экологической позиций. Для этого разработаны рекомендации по применению указанного подхода к оценке инвестпроектов.

Любой проект реконструкции, модернизации или нового строительства начинается с обоснования инвестиций. Предложено ввести пять критериев оценки технологий и оборудования: 1) научный, 2) технический, 3) экологический, 4) социальный и 5) экономический.

Ведущая роль отводится – *научному* критерию. Проведение НИОКР и опытно-промышленные испытания позволяет разработать корректное техническое задание на проект. Это в конечном итоге при начальных затратах в 2-3 % позволит сэкономить до 30 % при его реализации.

Технический критерий – на основе научно обоснованных данных производится корректный подбор оборудования и выполняются технологические расчеты.

Экологический критерий состоит в организации многократного использования воды в технологических процессах. При этом учитывается необходимость утилизации образующихся отходов при водоподготовке и очистке стоков.

Социальный критерий отражает имидж предприятия, степень сотрудничества с администрацией города, района.

Экономический – опирается на выполнение всех перечисленных пунктов, что позволяет адекватно оценить экономическую составляющую с возможностью поэтапной реализации всего проекта.

На основании приведенного критического анализа методов и технологий очистки СВ с позиций организации замкнутых систем водного хозяйства наиболее реальной видится возможность поэтапной реализации проектов по реконструкции или строительству водоочистных сооружений. За счет модернизации отдельных блоков доочистки на сорбционных фильтрах, и применения электродиализных установок, можно получить техническую воду вплоть до глубоко обессоленной (рис.3). При этом поиск и применение новых фильтрующих материалов в качестве загрузок осветительных и сорбционных фильтров на основе природных сорбентов, а также нестационарных электрохимических методов деминерализации позволяет добиться необходимого эколого-экономического баланса для совершенствования системы водного хозяйства, его модернизации согласно разработанным критериям.

Во **второй** главе «Объекты и методы исследований» приведены данные по составу и свойствам СВ современных нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий. Используются методики количественного анализа, применяемые в практике заводских лабораторий.

В связи с развитием производства, изменяются требования к количеству и качеству воды, используемой в технологических процессах. Поэтому необходимо провести комплексный анализ систем водоснабжения (водно-химического режима) и водоотведения предприятий с обоснованием их реконструкции и модернизации. Это требует проведения опытно-промышленных испытаний технологий и оборудования, что является обязательным этапом обоснования инвестиций. Важными показателями, подлежащими постоянному контролю, являются: коэффициент упаривания (степень концентрирования солей в охлаждающей воде в системе водооборота), солесодержание, щелочность, жесткость, рН, содержание углекислоты, микробиологические. В случае несоответствия ВХР требованиям производят продувку на КОС. Восполнение водных потерь (капельный унос на градирнях, продувки, испарение) производят за счет подпитки оборотных систем свежей водой, как правило, специально очищенной на ВПУ (рис.1). Подготовка подпиточной воды нужного качества имеет решающее значение для обеспечения нормального хода технологических процессов химических и нефтехимических производств, а также для многократного и экономного ее использования. Приведены методики проведения анализов и расчетные показатели для оборотной воды. Опираясь на указанные методики, выполнено исследование ВХР оборотных систем нефтеперерабатывающего завода ЮАО (глава 5).

Для оценки возможности повторного использования очищенной СВ проводили измерения по ключевым показателям. Для этих целей применяли стандартные методики ПНД Ф, МВИ или РД, согласно справочнику «Характеристики загрязняющих веществ» (утв. Распоряжением правительства РФ от 08.07.2015 №1316-р). Исследования качественного состава сточных вод в 2002-2022 гг. вели на реальных объектах отрасли. Доочистку сточных вод предприятий исследовали сорбционным методом. В качестве фильтрующих материалов для загрузки осветлительных и сорбционных фильтров использовали природные минералы, опоки Каменнорского месторождения (Астраханская обл.). Кроме того, проведено сравнение фильтрующих и сорбционных свойств опок Саратовской и Ульяновской областей, опок Свердловской области под торговыми марками «ОДМ-2Ф» и сорбента «АС», песка Волгоградской области, гидроантрацита марки А, крошки диатомитовой «Diamix Aqua».

Опоки так же, как диатомиты и трепелы, образуют группу дисперсных кремнеземов. Дисперсные кремнеземы (ДК) или, согласно петрографическим определениям – опал-кристобалитовые породы, относятся к числу полезных ископаемых, характеризующихся широким диапазоном полезных свойств, которые имеют разнообразные области применения в народном хозяйстве. Поэтому, важнейшим аспектом при использовании ДК в качестве сорбционных материалов является выявление возможности их взаимозаменяемости на основе изучения физико-химических и адсорбционных свойств.

В соответствии с ГОСТ, определяли основные физико-химические и механические характеристики фильтрующих материалов: гранулометрический состав, эквивалентный диаметр, плотность насыпную, химическую стойкость и механическую прочность (измельчаемость и истираемость).

В работе приводятся методики экспериментальных исследований химического состава микроструктуры и текстуры опок. При этом использовались методы электронной микроскопии, рентгеновской дифракции; методом низкотемпературной адсорбции азота получали удельные площади поверхности, распределение пор по размерам, изотермы адсорбции.

Опоки Каменнаярские являются достаточно твердыми образованиями. Для их использования требуются исследования с целью пробоподготовки. В целом, в работе исходили из необходимости дальнейшего применения полученных результатов для разработки технологии сорбционной очистки промышленных СВ в больших объемах. Этим обусловлена первоочередная задача в изучении максимально пригодного для указанной цели недорогого сорбента. Общая схема подготовки материала приведена на (рис. 4).



Рисунок 4 - Схема получения сорбента

Во второй главе приведены основные кинетические уравнения адсорбции, использованные в работе (табл. 4).

Таблица 4 – Основные кинетические уравнения адсорбции

Модель	Уравнение
Модель Ленгмюра	$A = A_p \frac{K_L \cdot C_p}{1 + K_L \cdot C_p} \quad (4)$
Модель Фрейндлиха	$A = K_F C_p^{\frac{1}{n}} \quad (5)$
Модель Лагергрена	$\ln(A_p - A_t) = \ln A_p - K_1 \cdot t \quad (6)$
Модель Хо и Маккея	$\frac{t}{A_t} = \frac{1}{K_2 \cdot A_p^2} + \frac{t}{A_p} \quad (7)$

где K_L – константа Ленгмюра, характеризует энергию взаимодействия адсорбента с адсорбатом, г/ммоль ($\text{мг}/\text{дм}^3$); C_p – равновесная концентрация адсорбированного вещества, ммоль/л ($\text{дм}^3/\text{мг}$); K_F , n – константа Фрейндлиха и интенсивность адсорбции, зависят от природы адсорбента и адсорбата, а для n еще и от температуры, значение $1/n$ лежит в пределах от 0,1 до 1,0; A_p – равновесная адсорбционная емкость, мг/г, A_t – адсорбционная емкость, мг/г, за время t ; K_1 – константа скорости псевдо-первого порядка, 1/мин; K_2 – константа скорости псевдо-второго порядка, мг/(г мин).

Важными технологическими параметрами, необходимыми для расчета фильтра являются эффективность адсорбции; длина зоны массопереноса и скорость ее движения; время защитного действия адсорберов.

В качестве метода деминерализации в работе обосновано применение электродиализа (рис.2). Во второй главе приведены методики исследования режимов электродиализа: принцип работы установки, характеристика

применяемых ионообменных мембран, основные теоретические положения, методики проведения экспериментальных исследований по деминерализации модельных растворов в режиме приложения постоянного и импульсного электрического тока. Критериями эффективности работы электродиализаторов являются производительность, удельные энергозатраты, степень обессоливания, поток и числа переноса ионов.

В **третьей** главе «Сорбционное извлечение загрязняющих веществ из сточных вод на опоках» приведены основные теоретические предпосылки и развиты методики исследования сорбционных способностей природного материала – опоки.

При отведении воды в водоем рыбо-хозяйственного назначения необходимо сток, прошедшей стадию биологической очистки, доочищать по ряду показателей: БПК, ХПК, взвешенным, нефтепродуктам, фенолам, тяжелым металлам. В качестве блоков дополнительной очистки, как правило, применяют двухступенчатое фильтрование на фильтрах с песчаной и угольной загрузкой. Но не всегда и этот блок справляется с поставленными задачами, к тому же отдельные фракции кварцевого песка становятся труднодоступными, а загрузка активированным углем – весьма дорогостоящий расходный материал. Поэтому продолжается поиск материалов, увеличивающих грязеемкость фильтров, обладающих высокой механической прочностью, химической стойкостью и в тоже время более развитой, в сравнении с песком, удельной поверхностью.

Таким материалом, сочетающим фильтрующие и сорбционные свойства, могут служить различные природные сорбенты, а именно, дисперсные кремнеземы (опоки). Опоки имеют соизмеримую эффективность в сравнении с другими природными и искусственными материалами (табл. 5). Однако с учетом эколого-экономической эффективности, в том числе стоимости жизненного цикла материала, предпочтение отдано в пользу опок.

Таблица 5 - Характеристики различных сорбентов

Сорбент	Сорбционная емкость, мг/г						
	Углеводороды	Фенол	ПАВ	Fe ³⁺	Cr ³⁺	Zn ²⁺	Cu ²⁺
Опока 0,8-1,5мм	6,0	6,5	9,0	12,0	5,0	10,0	8,0
Силикагель 60	2,0	4,0	5,0	6,0	3,0	3,0	3,0
Уголь активированный БАУ 0,8-5,0мм	15,0	10,0	12,0	3,0	3,0	2,5	2,0
Полиуретан	2,5	3,5	4,0	2,5	2,5	2,5	3,0
Катионит КУ-23	-	-	-	4,5	8,5	10,0	5,0

Дисперсные кремнеземы различаются генезисом, физическими и физико-химическими свойствами. Преимуществом опок является их бóльшая твердость (по шкале Мооса, равной 6) и неразмокаемость в воде.

Проведены исследования химического и минерального состава образцов ДК ряда регионов РФ. Установлены общие закономерности, влияющие на технологические показатели сорбционной очистки сточных вод. Получены экспериментальные данные, показывающие достаточно высокую однородность

химического состава исследуемых образцов в пределах как одного месторождения, так и в целом по классу сырья. Получены уравнения зависимости величины адсорбции с использованием метиленового синего (МС) от химического состава образцов. С увеличением содержания кремнезема величина адсорбции метиленового синего, $A_{МС}$, уменьшается, $r=-0,779$; $p < 0,001$; $N=18$. Тогда как наличие других минералов показало положительную корреляцию: с увеличением содержания глинозема, глинистых минералов и оксидов щелочных и щелочно-земельных металлов $A_{МС}$ увеличивается, $r=0,677$; $0,01 < p < 0,001$; $r=0,954$; $p < 0,001$ при $N=18$; $r=0,931$; $p < 0,001$; $N=18$, соответственно (при $R^2= 0,808$; $0,856$; $0,903$; $0,912$). Это позволяет расширить минерально-сырьевую базу для получения адсорбентов на основе дисперсных кремнеземов. В (табл. 6) приведены некоторые физико-химические свойства опок различных месторождений.

Таблица 6 - Сравнения физико-химических свойств различных опок

Месторождение	Состав, %					Удельная поверхность, S , м ² /г	Радиус переходных пор, $r_{пер}$, нм	Суммарный объем пор, V_{Σ} , см ³ /г
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO			
Каменнаярское (Астраханская обл.)	86,30	8,75	1,21	1,23	0,47	120-150	6,2	1,34
Лысая Гора (Саратовская обл.)	82,80	6,60	4,95	0,78	5,18	88-100	2,4	1,34
Ульяновская обл.	78,90	3,22	2,56	0,89	1,52	99-120	15,8	1,43

В дальнейших исследованиях принята опока Каменнаярского месторождения (Астраханская обл.), обладающая более развитой удельной поверхностью.

В работе проведены исследования физико-химического состава и сорбционной структуры опоки: определены удельная поверхность, размеры частиц и энергетические характеристики сорбции твердых сорбентов при адсорбции из газовой фазы дисперсности сорбентов. С практической точки зрения важно иметь сорбент, обладающий высокой емкостью и удерживающей способностью, легко поддающийся регенерации, позволяющий снизить эксплуатационные расходы по сравнению с традиционными загрузками.

Проведено исследование влияния крупности образцов на их структурные особенности (рис.5, а, б). Установлено, что для нативной породы следует применять материалы более крупных фракций (рис.5, а). Выполнена проверка положения об улучшении сорбционных свойств опоки путем проведения термощелочной (или термокислотной) обработки. На (рис.5 в, г) показана изотерма адсорбции и распределение пор по размерам у обработанного образца. Полученные результаты показывают, что при обработке произошло частичное закрытие микро- и мезопор малых диаметров (менее 15нм), но при этом увеличилось общее количество пор за счет прироста макропор (~23%) и ожидаемо увеличилась сорбционная емкость материала (~18%). Поэтому, исходя из цели исследования по применению изучаемого материала в крупнотоннажных

процессах водоочистки, термохимическое модифицирование в дальнейшем не применялось по экономическим соображениям.

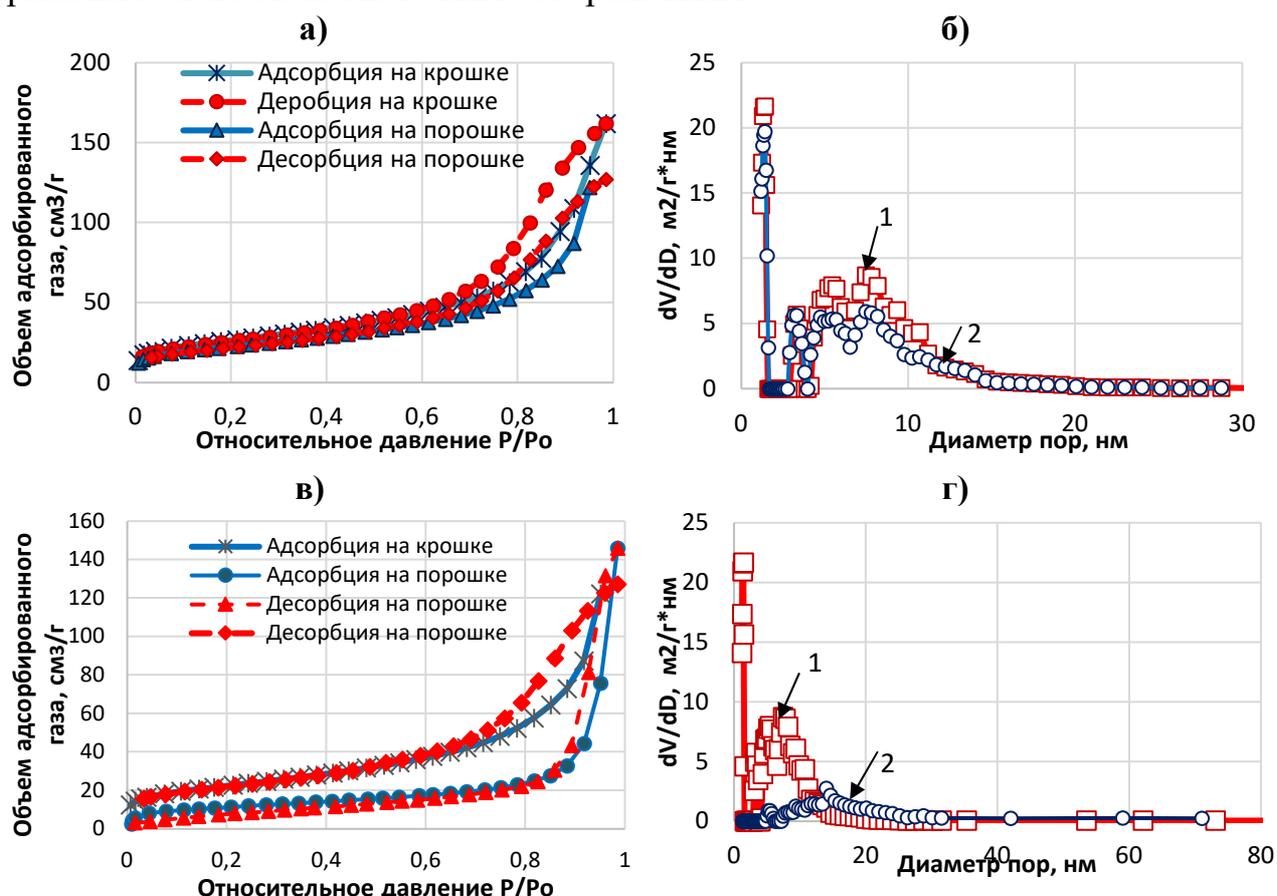


Рисунок 5 - Изотерма адсорбции азота (а, в) и распределение пор по размерам (б, г) для нативного (а, б) и модифицированного (в, г) образцов, фракций порошок (1) и крошка 0,8-1,7 мм (2)

В табл.7 показано сравнение структурных и адсорбционных свойств нативных и обработанных (модифицированных) материалов.

Таблица 7- Структурные и адсорбционные характеристики нативной и модифицированной опоки

Наименование показателя	Ед. измерения	Нативная порода		Модифицированная (0,7-1,8 мм)
		порошок	0,7-1,8 мм	
Суммарный объем пор, V_{Σ}	см ³ /Г	1,02	1,31	1,462
Объем сорбирующих пор, V_s	см ³ /Г	0,197	0,251	0,268
Объем мезопор, V_{me}	см ³ /Г	0,191	0,249	0,246
Объем микропор, V_{mic}	см ³ /Г	0,005	0,003	0,002
Средний диаметр мезопор, D_{me}	нм	11,197	9,495	23,770
Средний диаметр микропор, D_{mic}	нм	1,3	1,3	1,5
Удельная поверхность (БЭТ), $S_{уд}$	м ² /Г	77,210	91,408	49,243
Удельная поверхность (по Лэнгмюру), $S_{уд}$	м ² /Г	134,571	158,661	92,077
Энергия адсорбции, E_0	кДж/моль	5,961	5,960	5,691
Адсорбция метиленового синего, A_{MC}	мг/Г	-	42,5	50,4

Необработанный адсорбент крупностью 0,7-1,8 мм имеет удельную поверхность 158,66 м²/г, суммарный объем пор 1,31 см³/г, средний диаметр мезопор 9,5 нм.

Следующая серия экспериментов проведена по подбору фильтрующего материала для моделирования процесса доочистки промышленных СВ НПП на лабораторном стенде (рис. 6). Модельный многокомпонентный раствор имел состав: 0,05 М раствор Na₂SO₄ с добавлением нефтепродуктов (индустриальное масло), фенолов и солей тяжелых металлов Fe, Zn, Cu.

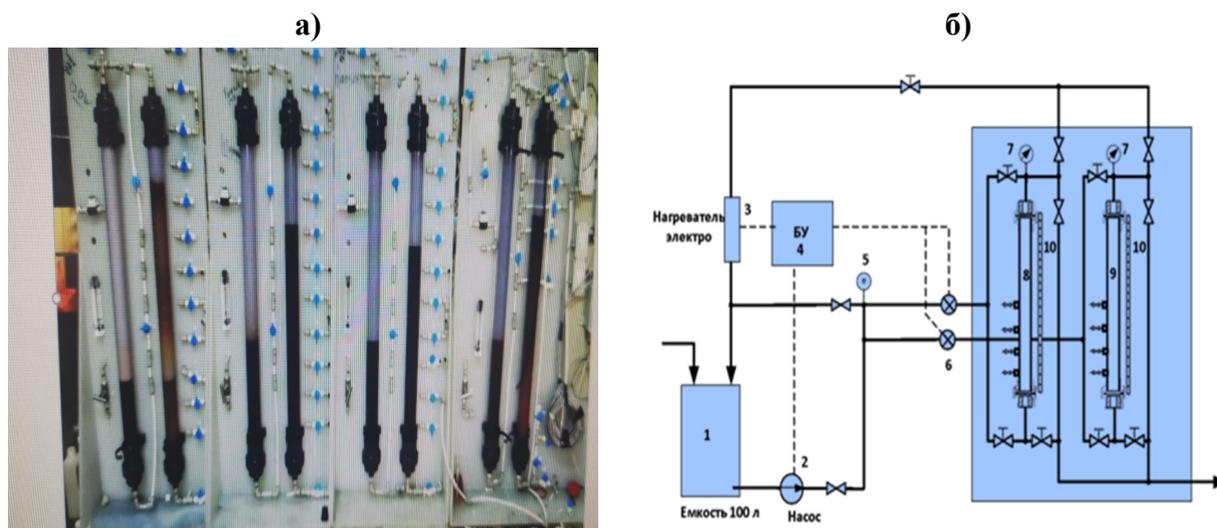


Рисунок 6 – Экспериментальный стенд (а) и его схема (б) для испытания фильтрующих загрузок: 1 – емкость объемом 100 л; 2 – насос; 3 – нагреватель 3 кВт; 4 – блок управления; 5 – термометр; 6 – расходомеры; 7 – дифманометры; 8, 9 – колонки; 10 – мерные линейки

Результаты лабораторных исследований на модельном растворе в статических условиях приведены в табл. 8. Эффективность очистки, Э, %, на опоке составила более 90% по исследуемым компонентам. Тяжелые металлы и фенол адсорбировались в течение 20 минут, тогда как нефтепродукты в течение часа.

Таблица 8 - Эффективность очистки воды от токсичных ионов металлов и органических соединений на опоке: объем воды – 3,0 дм³; масса сорбента – 0,2 кг

Ингредиент	Количество, мг/дм ³		Эффективность очистки, %
	До сорбции	После сорбции	
Железо (II)	3,0	0,003	99,0
Цинк	3,3	0,004	99,8
Медь	3,2	0,001	99,9
Индустриальное масло	5,0	0,050	98,0
Фенол	1,0	0,001	99,9

В следующей серии экспериментов сравнивали потребительские свойства традиционных фильтрующих и сорбционных материалов с опоками, для чего использовали кварцевый песок различного фракционного состава по ГОСТ Р 51641-2000, а также АУ марки АГ-3. Результаты представлены в табл.9. Эффективность опок на модельном растворе составила по БПК_п (69%) нитрит-анионам (55%), АПАВ (98%), фосфат-ионам (87%) и нефтепродуктам (91%). Из анализа данных табл.9 следует, что опока Каменнорская имеет сопоставимую с

АУ эффективность очистки, кроме показателей БПК и соединений азота. Что ожидаемо ввиду большей удельной поверхности и суммарного объема сорбирующих пор у АУ (соответственно 400 м²/г и 0,47 см³/г).

Таблица 9 - Очистка СВ в лабораторных условиях на разных типах фильтрующих сред

Ингредиенты	Концентрация в исход. воде, мг/дм ³	Концентрация в очищенной воде, мг/дм ³ , и эффективность очистки, Э, %					
		Песок кварцевый	Э	АУ	Э	Опока	Э
Взвешенные вещества	35,00	2,30	93	3,40	90	3,00	91
БПК _п	11,20	9,80	13	3,07	73	3,44	69
Нитрит-ион (по NO ₂)	0,31	0,35	-	0,13	58	0,14	55
Нитрат-ион (NO ₃)	38,40	25,10	35	5,80	85	15,10	61
АПАВ	0,34	0,015	96	0,009	97	0,006	98
Фосфат-ион	1,55	0,26	83	0,17	89	0,20	87
Нефтепродукты	0,54	0,40	26	0,04	93	0,05	91
ХПК	13,53	10,50	22	4,00	70	5,00	63

Однако полученное качество очистки на опоке многокомпонентного раствора соответствует нормам ПДК_{р-х}. Сравнение эффективности очистки опоки с песком кварцевым по всем показателям, кроме взвешенных веществ, показало ее однозначное преимущество.

Следующую серию экспериментов проводили с реальными природными и сточными водами в динамических условиях (табл. 10). В природную воду дополнительно вносили загрязнитель - определенное количество смеси мазута и дизельного топлива (5:1 объемных частей). Пропускали воду через слой сорбента, далее определяли содержание нефтепродуктов в воде на выходе.

Таблица 10 - Эффективность очистки воды от нефтепродуктов на опоке из природных и сточных вод НПП: объем воды -100 дм³; масса сорбента - 1,0 кг; скорость фильтрования - 8 м/ч

Место отбора воды	Количество, мг/дм ³		Эффективность очистки, %
	До сорбции	После сорбции	
Вода из реки	1,0	0,003	99,7
с добавлением смеси нефтепродуктов	50,0	0,01	99,9
	100,0	0,15	99,8
	1000,0	9,50	99,0
	10000,0	50,00	99,5
СВ 1-ой системы канализации НПП до физико-химической очистки	1000,0	14,20	98,5

На основе полученных данных были рассчитаны технологические параметры процесса доочистки производственных СВ: размеры и количество фильтров, объем загрузки, интенсивность промывок и т.п. Так как насыпная плотность загрузки из опоки в 1,8-2 раза меньше по сравнению с кварцевым песком, требуемый напор и количество воды для промывки фильтров снижаются

практически в 2 раза, так как уменьшается типоразмер насосов. Результатом применения опоки становится повышение пропускной способности сооружений, снижение затрат воды на собственные нужды и энергозатрат на промывку фильтров, и, в целом, упрощение технологии доведения качества воды до требуемых норм. Следовательно, исследуемый материал – опоку, целесообразно применять на очистных сооружениях большой производительности. На основе результатов проведенных исследований в работе была разработана технология с использованием сорбента из Каменноярских опок, научная новизна которой подтверждена патентом РФ № 2023113857.

Предложен комплексный подход к обеспечению экологической безопасности предлагаемых технологий. Для этого осуществлена переработка образующихся при очистке производственных сточных вод нефтесодержащих твердых отходов (отработанного адсорбента) III класса опасности. Применен способ реагентного капсулирования, как наиболее распространенный, относительно простой, и недорогой в реализации; подобрано оптимальное соотношение оксида кальция и опоки (1:1, 1:0,9 и 1:0,8) для литификации образцов; расчетным методом получен IV класс опасности литифицированного образца.

Проведены опытно-промышленные испытания по литификации отработанных нефтесодержащих отходов (НСО) – буровых шлам и донных отложений со шламонакопителя НСО с Уренгойского месторождения; установлены оптимальные соотношения НСО, оксида кальция и опоки. IV класс литифицированных образцов подтвержден протоколом аккредитованной лаборатории. В результате литификации отработанных НСО получены продукты утилизации, пригодные в качестве вторичного материального ресурса в производстве строительных материалов и дорожном строительстве.

В **четвертой** главе «Исследование очистки технологических сточных вод методом электродиализа в нестационарном токовом режиме» приведены результаты исследования использования электродиализного метода для очистки сточных вод. Были изучены физико-химические и массообменные характеристики гетерогенных ионообменных мембран с использованием модельных и реальных сточных водах с последующей разработкой технологии, которая позволяет получить не только высокоочищенную воду, но и минимизировать затраты электроэнергии и количество побочных продуктов – осадков СВ. Эксперименты проводили в лабораторных условиях на двух-, трех- и многокамерных установках с ионообменными мембранами, выпускаемыми АО «Щекиноазот» (МК-40; МА-41).

Известны факторы, ограничивающие широкое применение ЭД для очистки сточных вод. Кроме высоких удельных затрат электроэнергии происходит загрязнение осадками солей кальция и магния с последующим нарушением гидродинамического режима, что приводит к порче мембран и их последующей замене. С целью повышения скорости, степени и селективности очистки сточных вод и технологических растворов производств предлагается вести электродиализ на импульсном униполярном токе (ИЭТ) с прямоугольной формой импульсов (рис.7) и скважностью импульсов от 2 до 10.

Для увеличения степени обессоливания обрабатываемой воды необходимы высокие значения чисел переноса и плотности тока, и уменьшение толщины диффузионного слоя. Числа переноса близки к идеальной униполярной проводимости.

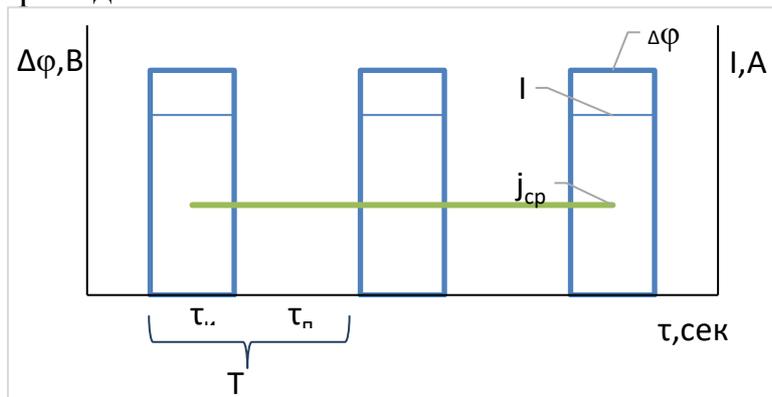


Рисунок 7 - Форма импульсного униполярного тока с прямоугольными импульсами:

Скважность, s - отношение длительности периода (T) к длительности импульса (τ_u),

$$s = \frac{T}{\tau_u}$$

Увеличение плотности тока имеет известные пределы, связанные с достижением на принимающей стороне мембраны локальной концентрации $C_s = 0$. Плотность тока при этом условии называется предельной диффузионной и определяется по уравнению (8):

$$j_{lim} = \frac{z_i F D_i C_0}{(\bar{t}_i - t_i) \delta}, \quad (8)$$

где D_i - коэффициент диффузии, C_0 - концентрация в объеме раствора, δ - толщина диффузионного пограничного слоя, z_i - число зарядов иона, F - число Фарадея, t_i , \bar{t}_i - число переноса противоионов соли в растворе и мембране (Число переноса ионов, \bar{t}_+ и \bar{t}_- - доля тока, обусловленного переносом данного вида ионов).

Производительность электродиализатора пропорциональна его токовой нагрузке. Однако бесконечно увеличивать силу тока нельзя, так как при соответствующем увеличении плотности тока выход получаемого продукта резко падает. Кроме того, при плотности тока выше предельной начинают идти побочные процессы генерации ионов водорода и гидроксила, мешающие протеканию основной реакции. Высокая плотность тока также снижает ресурсные характеристики работы мембран за счет осадкообразования на поверхности мембран.

В работе рассмотрены особенности ведения электродиализа в нестационарном токовом режиме. Проведение электролиза в режиме ИЭТ позволяет в моменты токовых толчков импульсов значительно увеличить рабочую плотность тока (j_{max}):

$$j_{max} = j_{cp} \cdot s, \quad (9)$$

где j_{cp} - среднее значение плотности импульсного тока. Различают мгновенную плотность тока $j(\tau)$ - значение в любой момент времени периода; максимальную j_{max} - наибольшее значение в любой момент времени, для прямоугольной формы импульсов определяется по формуле (9); среднюю j_{cp} за период T , по формуле (10):

$$j_{\text{cp}} = \frac{1}{T} \int_0^T j(\tau) d\tau. \quad (10)$$

Для стационарных режимов электролиза $j(\tau) = j_{\text{cp}} = j$. Особенность влияния ИЭТ обусловлена также процессами, протекающими в паузу и его сверхвысокими амплитудами.

Методом частотного сканирования определялось изменение потенциала и силы тока в зависимости от частоты, скважности и плотности импульсного тока. Установлено, что на определенных частотах система испытывает минимальное и максимальное сопротивление. Выполнен анализ зависимости потенциала системы от скважности импульсов и плотности тока, из которого следует, что наибольшее отклонение потенциала от равновесного его значения наблюдается на частоте $f = 500 \pm 20$ Гц и скважности импульса $s = 2$.

Сделано предположение о механизме движения ионов в растворе и мембране под действием импульсного униполярного тока. Скорость генерации ионов H^+ и OH^- связана с напряженностью электрического поля на межфазной границе мембрана-раствор. Сильное электрическое поле как бы «растягивает» химическую связь между H^+ и кислородом. В результате снижается энергия активации диссоциации молекул воды. Это явление называется вторым эффектом Вина. Опираясь на эффекты Вина, можно объяснить механизм поведения ионов в растворе под действием импульсного тока (рис.8). В работе приводится его подробное описание. При возникновении электрического поля между электродами на беспорядочное тепловое движение накладывается направленное перемещение ионов к электродам; например, катионов - к катоду. Их движение затруднено, согласно теории сильных электролитов, из-за окружения ионной атмосферой, в которой индуцируется заряд, противоположный по знаку центральным ионам (рис.8, а). Двигаясь к катоду, катион будет как бы «покидать» свою ионную атмосферу. Сместившись от центра ионной атмосферы, катион начинает формировать новые ее слои в направлении своего движения. С противоположной стороны, наоборот, происходит рассеивание ионной атмосферы, покинутой движущимся ионом (рис. 8, б).

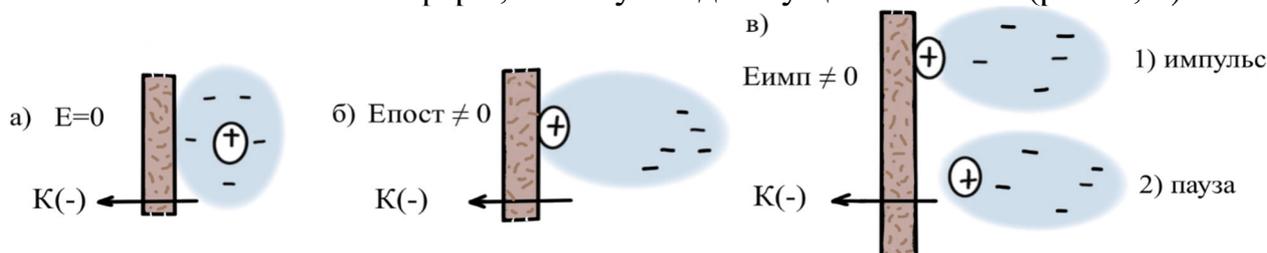


Рисунок 8 - Схема движения иона у поверхности мембраны: а) - без наложения тока; при наложении б) – постоянного; в) - импульсного тока

Использование импульсного тока однополупериодного выпрямления (без обратного импульса) определенной частоты, которая совпадает с частотой колебаний удаляемого иона, находящегося на границе, раствор-мембрана, позволяет увеличить подвижность иона настолько, что на его пути не успевает формироваться стационарная ионная атмосфера, таким образом, снижается релаксационное торможение. Отсутствие ионной атмосферы уменьшает и

электрофоретический эффект (рис.8, в). Дальнейший перенос осуществляется в фазе мембраны. Движение ионов в мембране определяется в основном соотношением их размеров и плотностью среды. При внедрении в фазу мембраны ион преодолевает некоторый энергетический барьер, и дальнейшее передвижение иона можно рассматривать как скачкообразное перемещение от одной функциональной группы к другой, также связанное с преодолением потенциального барьера. Естественно, что ионы, лишенные ионной атмосферы и получившие дополнительное ускорение за счет высоко импульса тока $j_{cp} \gg j_{lim}$, будут гораздо быстрее преодолевать указанные энергетические барьеры.

Для подтверждения предложенного механизма были проведены эксперименты по определению потоков ионов водорода и гидроксила на растворах хлорида натрия в гальваностатическом режиме. Анализ зависимостей потоков ионов H^+ при электродиализе раствора хлорида натрия с концентрацией $0,01 \text{ моль/дм}^3$ от плотности тока (рис. 9) показывает поток ионов водорода в допредельном режиме $j < j_{lim}$ не зависит от формы тока. Разница становится заметной, когда плотность тока близка к предельной ($1,41 \text{ мА/см}^2$, рассчитано по уравнению Левека). При дальнейшем увеличении $j \gg j_{lim}$ поток ионов H^+ через мембрану повышается. На рис.10 приведены числа переноса ионов водорода и гидроксила в катионо- и анионообменных мембранах.

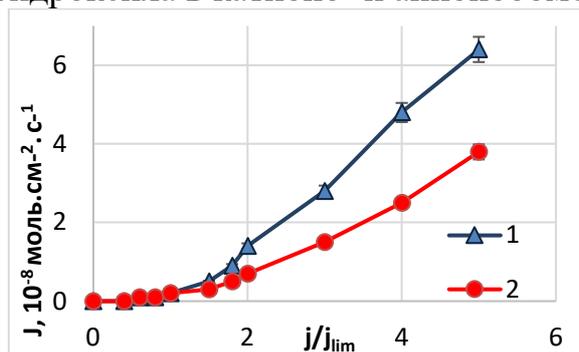


Рисунок 9 – Зависимость потоков ионов H^+ через МК-40 от плотности тока: 1- на импульсном токе ($f=500 \pm 20 \text{ Гц}$, $s=2$); 2- на постоянном токе

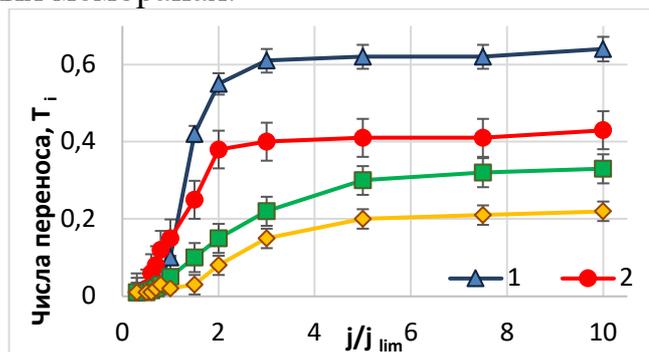


Рисунок 10 – Числа переноса H^+ и OH^- через ИОМ: анионообменную МА-41 (1,3) и катионообменную МК-40 (2,4) на импульсном (1,2) и постоянном (3,4) токе

Анализ полученных данных показывает, что потоки водородных и гидроксильных ионов на импульсном токе выше, чем на постоянном. Но при $j \geq 2j_{lim}$ выходят на плато (рис.10). Это явление связано со сменой механизма массопереноса. В начале процесса, когда $j \geq j_{lim}$, происходит перенос ионов электролита. По мере увеличения плотности тока (в импульсе $j_{max} = j_{cp} \cdot s$) начинают сказываться сопряженные эффекты конвекции (электроконвекции) и влияние источников переноса заряда H^+ и OH^- ионов. Последние приносят за счет эффекта экзальтации тока дополнительный перенос ионов среды. Наличие пауз, когда приложенный ток (или напряжение) равны нулю, способствует частичному рассеиванию диффузионных пограничных слоев с обеих сторон ИОМ. Концентрация электролитов со стороны обогащенного пограничного слоя уменьшается, снижая вероятность локального превышения произведения растворимости некоторых солей. Напротив, концентрация электролитов со

стороны обедненного пограничного слоя на поверхности мембраны увеличивается, снижая тем самым скорость генерации H^+ и OH^- ионов. Локальный сдвиг pH раствора в кислую область приводит к уменьшению осадкообразования на мембранах. Полученные вольтамперные характеристики мембран в 0,03 М растворе NaCl позволили установить протекающие процессы (рис.11).

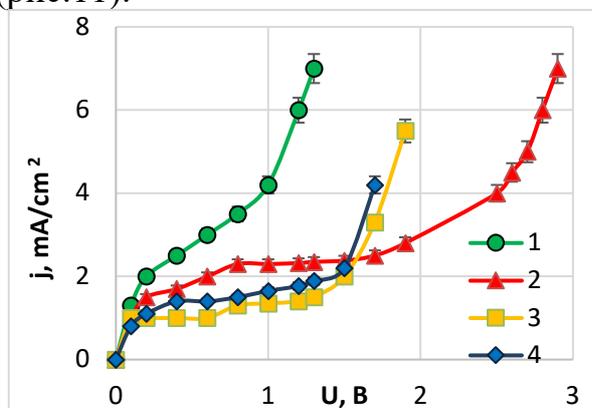


Рисунок 11 – Вольтамперные характеристики ИОМ МА-41(1, 4) и МК-40 (2, 3): на постоянном (1, 2) и импульсном (3, 4) токе

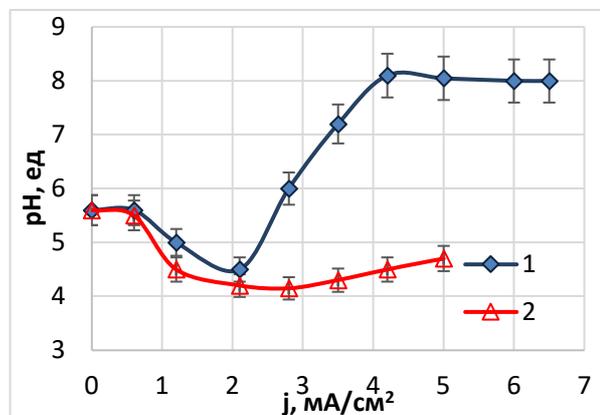


Рисунок 12 – Изменение pH в камере концентрирования на постоянном (1) и импульсном (2) токе

Зависимости на постоянном и импульсном токе показали заметную разницу в длине плато предельного тока (ΔU). Связано это с различной интенсивностью генерации ионов среды у поверхности катионо- и анионообменной мембранами на постоянном токе, что приводит к подщелачиванию в камерах концентрирования. Меньшая длина плато одновременно у обеих мембран на импульсном токе приводит к тому, что pH раствора в камере концентрирования более низкий (рис.12).

Полученный эффект существенным образом влияет на процесс осадкообразования на поверхности мембран. Результаты исследования влияния плотности тока, а также скважности импульсного тока на pH примембранного слоя показали, что при повышении средней плотности тока от 1,5 до 5,0 mA/cm^2 pH на ИЭТ изменяется на 1...1,5 единицы, тогда как при постоянном токе – на 2...5 единиц (рис. 12). Величина теоретической предельной плотности тока в эксперименте рассчитывалась по уравнению Левека и составила 1,4 mA/cm^2 . Экспериментально установлено, что с увеличением плотности тока j более 1,5 mA/cm^2 для процесса в зависимости от формы тока наблюдается разнонаправленное изменение величины pH в камере концентрирования вплоть до 2,4 mA/cm^2 . Повышение pH с ростом тока происходит за счет более интенсивного образования ионов гидроксила на постоянном токе (рис.12). Тогда как на импульсном наблюдается обратная зависимость до достижения средней плотности тока $j \geq 2,5j_{lim}$. Этот эффект можно объяснить за счет менее интенсивной генерации ионов среды, но одновременным ростом скорости обессоливания, которая была установлена в последующих экспериментах.

В камере обессоленного раствора (рис.13) наблюдаются следующие зависимости. Если $j < j_{lim}$, то вплоть до 30 %-ной степени опреснения

существенных различий в изменении рН не отмечено, не зависимо от формы тока.

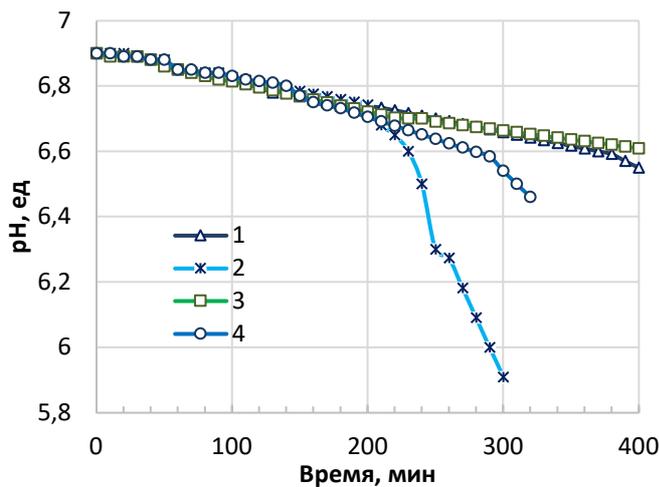


Рисунок 13 - Изменение рН обессоленного раствора на импульсном (1, 3) и постоянном (кривые 2, 4) токе при $j_{cp} = 1,5$ (3 и 4) и $5,0$ (1 и 2), mA/cm^2

При дальнейшем опреснении до 40% и более на постоянном токе происходит резкое подкисление за счет роста количества протонов и усиления влияния электроконвекции. Что более наглядно при $j \geq 2j_{lim}$ в режиме постоянного тока.

Для оценки эффективности и энергоёмкости процесса была проведена следующая серия экспериментов на модельном растворе.

При электродиализе в режиме $j < j_{lim}$ расход электроэнергии незначительно (~20%) зависит от формы тока. В случае $j \geq 2j_{lim}$ энергопотребление на ИЭТ уменьшилось, в зависимости от скважности, в 1,2-2,4 раза (рис.14) Лучший результат получен при скважности $s=2$, объясняется изменением вклада генерации ионов H^+ и OH^- и усилению электроконвекции. Смена механизма массопереноса позволила увеличить скорость процесса обессоливания (рис.15). Снижение солесодержания на 50% достигается за 130 минут на импульсном токе, в отличие от постоянного – за 230 минут.

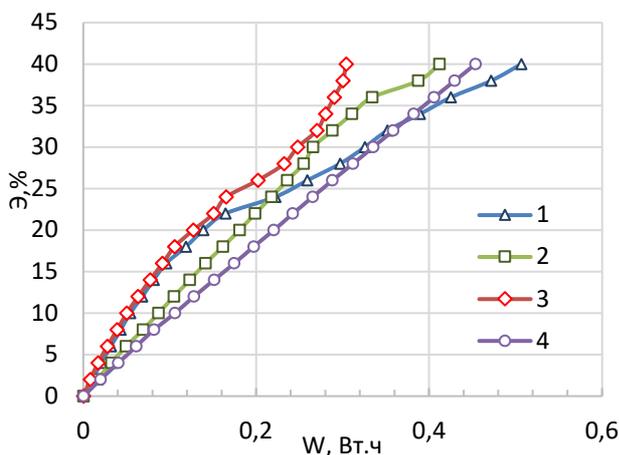


Рисунок 14 - Зависимость степени опреснения от расхода электричества, при $j_{cp} = 5,0$ mA/cm^2 : 1- на постоянном токе, 2,3,4 – на импульсном токе при $s = 2, 5, 10$

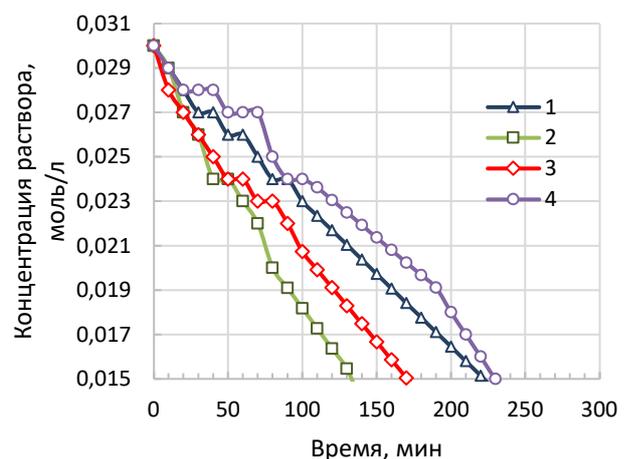


Рисунок 15 – Скорость процесса обессоливания при $j_{cp} = 5,0$ mA/cm^2 : 1- на постоянном токе, 2,3,4 – на импульсном токе при $s = 2, 5, 10$

Как видно, из анализа данных (рис.14, 15), использование ИЭТ позволяет кроме плотности тока регулировать частоту и скважность импульсов. В результате расширяется возможность оптимизации электродиализного процесса в целом. Проведение электродиализа на импульсном униполярном токе позволяет

снизить затраты электроэнергии более, чем в 2 раза, и одновременно увеличить скорость массообмена в 1,2-1,5 раза. Это связано с особенностью влияния импульсного униполярного тока на механизм потока ионов в мембране и растворе и представляет комбинацию трех явлений: уменьшение концентрационной поляризации, подавление генерации ионов H^+ и OH^- и стимулирования явления электроконвекции.

Следующая серия экспериментов проводилась на модельных и реальных сточных водах нефтеперерабатывающего предприятия (табл. 11). Солесодержание обессоленного раствора соответствует требованиям к оборотной (технической воде) согласно ВУП-97.

Таблица 11 - Режимы очистки модельных растворов и сточных вод НПЗ электродиализом

Обрабатываемый раствор	Плотность тока, J_{cp} , мА/см ²	Частота, f , Гц	Скважность, s	Время достижения 40 % степени обессоливания τ , мин	Удельный расход электроэнергии W , кВт.ч/м ³
На постоянном токе					
Модельный раствор*)	5	-	-	240	1,9
	10	-	-	200	2,5
	15	-	-	165	3,0
Сточные воды НПЗ	10	-	-	380	3,5
На импульсном токе					
Модельный раствор *)	5	500	2	90	1,4
	10	500	2	83	1,5
	15	500	2	78	1,8
Сточные воды НПЗ	10	500	2	125	1,8
Примечание. 0,01М NaCl+1,5 мг/дм ³ смеси нефтепродуктов (смесь мазута и дизельного топлива 5:1 объемных частей)					

На основании полученных данных рекомендован режим ведения процесса ЭД многокомпонентных СВ на импульсном униполярном токе: плотность тока 5-10 мА/см², частота 500±20 Гц, скважность 2. Полученные результаты позволили разработать рекомендации по расчету технологических параметров электродиализного метода и технологическую схему очистки сточных вод. На указанную технологию получены два патента РФ.

В пятой главе «Организация замкнутых оборотных циклов на промышленных предприятиях» представлены основные технические решения реализованных проектов по организации водооборотных систем на крупнейших в свое время и в своем сегменте предприятиях.

Участие во всех стадиях, от предпроектной до ввода в эксплуатацию, позволило выявить слабые места как в технологиях водоочистки, так и подходах к обоснованиям инвестиций. Что определило постановку задач настоящей работы. Результаты проведенных исследований были использованы при новом строительстве и реконструкции водооборотных циклов предприятий отрасли. В качестве примеров ниже приведены проекты реализации: строительства новых

водоочистных сооружений с организацией ЗВС и реконструкции действующих водооборотных систем.

Проект строительства водоочистных сооружений «ЗапСибНефтехим» является самым крупным и амбициозным среди производств нефтехимической продукции: возвращается в оборотный цикл практически вся очищенная сточная вода, что снижает потребление свежей воды из природных источников на 8 млн.куб.м в год. На предприятии в полной мере реализован комплексный подход к рациональному использованию и охране водных ресурсов.

Основные технологические решения водного хозяйства завода при непосредственном участии автора были заложены в 2012 году и предусматривали отдельные системы водоотведения и очистки сточных вод, сооружения водоподготовки технической и деминерализованной воды, установку выпаривания соледержащих стоков. В работе представлена принципиальная схема водного хозяйства ООО «ЗапСибНефтехим»

Запроектирована система оборотного водоснабжения предприятия производительностью более 1 000 000 м³/сут. Таким образом на заводе реализована концепция *ZLD* «нулевого жидкого сброса». Процент использования воды в обороте составляет $P_{об} = 96\%$, а эффективность ее использования - $K_{и} = 0,93$. Это является лучшими отраслевыми показателями.

В проекте применена технология сорбционной доочистки СВ на блоке предварительной подготовки стоков к утилизации (выпарке); в качестве адсорбента применены опоки.

Проект строительства канализационных очистных сооружений Новоуренгойского ГХК был реализован в 2008-14 г.г., и являлся уникальным в своем сегменте: впервые в отечественной практике проектирования и строительства производства получения олефинов и полиолефинов применены полностью технологии и оборудование иностранных лицензиаров, но объекты ОЗХ, в том числе КОС проектировали по российским нормам, что потребовало дополнительных усилий по увязке исходных данных (табл.12). Кроме этого, климатические и геологические условия строительства объекта диктовали условия размещение оборудования производительностью более 5000 м³/сут в отапливаемом здании с проветриваемым подпольем, что обусловило применение блочного оборудования, включая блок биологической очистки. В-третьих, что оказалось самой серьезной проблемой при пуско-наладке, проектные показатели качественного состава поступающих СВ существенным образом отличались от фактических из-за не учета СВ от поселка строителей, их столовых и прачечных (табл.12), и частичного отсутствия производственного стока. В последующих аналогичных проектах был рекомендован подход с поэтапным вводом нескольких технологических линий, что позволило существенно сэкономить капитальные затраты. В проекте впервые для промышленных предприятий отрасли применена технология биологического удаления азота. Что в настоящее время соответствует новым нормам НДТ. Очищенные сточные воды направляются в систему пожаротушения и на технические нужды предприятия, избыток закачивается в пласт. В 2014 году принято решение по замене двухступенчатого фильтрования на песке и угле на одноступенчатое на

природном сорбенте опоке, что принесло экономию в 5,8 млн. рублей в год. В последующих проектах при строительстве газоперерабатывающих и химических заводов разработанная технологическая схема взята за аналог отраслевыми проектными институтами.

Таблица 12- Эффективность работы линии очистки смешанных хозяйственно-бытовых и производственных сточных вод

Состав очистных сооружений	Наименование показателей	Проектные концентрации до очистки, мг/дм ³	Фактическое значение концентрации, мг/дм ³			НДС, мг/дм ³
			до очистки	после очистки	Эффективность, %	
1) мех.очистка от грубодисперсных и минеральных примесей, осуществляемая на решетках и песколовках 2) физико-химическая очистка на фильтрах-сепараторах и флотаторах; 3) биологическая очистка с нитри- и денитрификацией и реагентным удалением фосфатов; 4) глубокая доочистка на биореакторе и фильтрование через песок кварцевый и АУ; 5) УФ-обеззараживание.	БПКп	190,0	174,74	2,62	99	3,00
	Взвешенные вещества	89,0	165,80	4,37	97	7,44
	Фосфаты (по Р)	0,065	2,51	0,24	83	0,32
	Нитрит-ион	-	0,68	0,17	75	0,16
	Нитрат-ион	-	0,83	5,87	-	65,30
	Ион аммония (по N)	19,0	48,47	0,89	98	1,71
	АПАВ	0,4	0,51	0,04	93	0,50
	Нефтепродукты	15,0	1,05	0,05	80	0,08
	ХПК	-	361,37	9,15	97	30,00

Проект реконструкции водооборотных циклов на НПП Южного федерального округа. Подготовлены согласно разработанной методики материалы технического, экономического и экологической обоснования для запуска инвестиционного проекта. Реализованы первые этапы: ОТР, разработка проектной документации и идет реконструкция сооружений МО и ФХО. Существующее положение. Проектная производительность очистных сооружений составляет 45000 м³/сут, тогда как фактический расход не превышает 31000 м³/сут. Физико-механические очистные сооружения НПП ЮФО эксплуатируются с 2013 года, проектировались на обеспечение степени очистки по нефтепродуктам - до 25 мг/дм³, по фенолу - до 70 мг/дм³, по сульфидам - до 10 мг/дм³. После механической и физико-химической очистки сточные воды передаются на биологические очистные сооружения (далее - БХО) города.

С 2014г. новые предельно допустимые концентрации по фенолу составляют 0,1 мг/дм³, по нефтепродуктам 0,8 мг/дм³, по сульфидам 1,5 мг/дм³, что отличается от проектных показателей в 700 раз по фенолу, в 2,5 раза по

нефтепродуктам, по сульфидам в 7,0 раз. Таким образом, для достижения новых нормативных показателей требуется модернизация КОС. Технические мероприятия должны быть также направлены на повышение эффективности системы оборота воды, сокращение объемов сбрасываемых сточных вод завода и уменьшение забора сырой воды из реки за счет организации подпитки очищенными стоками современных блоков оборотного водоснабжения.

На основании результатов проведенного комплексного обследования существующих систем водоснабжения и водоотведения по разработанной методике, выполненных расчетов баланса оборотной воды, лабораторных коррозионных и микробиологических испытаний, сравнительных испытаний реагентов различных производителей были сделаны следующие выводы касательно применения очищенной на существующих КОС сточной воды:

- Очищенная сточная вода весьма коррозионно-агрессивна;
- Очищенная вода после очистных сооружений характеризуется высокой биологической активностью;
- Дополнительные исследования на слизиобразующие, сульфатовосстанавливающие и гетеротрофные микроорганизмы показали высокую степень загрязненности;
- В исследованный период по результатам анализа на ХПК утечек технологических продуктов не обнаружено;
- Исследование органических ингибиторов коррозии 5 различных производителей в рекомендованных производителем дозировках показали допустимую эффективность ингибиторов;
- Исследование ингибирования солевых отложений показали высокую эффективность;
- Применение очищенных стоков для подпитки современных систем водооборота может привести к увеличению расхода реагентов для стабилизационной обработки оборотной воды (ингибиторов, биоцидов).

Одним из вариантов улучшения указанных показателей на первом этапе реконструкции рекомендовано установить стадию фильтрации через опоку с последующим хлорированием, при этом фильтрация на опоке уменьшит дозы хлора на 20%.

Таким образом, для повторного использования в оборотном водоснабжении, а также в целях прекращения сброса избыточного количества очищенных СВ на БХО предложено осуществить реконструкцию очистных сооружений с доведением показателей стоков до требований, предъявляемых к блокам оборотного водоснабжения на первом этапе. Далее последовательно реализовать этапы строительства новых сооружений БХО с блоком деминерализации, которые позволят полностью возвращать все очищенные сточные воды в оборот и уменьшить забор воды из реки на технические нужды, включая ТЭЦ. Выполнено технико-экономическое обоснование по разработанной методике с оценкой стоимости жизненного цикла очистных сооружений, определением основных технико-экономических показателей проекта и предотвращенного экологического ущерба, подробный ход этой работы изложен в главе 6.

В шестой главе «Разработка механизмов управления развитием водного хозяйства промышленного предприятия в условиях ограниченного финансирования на основе принципа ПЭЭС» выполнен анализ различных методик оценки инвестиционных проектов по внедрению мало- и бессточных (замкнутых) систем водного хозяйства на предприятиях. Очистка СВ промышленного предприятия является весьма дорогостоящим мероприятием. Степень очистки оборотной воды может быть ниже, чем для это необходимо для сброса в водоем. Поэтому проектирование и строительство водооборотных систем позволит обеспечить как экономический, так и народно-хозяйственных эффект защиты окружающей среды.

Жизненный цикл любого строительного проекта состоит из нескольких последовательных стадий, которые показаны на рис.16.

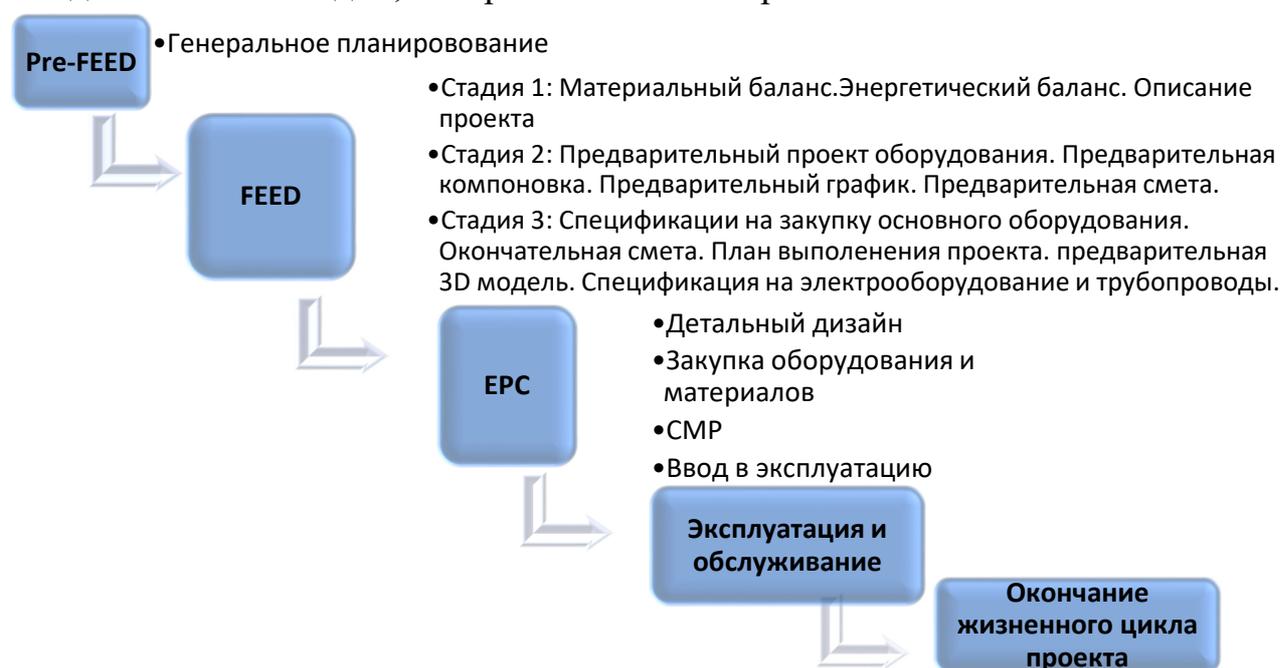


Рисунок 16 - Жизненный цикл инвестиционно-строительного проекта

Начальная (преинвестиционная) стадия, *PreFEED*, или ТЭО, имеет принципиальное значение для потенциального инвестора (заказчика, кредитора). Именно на этом этапе принимается решение о «запуске» проекта, которое должно удовлетворять минимум четырем условиям: 1) все показатели рассчитаны по 3-му классу точности исходя из методологии *AACE*; 2) расчеты проведены по принципу «минимального технического решения»; 3) проработаны все риски (политические, технические, организационные, рыночные, экологические) и методы по их локализации; 4) осуществлена независимая экспертиза всех предварительных решений. Некоторые российские компании-инвесторы устанавливают более жесткие требования к объему подготавливаемой на этой стадии документации, сопоставимой с принятой в РФ стадией «Проектная документация». Принципиальное отличие в точности оценки бюджета проекта, для *FEED* – это 80-90%, что позволяет сразу приступить к заказу основного оборудования. Также имеются различия в оценке рисков, описанию мероприятий по охране окружающей среды, предотвращению чрезвычайных ситуаций и декларации промышленной безопасности.

Современные подходы и методы риск-менеджмента исследованы и закреплены законодательно документами, наиболее известными являются: *ISO 31000* и др.; *ISO 14000* и др.; *HAZID*; *ENVID*; *PHSER*; *HAZOP*; *ОВОСС(ESIA)*. В отечественной практике раздел *ОВОСС* является обязательной частью проектной документации для любых объектов строительства. Оценку экологических рисков, состоящую в определении типов опасности, идентификации рисков (угроз), получении количественных оценок вероятностей возникновения неблагоприятных событий и их последствий, как правило, не проводят.

Установлено, что эколого-экономические риски для промышленного предприятия (ЭЭРПП) проявляются в возможности экономических потерь в результате ухудшения состояния окружающей среды от деятельности предприятия. Для управления ЭЭРПП применяют методики, опирающиеся на системы экологического менеджмента (СЭМ) в соответствии со стандартами *ISO 14000* и методологиях риск-менеджмента. Однако, как показывает практика, не многие ПП могут применить рассматриваемые подходы. Такая ситуация объясняется следующим:

- Отсутствует экологическая осознанность как у менеджеров, принимающих решения, так и у остальных сотрудников ПП, проявляющаяся прежде всего в слабой осведомленности персонала о проводимой на ПП экологической политике;

- Существует устойчивое мнение о вторичности «экологических» проблем перед «экономическими». Такое положение свойственно, прежде всего, ПП по добыче полезных ископаемых, нефти и газа. Чему способствует удаленность и закрытость таких объектов;

- Отсутствует единый механизм оценки ЭЭРПП;

- При обосновании инвестиций в развитие ПП или проектов экологической направленности не учитываются риски от не запуска проекта.

Сложившаяся ситуация может быть решена за счет применения более простых процедур принятия решений на любых уровнях менеджмента, что показано в работе на примере реального нефинансового инвестиционного проекта реконструкции канализационных очистных сооружений нефтеперерабатывающего завода (КОС НПЗ). Была поставлена цель – подготовить материалы для стадии *preFEED* «Проект реконструкции канализационных очистных сооружений НПЗ мощностью 15,7 млн. тонн в год». При этом решали следующие задачи: - анализ работы водохозяйственной системы предприятия; - разработка оптимальных решений и схем БОВ; - проработка технических мероприятий, направленных на повышение эффективности системы оборота воды, сокращение объемов сбрасываемых СВ завода и уменьшение объемов забора сырой воды за счет организации подпитки очищенными СВ современных блоков оборотного водоснабжения.

Выполнено технико-экономическое сравнение различных решений по *трем* методикам. После определения ключевых технико-технологических показателей проекта по 1-ой методике *AACE* (5-й класс оценки) проведена корректировка целевых показателей проекта по достижению технических

результатов, которые разбили на три этапа с последовательной реализацией, суть которых приведена в табл.13, т.е. установили последовательность управления процессом балансирования между уровнем возможных потерь и потенциальной выгодой от реализации экологически рискованного решения.

Таблица 13 - Перечень основных мероприятий по модернизации очистных сооружений и достигаемый результат

<i>Этапы</i>	<i>Задачи этапа</i>	<i>Результат</i>
1	Провести реконструкцию существующих КОС завода: восстановление бетона; перекладка сетей; частичная замена оборудования	Улучшение степени очистки по отдельным показателям, таким как нефтепродукты, взвешенные вещества, сульфиды и др. Разработанные мероприятия позволят возвращать часть очищенных стоков на отдельные блоки оборотного водоснабжения и уменьшить штрафные санкции от городского Водоканала за превышения, куда сбрасывается предварительно очищенный сток завода.
2	Построить новые сооружения – блоки биологической очистки	Мероприятия позволят возвращать очищенные стоки на отдельные блоки оборотного водоснабжения, прекратить сброс стоков на городские очистные сооружения, возвращать часть стоков в качестве технической воды для предприятий-абонентов. Избыток можно направлять на сброс в реку.
3	Построить новые сооружения – блоки доочистки	Мероприятия позволят возвращать все очищенные стоки на блоки оборотного водоснабжения, прекратить сброс стоков на городские очистные сооружения, прекратить забор речной воды из реки на технические нужды, возвращать всю воду в качестве технической воды для предприятий-абонентов и ТЭЦ.

В последнее время заказчики стали обращать внимание на 2-ю методику оценки полной стоимости владения закупаемой продукцией. Применительно к системе водного хозяйства ПП необходимо руководствоваться ГОСТ Р 58785-2019. В работе выполнен расчет по указанной методике, который позволил оценить затраты предприятия до окончания жизненного цикла сооружений.

Однако для управленческого планирования и анализа производственных возможностей предприятия чаще используется 3-я методика определения технико-экономических показателей деятельности, которая является основой для разработки производственно-финансового плана, а также установления нормативов на будущие периоды в рамках планирования на предприятии. Основные результаты этого расчета сведены в табл.14.

Платежи за сбросы (п.п. 13, 14, табл. 14) относят как выгоды от проводимых мероприятий. Из данных табл.14 видно, что на 1-ом этапе реконструкции этих выгод не достичь, однако срок окупаемости вложений – 6 лет. Дальнейшее инвестирование в последующие этапы позволит получить экономический эффект до 0,5 млрд рублей.

Таблица 14 - Технико-экономические показатели вариантов реконструкции очистных сооружений (в ценах 2021 г.)

№ пп	Наименование затрат	Ед. изм.	Затраты на модернизацию		
			I этап	II этап	III этап
1	Производительность канализационных очистных сооружений	м ³ /сут	31019	31019	31019
2	Капитальные затраты	тыс.руб	330000	1650000	2365000
3	Демонтаж оборудования от п.2 (1%)	тыс.руб	3000	15000	21500
4	Неучтенные затраты, 20% от п.2	тыс.руб	66000	330000	473000
5	Итого: Инвестиционные издержки*	тыс.руб	399000	1995000,	2859500
6	Эксплуатационные затраты, в год, (принят нормативный срок службы сооружений 25 лет):	тыс.руб	62244	311220	367414
7	Изменение эксплуатационных затрат после модернизации ("+" перерасход, "-" экономия):				
8	электроэнергия на технологические цели	тыс.руб	-268	12612	11332
9	содержание, эксплуатация и ремонт оборудования нового оборудования	тыс.руб	62244	311220	446082
10	содержание, эксплуатация и ремонт оборудования старого оборудования	тыс.руб	90000	-90000	-90000
11	Итого изменение годовых эксплуатационных затрат, в год	тыс.руб	-27488	233832	367414
12	Платежи за сброс на городские очистные сооружения:	тыс.руб			
13	штрафы за превышение НДС	тыс.руб	5000	-5000	-5000
14	плата за сброс	тыс.руб	800000	-800000	-800000
15	Основные технико-экономические показатели:	тыс.руб			
16	Прирост чистой прибыли**	тыс.руб	24691	430287	874620
17	Экономический эффект от реализации проекта по этапам реконструкции***	тыс.руб	35159	131037	445695
18	Срок окупаемости	год	6	4,6	2,5

*в т.ч. неучтенные затраты 20%; **24% - налоги; ***учтена депозитная ставка,15%.

Выполнена эколого-экономическая оценка внедрения блоков доочистки. Модернизация канализационных очистных сооружений с организацией

замкнутых водооборотных систем, обеспечивает экологическую эффективность за счет предотвращенного экологического ущерба в размере 874 620,16 тыс. руб в год. Экономия по плате за негативное воздействие на окружающую среду составит 849,11 тыс. руб в год.

В ряде случаев, расчеты ТЭП можно дополнить данными оценки СЖЦ объекта. Тогда к полученным данным эксплуатационным затратам добавляют компенсационные затраты, связанные с возможностью возникновения эколого-экономических рисков, а именно, «выплаты организациям, у которых возникает ухудшение экономических показателей в период восстановления канализационного сооружения, затраты, связанные непосредственно с ликвидацией отказов и дополнительные затраты, связанные с природоохранными мероприятиями».

Выполнена оценка экологических рисков предприятия по двум методикам. Первая позволяет провести оценку рисков ситуации, ее графическое исполнение показано на (рис.17). В условиях неполноты информации оценка вероятностей проявления негативных факторов выполнена методом экспертных оценок.

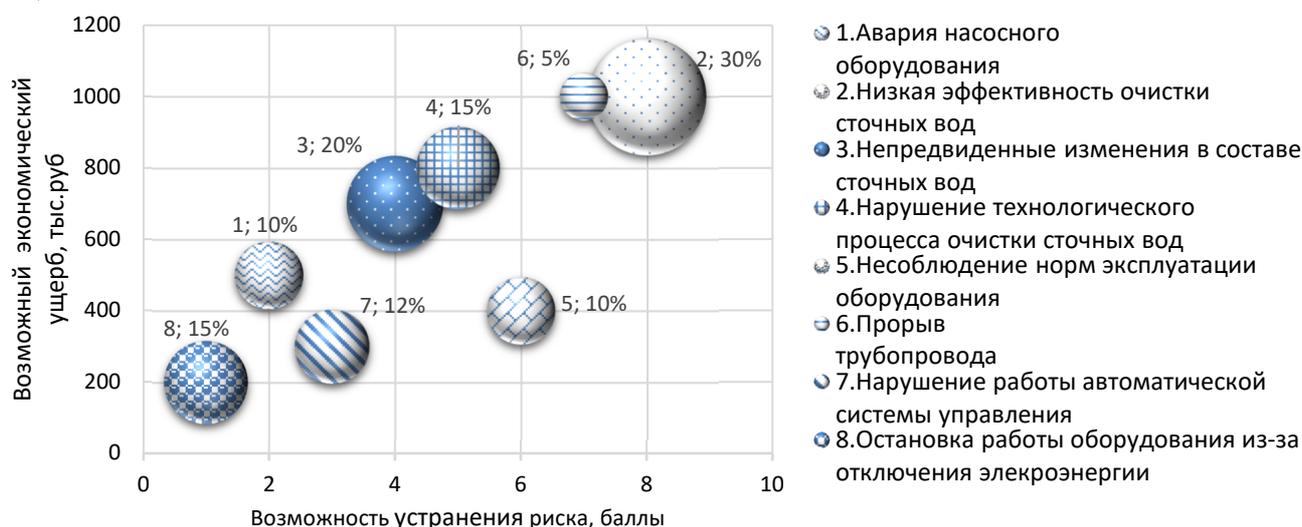


Рисунок 17 - Пример оценки эколого-экономических рисков

В работе выполнены расчеты по прогнозированию экологического ущерба на основе статистических данных об авариях и инцидентах на предприятии за период с 2012 по 2022 гг. Установлена величина оптимального запаса средств на ликвидацию последствий предполагаемого экологического ущерба от аварийных ситуаций по цеху очистных сооружений.

Таким образом, для управления развитием водного хозяйства промышленного предприятия в условиях ограниченного финансирования важное место занимает прединвестиционная работа на основе принципа эколого-экономической сбалансированности. Это предусматривает последовательное управление потерями за счет повышения эффективности оборудования и управления стоимостью для того, чтобы оказывать положительный экономический эффект на всю экосистему, в которой функционирует предприятие, формирование единой социально-эколого-экономической системы, обеспечивающей эффективное, экологически безопасное

хозяйствование и консенсус производственной деятельности с природными циклами, когда развитие материального производства соответствует ассимилирующему потенциалу природной среды.

В **Приложениях** приводятся экспериментальные данные, технологические схемы реализованных очистных сооружений, документы ТЭО отдельных объектов, технико-экономические расчеты, акты внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований и выполненных расчетов решена крупная научная проблема разработки и внедрения методологии совершенствования водохозяйственных систем промышленных предприятий с большой водоемкостью, технологий и устройств для перехода на принципы наилучших доступных технологий, механизмов оптимизации инвестиций при проектировании и строительстве водоочистных сооружений, внедрение которых способствует осуществлению водосберегающей деятельности предприятий, усилению роли стандартов устойчивого развития.

Получены следующие основные научные и практические результаты и выводы:

1. Впервые разработана система развития водного хозяйства промышленных предприятий с большой водоемкостью, заключающаяся в комплексной оценке эффективности использования воды и утилизации образующихся отходов, что позволяет организовать замкнутые водооборотные системы; сформулированы восемь основных параметров эффективности использования воды на предприятиях отрасли; на основе принципа эколого-экономической сбалансированности выделены пять критериев оценки технологий и оборудования с определением достигаемых технологических показателей очистки сточных вод в крупнотоннажных системах.

2. Фактическое отсутствие использования подходов КИОВР доказано на примере трех предприятий, для которых коэффициенты оборота воды составили $P_{об} = 82; 79; 83\%$, однако эффективность ее использования остается крайне низкой и составила $K_{и} = 0,14; 0,32; 0,33$. Это свидетельствует о большом объеме сброса сточных вод в виду недостаточной степени их очистки с одновременной подпиткой блоков оборотного водоснабжения свежей водой из поверхностных водоисточников.

3. Обосновано увеличение использования воды в обороте до 90% и более за счет применения усовершенствованных технологий, основанных на сорбционном методе и деминерализации электродиализом, для организации крупнотоннажных водооборотных систем и осуществления перехода на принципы НДТ.

4. На основании структурной оценки и физико-химических свойств опоки обоснована и экспериментально подтверждена возможность ее использования взамен традиционных фильтрующих и сорбционных материалов; полученный сорбент в 20 раз дешевле активированного угля, но обладает достаточной высокой сорбционной емкостью, что позволяет чаще в 2-3 раза производить его замену, при этом научно обоснована технология получения из отработанного

сорбента вторичного материального ресурса с позиции показателя степени опасности.

5. Установлены закономерности, определяющие технологически показатели сорбционной очистки сточных вод. Экспериментальные исследования подтвердили высокую однородность химического состава образцов как в пределах отдельных месторождений, так и в целом по классу сырья. Коэффициент вариации C_V для оксидов SiO_2 и Al_2O_3 составляет менее 7%, что свидетельствует об их равномерном распределении в месторождениях. В то же время для оксидов щелочных и щелочноземельных металлов, а также глинистых материалов коэффициент вариации находится в диапазоне $20 < C_V < 40\%$, что указывает на их относительно равномерное распределение. Получены уравнения, описывающие зависимость величины адсорбции метиленового синего A_{MC} от химического состава образцов. Установлено, что при увеличении содержания кремнезема величина A_{MC} снижается, $r = -0,779$; $p < 0,001$; $N = 18$. В то же время наличие других минералов оказывает положительное влияние: при увеличении концентрации глинозема, глинистых минералов и оксидов щелочных и щелочноземельных металлов наблюдается рост адсорбционной способности, $r = 0,677$, $0,01 < p < 0,001$; $r = 0,954$, $p < 0,001$; $r = 0,931$, $p < 0,001$; $N = 18$, при коэффициентах детерминации $R^2 = 0,808$; $0,856$; $0,903$; $0,912$). Полученные результаты позволяют расширить минерально-сырьевую базу для производства адсорбентов на основе дисперсных кремнеземов, что открывает перспективы для их более широкого применения в процессах очистки воды.

6. В целях ресурсосбережения предложена методология выбора сорбента на основе опоки Каменнорского месторождения. Обосновано использование материала фракции 0,8-1,7 мм без дополнительной термохимической обработки. Изученные образцы относятся к мезопористым со следующими характеристиками: удельная поверхность (по Ленгмюру) $S_{уд} = 158,8 \text{ м}^2/\text{г}$; $D_{me} = 9,5 \text{ нм}$; $E_0 = 5,96 \text{ кДж/моль}$. Проведено изучение физико-механических, адсорбционно-структурных свойств образцов других месторождений, установлены показатели: насыпной плотности, кг/дм^3 , 0,6-0,9; прочности механической, кгс/см^2 , 80-120; пористости, %, 32-60; водостойкости, %, 85-98. Полученные данные показывают, что исследуемые адсорбенты имеют общий химико-минералогический состав и физико-механические свойства, что позволяет использовать их в технологиях сорбционной очистки сточных вод.

7. Исследованы сорбционные возможности опоки по отношению к водорастворимым нефтепродуктам и ионам тяжелых металлов Fe^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} и изучены механизмы адсорбции. Установлено, что максимальная адсорбция для ионов тяжелых металлов происходит в течении 20 минут, для нефтепродуктов около двух часов. Установленные кинетические зависимости ($R^2 > 0,882$) показывают влияние диффузионных процессов на скорость адсорбции нефтепродуктов, а в случае ИТМ еще и на скорость химического взаимодействия. Сорбционная емкость опоки аппроксимируется уравнением Фрейндлиха для ИТМ и уравнением Ленгмюра – для нефтепродуктов. Полученные данные позволяют применять опоки без дополнительной термохимической обработки, как слабые катионообменные сорбенты.

8. Исследованы особенности фильтрующих свойств опок в соответствии с требованиями к таким материалам в качестве фильтрующих загрузок. Проведено экспериментальное изучение с подбором фильтрующего материала для процесса доочистки модельных и реальных сточных вод. Установлена эффективность сорбента по показателям БПК_п (69%), нитрит-анионам (55%), АПАВ (98%), фосфат-ионам (87%) и нефтепродуктам (91%). На основе полученных данных были рассчитаны технологические параметры процесса доочистки производственных сточных вод: размеры и количество фильтров, объем загрузки, частота промывок. Выполнены расчеты промышленных фильтров с двухслойной загрузкой. Применение опоки в качестве фильтрующего материала вместо песка позволило уменьшить объем промывной воды и частоту промывок, уменьшить типоразмер промывных насосов, что положительно повлияло на энергоэффективность станции в целом. Научная новизна разработанной технологии подтверждена патентом РФ.

9. На основании проведенных научного анализа и исследований впервые подтверждены закономерности электродиализного метода деминерализации сточных вод с использованием импульсного электрического тока, а именно, импульсного униполярного тока плотностью 5-10 мА/см², частотой 500±20 Гц, скважностью импульсов 2. Показана возможность регулирования явлений электроконвекции, кислотной диссоциации и подавления генерации ионов водорода и гидроксила. Впервые предложен механизм массопереноса, лежащий в основе преимуществ использования импульсного электрического тока, таких как, уменьшение поляризации мембран, снижение образования отложений на мембранах, увеличение срока их службы. Доказано экспериментально, что за счет применения импульсного электрического тока происходит снижение затрат электроэнергии в 1,2-2,4 раза и одновременно увеличивается скорость массообмена в 1,2-1,5 раза по сравнению с использованием постоянного электрического тока. На основе полученных данных произведен расчет промышленных электродиализаторов. Научная новизна разработанной технологии подтверждена двумя патентами РФ.

10. Разработана методика выбора оптимальных решений на ранних стадиях подготовки к модернизации, реконструкции или новому строительству водоочистных сооружений, базирующаяся на системе оценок капитальных и эксплуатационных затрат, качественной и количественной оценке экологических рисков, позволяющая выбрать проект с приемлемой эффективностью, основанной на эколого-экономической сбалансированности.

11. При участии и под руководством автора разработаны технические условия и налажено производство отечественного экологического оборудования на двух машиностроительных заводах (АО «ГМС Нефтемаш», ООО «ЮниЭкоПром»), позволяющее реализовать переход на принципы наилучших доступных технологий и решающее задачи по рациональному природопользованию, подготовлено более двадцати проектов строительства и реконструкции крупных водоочистных сооружений для предприятий ПАО «Газпрома», ПАО «НК «Роснефти», ПАО «Лукойла», ПАО «Новатэка», ПАО «Сибур Холдинг», АО «ЧТПЗ», МК «ЕВРАЗ», МК «НКМК», ПАО «НКНХ» и

др., большинство из которых были уникальными в своем сегменте и послужили в последствии проектами-аналогами.

Предлагаются следующие **рекомендации** широкого внедрения подходов, технологий и устройств при реализации водосберегающих мероприятий на предприятиях:

- на государственном уровне обеспечить расширение практики экономического стимулирования для перехода на передовые экологические стандарты, связанные с финансированием зеленых проектов и инициатив в сфере устойчивого развития в промышленности;

- на отраслевом уровне расширять практику обоснования инвестиций в экологические проекты с учетом рисков от не запуска проектов, что будет способствовать смене приоритетов в процессе принятия решения;

Перспективные направления дальнейших исследований включают следующие задачи:

- максимальное использование научного потенциала для разработки и широкого внедрения электрохимических методов в процессы водоподготовки и водоочистки. Особое внимание уделить интенсификации этих процессов за счет применения переменного электрического тока, что позволит существенно снизить энергозатраты – одного из ключевых ограничивающих факторов.

- при проектировании и строительстве канализационных очистных сооружений обеспечить дальнейшую непрерывную замену импортных материалов, реагентов, аппаратов на отечественную продукцию с высокой инновационной компонентой, что будет способствовать вхождению в перечень наилучших доступных технологий для сооружений очистки воды.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АУ – активированный уголь; **БОВ** - блок обратного водоснабжения; **БХО** - биохимическая очистка; **ВПУ** - водоподготовительная установка; **ВМР** - вторичный материальный ресурс; **ВХР** - водно-химический режим; **ДК** - дисперсные кремнеземы; **ИОМ** - ионообменная мембрана; **ИЭТ** - импульсный электрический ток; **ЗВС** - замкнутые водооборотные системы; **КОС** - канализационные очистные сооружения; **КИОВР** - комплексное использование и охрана водных ресурсов; **МБР** - мембранный биореактор; **НДТ** - наилучшие доступные технологии; **НПП** - нефтеперерабатывающее предприятие, **НПЗ** - то же; **НСО** - нефтесодержащие отходы; **НХП** - нефтехимическое предприятие; **ОТР** - основные технические решения; **ПП** - промышленное предприятие; **ПЭЭС** - принцип эколого-экономической сбалансированности; **СВ** - сточные воды; **СЖЦ** - стоимость жизненного цикла; **СЭМ** - система экологического менеджмента; **ТЭО** - технико-экономические обоснование; **ТЭП** - технико-экономические показатели; **ФХО** - физико-химическая очистка; **ЭД** - электродиализ; **ЭР** - экологические риски; **ЭЭРПП** - эколого-экономические риски промышленного предприятия; **ААСЕ** - методика Международной Ассоциации развития стоимостного инжиниринга; **ZLD** - технологии «нулевого жидкого сброса».

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях

- 1 *Вурдова Н.Г.* Оценка эколого-экономических рисков предприятия на примере его канализационных очистных сооружений / *Вурдова Н.Г., Куликова Е.Ю.*// *Водоснабжение и санитарная техника.* -2025. -№2. -С.30-36. DOI: [10.35776/VST.2025.02.04](https://doi.org/10.35776/VST.2025.02.04). K1

- 2 *Вурдова Н.Г.* Принцип эколого-экономической сбалансированности в развитии водного хозяйства крупного предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2025. - №2. – С/28-42. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_2_0_28. **К2**
- 3 *Вурдова Н.Г.* Сравнение методов обратного осмоса и электродиализа при деминерализации природных и сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. - 2025. -№2. -С.23-28. DOI: 10.35776/VST.2025.02.03. **К1**
- 4 *Вурдова Н.Г.* Утилизация опасных шламов литификацией опоками / *Вурдова Н.Г., Куликова Е.Ю.* // Строительство и техногенная безопасность. – 2024. - №35(87). – С.81-87. DOI: 10.29039/2413-1873-2024-35-81-87. **К2**
- 5 *Вурдова Н.Г.* Экологически безопасный способ утилизации отработанного адсорбента для очистки воды / *Н.Г. Вурдова* // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2024. – Т. 13. – №3(67). – С. 179-187. – EDN: HBAQND. **К2**
- 6 *Вурдова Н.Г.* Исследование характеристик гетероповерхностных композиционных сорбентов на основе вторичного сырья / *Вурдова Н.Г., Абуова Г.Б., Боронина Л.В., Захаров С.С., Радченко О.П., Фролов М.А.* // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. -2024. - №2(95). -С.133-142. **К2**
- 7 *Вурдова Н.Г.* Исследование применения дисперсных кремнеземов для сорбционной очистки сточных вод / *Вурдова Н.Г.* // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура.. – 2024. -№2(95). -С.126-133. **К2**
- 8 *Vurdova, N.G.* (2024). Environmental and Economic Balance in the Refurbishment of the Sewage Treatment Plant. In: Proceedings of the 7th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. ICCATS 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, v.400. **Springer**, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47810-9_43
- 9 *Вурдова Н.Г.* Экономическое обоснование замкнутых водооборотных циклов на промышленном предприятии / *Вурдова Н.Г., Юрьев Ю.Ю., Изотов В.В.* // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. -2023. -№5(93).-С.111-120. **К2**
- 10 *Вурдова Н.Г.* Освоение наилучших доступных технологий водоочистки для промышленных предприятий / *Вурдова Н.Г., Юрьев Ю.Ю., Брошко О.С., Тимофеева А.Г., Изотов В.В., Москвичева Е.В., Ляшенко И.С.* // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. -2023. - №2(91). -С.130-140. **К2**
- 11 *Вурдова Н.Г.* Технологический подход к организации малосточных систем на нефтеперерабатывающих предприятиях / *Вурдова Н.Г., Брошко О.С., Юрьев Ю.Ю., Изотов В.В., Тимофеева А.Г., Изотов В.В., Москвичева Е.В., Бастрыкин Е.А.* // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура.-2023.-№2(91).-С.140-149.**К2**
- 12 *Вурдова Н.Г.* Повышение эффективности систем оборота воды нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий (часть 1) / *Вурдова Н.Г., Фесенко Л.Н.* // Водоснабжение и санитарная техника. -2023. -№6. -С.12–22. DOI: 10.35776/VST.2023.06.02. **К1**
- 13 *Вурдова Н.Г.* Повышение эффективности систем оборота воды нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятий (часть 2) / *Фесенко Л.Н., Вурдова Н.Г.* // Водоснабжение и санитарная техника. -2023. -№10. -С.37–47. DOI: 10.35776/VST.2023.10.05. **К1**
- 14 *Вурдова Н.Г.* Влияние эколого-экономических рисков на эффективность инвестиционно-строительного проекта реконструкции очистных сооружений НПЗ / *Вурдова Н.Г., Лишук А.Н.* // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. - 2023 - №3 (312). -С.23-31. DOI: 10.33285/2411-7013-2023-3(312)-23-31. **К2**
- 15 Инвестиционный проект создания замкнутых водооборотных циклов на промышленном предприятии / *Вурдова Н.Г., Юрьев Ю.Ю.* // Известия вузов. Инвестиции. Строительство.

Недвижимость. -2022. -Т.12, № 4. -С. 529–538. DOI: 10.21285/2227-2917-2022-4-529-538.

К2

- 16 *Вурдова Н.Г.* Определение стоимости инвестиционного проекта на предпроектной стадии (на примере реконструкции водоочистных сооружений) / *Вурдова Н. Г., Москвичева Е.В., Тимофеев А.Г., Изотов В.В., Кузов А.В.* // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. -2022. - № 4(89). -С.138-152. **К2**
- 17 Использование импульсного электрического тока в технологии очистки сточных вод от примесей / *Фомичев В.Т., Вурдова Н.Г., Губаревич Г.П., Савченко А.В.* // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура.-2021.-№ 2 (83).-С.97-103. **К2**
- 18 Снижение надежности сооружений систем водного хозяйства в результате биообрастания /*Москвичева А.В., Тимофеев А.Г., Федулова Е.В., Щитов Д.В., Вурдова Н.Г., Вольская О.Н.* // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. -2021. -№ 4 (85). -С. 201-207. **К2**
- 19 Влияние импульсного электролиза на физические и химические свойства электролитических осадков сплава олово-кадмий / *Фомичев В.Т., Савченко А.В., Губаревич Г.П., Вурдова Н.Г.* // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2020. № 2 (237). С. 66-70. **К2**
- 20 *Вурдова Н.Г.* Развитие корпоративной системы управления проектами: опыт инжиниринговой компании / *Вурдова Н.Г.* // Научные исследования и разработки. Российский журнал управления проектами. -2020. -Т.9, № 4. -С. 21-29. DOI 10/12737/2587-6279-2021-9-4-21-29 **К3**
- 21 Promising approaches to recycling effluent residues from galvanizing operations // *Vurdova N.G., Lebedev D.N.* Metallurgist. 2000. Т. 44. № 9-10. С. 455-457. DOI:10.1023/A:1004876608440 CA(pt), **Scopus**, Springer, WoS(SCIE)
- 22 Perspective trends in solving the problems in utilization of precipitates of waste waters of galvanic production /*Vurdova N.G., Lebedev D.N.* Metallurgist. 2000. № 9. С. 24-25. CA(pt), **Scopus**, Springer, WoS(SCIE)
- 23 Научные исследования – неотъемлемая часть экологического воспитания / *Вурдова Н.Г., Рыгалова Н.С.*// Известия ВолгГТУ. Серия: Новые образовательные системы и технологии обучения в ВУЗе. – 1998. - Вып.4, ч.1. -С. 52-54.

Книги и монографии

- 24 Рециклинг: учебник / **Н. Г. Вурдова**, О. В. Голубев, С. В. Неделин [и др.] ; под. ред. А. Я. Травянова. - Москва: Изд. Дом НИТУ «МИСиС», 2020. - 746 с. - ISBN 978-5-907226-61-6. - Текст: электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1915752> (дата обращения: 03.02.2023). – Режим доступа: по подписке.
- 25 Инженерная защита окружающей среды: Очистка вод. Утилизация отходов / Под ред. Ю.А. Бирмана, **Н.Г. Вурдовой**. - М.: Изд-во Ассоциация строит. ВУЗов, 2002. - 295с., [3] л. цв. ил. : ил., табл.; 21 см.; ISBN 5-93093-121-3.
- 26 Электролиз природных и сточных вод /**Вурдова Н.Г.**, Фомичев В.Т. Учебное пособие по спец."Строительство". Рекомендован Мин.обр.науки РФ. М.: Изд-во АСВ, 2001.-144с. ил. ISBN 5-93093-099-6.

Статьи в других изданиях и доклады на конференциях

- 27 Научное обоснования технологий повышения экологической безопасности водного хозяйства крупнотоннажных предприятий /*Вурдова Н.Г.* // Технология очистки воды: «Техновод-2024: материалы XV межд. Науч.-практич. Конф. г.Кисловодск, 26-28 апр.2024/ Южно-Рос. Гос. Политех. Ун. им.Платова – Новочеркасск: Лик, 2024. – С.104-127
- 28 Методы организации замкнутого цикла водопользования для промышленных предприятий / *Вурдова Н.Г.* // Технология очистки воды: «Техновод-2023: материалы XIV межд. Науч.-

- практич. Конф. г.Кисловодск, 18-21 апр.2023/ Южно-Рос. Гос. Политех. Ун. им.Платова – Новочеркасск: Лик, 2023. – С.24-27
- 29 Освоение новых технологий замкнутого цикла водопользования для промышленных предприятий/*Вурдова Н.Г.*//Современные технологии в области защиты окружающей среды и техносферной безопасности: матер. Всерос. научной конф. с междунар. участием, 21-22 марта 2023г. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2023. – С.56-60
 - 30 Экономика замкнутого водопользования /*Вурдова Н.Г., Юрьев Ю.Ю.* // Сб. статей. 80-я юбилейная Всерос. научно-технич. конф. «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре», г.Самара, апр.2023. С.449-462.
 - 31 Практический опыт применения минерального сорбента в процессах водоподготовки и водоочистки // *Брошко О.С., Вурдова Н.Г.* // Сб. статей. 80-й юбилейная Всерос. научно-технич. конф. «Традиции и инновации в строительстве и архитектуре», г.Самара, апр.2023. С.441-448.
 - 32 Корректные технологические решения и надежное оборудование - залог стабильного качества очищенной воды после очистных сооружений /*С.И. Мойжес, Н. Г. Вурдова* //Яковлевские чтения-2022: Системы водоснабжения и водоотведения. Современные проблемы и решения [Электр. Рес.]: сборник докладов XVII Международной научно-технической конференции / Мин-во науки и высшего образования РФ, НИ МГСУ. - М.: Изд-во МИСИ – МГСУ, 2022. - Режим доступа: <http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniyaotkr-dostupa/>
 - 33 Совершенствование технологии очистки нефтезагрязненных сточных вод при повторном их использовании в системе оборотного водоснабжения / *Вурдова Н.Г., Брошко О.С., Яковлев Д.П., Федулова Е.В.* // В сборнике: Перспективы развития строительного комплекса. Материалы XVI Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов. Под общей редакцией Т.В. Золиной. Астрахань, 2022. С. 190-194.
 - 34 Защита от биокоррозии металлических конструкций оголовка водозаборного сооружения / *Ю.Ю., Москвичева А.В., Тимофеев А.Г., Болеев А.А., Катеринин К.В., Вурдова Н.Г.* // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 2 (83). С. 104-109. ВАК. К2
 - 35 Способ защиты металлических изделий от биообрастания / *Москвичева Е.В., Тимофеев А.Г., Федулова Е.В., Юрьев Ю.Ю., Вурдова Н.Г., Сидякин П.А., Вольская О.Н.* // Вестник Волгоградского государственного арх.строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 4 (85). С. 208-212. ВАК. К2
 - 36 Электрохимическая очистка сточных вод /*Фомичев В.Т., Вурдова Н.Г., Ермолаева И.Б., Куликова И.А.* // Сб. докладов: Безопасность жизнедеятельности, XXI век. Материалы Международного научного симпозиума. 2001. С. 144-145.
 - 37 Пути решения проблемы обеспечения г. Волгограда качественной питьевой водой / *Вурдова Н.Г., Лебедев Д.Н.* // Градостроительство, ВолГАСА. 2000. С. 61-63 ВАК
 - 38 Обработка, обезвреживание и утилизация осадков сточных вод гальванических производств /*Вурдова Н.Г., Лебедев Д.Н.* // Изв. Академии промышленной экологии. №4, 2000. С. 76-78
 - 39 Влияние импульсного тока на электродиффузию электролита через ионообменную мембрану /*Вурдова Н.Г., Фомичев В.Т.*// В сбор. Мембранные и сорбционные процессы // матер. Медунар. Конфер. 30 окт-3нояб. г. Сочи, 2000
 - 40 Интенсификация методов электрохимической очистки. Электродиализ /*Вурдова Н.Г.* // ВолГАСА. – Волгоград, 2000.-14с.-рус.-деп.ВИНИТИ 14.7.00. №1947-В00
 - 41 Интенсификация методов электрохимической очистки. Электрокоагуляция/*Вурдова Н.Г., Фомичев В.Т.*// ВолГАСА.-Волгоград,2000.11с.-рус.-деп.ВИНИТИ. 14.7.00. №1946-В00
 - 42 Решение экологических проблем в гальванике / *Фомичев В.Т., Вурдова Н.Г.* //В сборнике: Экологическая безопасность и экономика городских и теплоэнергетических

- комплексов. Материалы Международной научно-практической конференции. Волгоград, 1999. С. 162-165.
- 43 Эколого-экономическое обоснование электрокоагуляционной очистки промывных сточных вод / *Паршина Е.А., Вурдова Н.Г., Лебедев Д.Н.* // В сборнике: Экологическая безопасность и экономика городских и теплоэнергетических комплексов. Материалы Международной научно-практической конференции. Волгоград, 1999. С. 172-174.
 - 44 К вопросу об организации оборотного водоснабжения в гальваническом производстве / *Вурдова Н.Г., Заварин Л.Ю.* // В сборнике: Экологическая безопасность и экономика городских и теплоэнергетических комплексов. Материалы Международной научно-практической конференции. Волгоград, 1999. С. 195-198.
 - 45 Оборотное водоснабжение – как один из путей решения экологических проблем в гальванике / *Ксенофонтов В.А., Вурдова Н.Г., Фомичев В.Т.* // В кн: Сертификация, экология, энергосбережение. Доклады международной научно-практической конференции. 1998. С. 79-80. ISBN: 5-230-03425-4
 - 46 Реализация малоотходных технологий - путь к решению экологических проблем / *Вурдова Н.Г., Фомичев В.Т., Ксенофонтов В.А., Сластилина Е.О.* // В сборнике: Надежность и долговечность строительных материалов и конструкций. Материалы международной научно-технической конференции. ВолГАСА. 1998. С. 77-80. ISBN: 5-230-03424-6
 - 47 Некоторые технические решения по экологическим проблемам гальванического производства / *Вурдова Н.Г., Фомичев В.Т., Паршина Е.А.* // В сборнике: Надежность и долговечность строительных материалов и конструкций. Материалы международной научно-технической конференции. ВолГАСА. 1998. С. 64-67. ISBN: 5-230-03424-6
 - 48 Экономичность и экологичность – основной принцип в разработке новых технологий / *Ксенофонтов В.А., Вурдова Н.Г., Фомичев В.Т., Арчакова Е.А.* // В сборнике: Надежность и долговечность строительных материалов и конструкций. Материалы международной научно-технической конференции. ВолГАСА. 1998. С. 94-97. ISBN: 5-230-03424-6
 - 49 Использование нестационарного электролиза для очистки сточных вод / *Вурдова Н.Г.* // Инф. Лист №224-98, ЦНТИ, Волгоград, 1998
 - 50 Нестационарный электролиз в процессах водоочистки и водоподготовки / *Вурдова Н.Г., Фомичев В.Т.* // Инф. Лист №10-98, ЦНТИ, Волгоград, 1998
 - 51 Комплексный подход к организации технологических процессов / *Вурдова Н.Г., Фомичев В.Т.* // В сборнике: Региональные проблемы жилищно-коммунальной реформы // Матер. Науч.-практ. Конф. 11-12 мая. Волгоград, 1998. С. 64-67
 - 52 Нестационарный электролиз в процессах водоочистки и водоподготовки / *Вурдова Н.Г.* // В сб. «Очистка природных и сточных вод», РГСУ, Ростов-на-Дону, 1997
 - 53 Интенсификация электрохимических методов очистки промывных сточных вод / *Вурдова Н.Г., Паршина Е.А.* // В сбор.: Проблемы перехода Волг. обл. к модели устойчивого развития // Матер. науч.-практ. конф. , 4-5 апреля, -Волгоград: ВолГУ, 1996г.- С.178-182.
 - 54 Особенности процесса электролиза в условиях импульсного питания ячейки / *Вурдова Н.Г.* // Градостроительство, ВолГАСА, Волгоград, 1996. ВАК
 - 55 Перспективы использования импульсного тока в процессах очистки сточных вод / *Фомичев В.Т., Вурдова Н.Г., Дырова Е.А.* // В сборнике: Процессы и оборудование экологических производств: Тезисы докладов III традиционной научно-технической конф. стран СНГ, Волгоград, 5-6 дек. 1995г.-Волгоград.1995.
 - 56 Электрохимическая очистка вод нестационарным электролизом / *Вурдова Н.Г., Фомичев В.Т.* // Тезисы докладов X Всерос. Собрания «Совершенствование технологии гальванических покрытий», Киров, 1997. С.24-25
 - 57 Влияние импульсного тока на гидратообразование в примембранном слое / *Вурдова Н.Г.* // Тезисы докладов X Всерос. Собрания «Совершенствование технологии гальванических покрытий», Киров, 1997

- 58 Нестационарный электродиализ в процессах водоочистки и водоподготовки / Вурдова Н.Г., Гончарова А.В., Михайлова Н.В., Колтакова Н.М. // В сборнике междунар. Симпозиума «Экология, жизнь, здоровье». Ч.1. Волгоград, 1996
- 59 Электрокоагуляционная очистка на импульсном токе гальванических сточных вод / Фомичев В.Т., Вурдова Н.Г., Дырова Е.А., Озеров М.А. // В сб. «Гальванотехника и обработка поверхности» // Тез. докл. Всерос. н.-техн. конференции. - Москва.-1996.
- 60 Electrodialysis with cation-exchange membranes in pulsing current conditions / Вурдова Н.Г., Фомичев В.Т. // Тез. докл.Междунар. 22-й конфер. «Ионообменные мембраны: от синтеза к применению», Туапсе, 1996.
- 61 Электродиализное извлечение ионов тяжелых металлов в импульсном токовом режиме / Фомичев В.Т., Вурдова Н.Г. // Градостроительство, ВолгАСА, Волгоград, 1996. – деп.25.03.96 № 913-В96

Патенты

- 62 Установка для очистки производственно-дождевых сточных вод / Вурдова Н.Г., Москвичева Е.В., Юрьев Ю.Ю., Брошко О.С., Бирман Ю.А. // Патент на изобретение №2812328 С1 РФ, МПК С02F 1/465, С02F 1/52, С02F 9/00. - № 2023113857; заявл. 26.05.2023; опубл. 29.01.2024
- 63 Установка утилизации иловых осадкой /Бирман Ю.А., Вурдова Н.Г., Никитин А.А., Фунтиков С.А., Бондаренко М.Г., Кондратьев В.С., Старостин А.Д., Двоскин Г.И., Миголь В.Г., Киров В.Г., Винниченко Н.В. // Патент на полезную модель № 40783 U1 РФ, МПК F23G 5/027. - № 2004114166/22; заявл. 13.05.2004; опубл. 27.09.2004
- 64 Мобильная установка очистки сточных вод /Бирман Ю.А., Вурдова Н.Г., Никитин А.А., Фунтиков С.А. // Патент на полезную модель № 38790 РФ, МПК E03F 7/00.- № 2004106912/20 : заявл. 11.03.2004; опубл. 10.07.2004
- 65 Способ получения гипохлорита /Вурдова Н.Г., Геращенко А.А., Куликова И.А., Лебедев Д.Н., Фомичев В.Т. // Патент на изобретение RU 2238348 , опубл. 20.10.2004. Заявка № 2003124040/15 от 30.07.2003.
- 66 Способ обессоливания воды/ Фомичев В.Т., Вурдова Н.Г. // Патент на изобретение № 2151743 С1 РФ, МПК С02F 1/469, В01D 61/42.- № 98103842/12 : заявл. 03.03.1998; опубл. 27.06.2000/
- 67 Способ очистки электролита хромирования/ Вурдова Н.Г., Фомичев В.Т. // Патент на изобретение № 2083268 С1 РФ, МПК В01D 61/42. - № 93036357/25 : заявл. 14.07.1993; опубл. 10.07.1997.