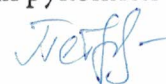


На правах рукописи



Петренко Елена Николаевна

**КОМПЛЕКСНАЯ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ
И ЛИКВИДАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ**

1.5.15 Экология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара
2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель:

Чертес Константин Львович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Слюсарь Наталья Николаевна
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра «Охрана окружающей среды», профессор

Сафаров Альберт Хамитович
кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», кафедра «Прикладная экология», доцент

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ)

Защита состоится «13» декабря 2022г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.377.05, созданного на базе ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», по адресу: 443100, г. Самара, ул Молодогвардейская, 244, ауд. 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и на сайте <http://d24237705.samgtu.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тупицына Ольга Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Деятельность предприятий нефтегазового комплекса сопровождается технологическими потерями. Результатом одного из видов потерь жидких веществ, аккумулированных в природной среде, выступают техногенные залежи углеводородов (ТЗУ). Совместно с компонентами среды залежь составляет природно-техногенную систему (ПТС).

С одной стороны залежи углеводородов выступают источниками вторичных материальных ресурсов (ВМР). С другой стороны – объектами негативного воздействия (ОНВ) на окружающую среду (ОС). Токсичные компоненты, составляющие залежь, отрицательно влияют на породы зоны аэрации, подземные и поверхностные воды, ландшафты, поэтому их ликвидация является важной хозяйственной и экологической задачей.

Существующие подходы к ликвидации залежей ограничены методами откачки углеводородов на поверхность для их последующей переработки. Восстановление нефтезагрязненной среды, очистка подземных вод, защита ненарушенных фрагментов ПТС в зоне влияния залежей современными исследователями не рассматриваются ни на теоретическом уровне, ни в практическом отношении. Отсутствуют не только подходы к оценке состояния залежи как многокомпонентной ПТС, но и сами параметры такой оценки. Это сдерживает выбор методов направленной ликвидации залежей.

Следует отметить, что нет одинаковых залежей. Все они различаются размерами, мощностью, товарно-сырьевым качеством, степенью опасности, а также особенностями природной среды, их вмещающей.

Для решения проблемы негативного воздействия залежей предлагается создание комплексной экологической системы их оценки, моделирования и ликвидации, с учетом набора параметров, позволяющих выбрать методы защиты среды и установить соответствие этих методов выделенным особенностям ОНВ.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в исследование ОНВ, сформированных долговременным поступлением токсикантов в природную среду, а также создание методов ее восстановления внесли отечественные и зарубежные ученые: А.В. Расторгуев, П.Н. Куранов, В.В. Середин, Г.Г. Ягафарова, О.В. Тупицына, А.М. Сафаров, А.М. Богданович, Е.А. Синькова, С.В. Керимов, Н.М. Исмаилов, И.И. Васнев, А.П. Хаустов, М.М. Редина, А.А. Подъячев, У.Т. Гайрабеков, Х.Х. Ахмадова, Э.У. Идрисова, М.А. Такаева, А.С. Велин, В.Л. Бочаров, X.S. Meng, M.M. Wu, H.H. Chen, X. Yue, S.Y. Tao, S. Sadhukhan, K. Aziz, A. Settari и др.

Поддавляющее большинство подходов распространяется на восстановление верхних горизонтов геосреды, с извлечением и перемещением загрязненных компонентов на дневную поверхность и их очисткой. Подобные подходы изучены и успешно применяются до глубин доступа современной землеройной техники (менее 10 м). Недостатками применения перечисленных способов являются возникновение вторичного загрязнения токсикантами и невозможность проведения ликвидации залежей без нарушения сплошности геосреды.

Существующие методы оценки залежей в качестве ВМР и ОНВ на окружающую среду основаны на критериально-параметрических подходах к ним как к статическим объектам. В учет не принимается динамический характер распространения загрязнений, а именно – транспорт в сопряженные ненарушенные компоненты среды:

подземные воды, водоемы и водотоки, водозаборные сооружения и иные области разгрузки токсикантов. Не изучено поведение загрязнений в залежах в зависимости от периодичности колебаний уровней углеводородов по времени, особенностей паводково-меженного режима, изменяемой геометрии техногенного образования в соответствии с ландшафтными особенностями вмещающей его геосреды. Это затрудняет обоснование подходов к обращению с залежами, выбор способов восстановления нарушенных ПТС и создание технологических схем, которые должны включать сочетание методов пассивного и активного воздействия на выделенные ПТС.

Оценка залежей диктует необходимость численного моделирования их поведения в природной среде с целью составления прогноза изменения ПТС и разработки технологических решений по обращению с залежью. Между тем существующие в практике моделирования подходы распространяются в основном на такие объекты, как месторождения подземных вод и традиционные месторождения нефти и газа, рассматриваемые исключительно в качестве источников полезных ископаемых. Необходимы адаптация использования существующих программных комплексов с учетом граничных условий залежей и создание новых моделей их оценки.

Существующие методы защиты ОС от негативного воздействия залежей направлены на иммобилизацию токсикантов путем их аккумуляирования в толще пород, последующего дренирования, откачки и обезвреживания. Существуют методы разложения и удаления нефтепродуктов, преимущественно из поверхностных и сточных вод, а также деградированных проливами почв. Отсутствует практическая реализация перечисленных методов на глубинах расположения региональных водоупоров (основных природных барьеров защиты геосреды от загрязнения), составляющих десятки метров. Целесообразными представляются приспособление существующих методов очистки грунтов от углеводородов и создание новых, «глубинных» методов их восстановления, сочетающих приемы флокуляции, промывки, высоконапорного воздействия. Подобные методы должны учитывать не только природную, но и техногенную компоненту залежей, включая и их выделенные фрагменты.

Цель работы – создание комплексной системы оценки техногенных залежей углеводородов и разработка технологий их ликвидации для снижения негативного воздействия объектов промышленности на окружающую среду.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы и решены следующие задачи:

- анализ существующих методов оценки состояния техногенных залежей углеводородов и мероприятий по восстановлению территорий, подверженных их негативному влиянию;
- разработка комплексной системы оценки техногенной залежи углеводородов, элемента ПТС и объекта негативного воздействия на окружающую среду, обладающего ресурсным потенциалом;
- численное и графическое моделирование залежей как сложных динамических систем;
- создание технологий восстановления территорий, нарушенных техногенными залежами, с использованием пассивных и активных методов защиты окружающей среды.

Научная новизна диссертации:

1. Разработана комплексная система оценки состояния природно-техногенных систем, вмещающих техногенные залежи углеводородов, на основе предложенных критериев, обобщенных в геометрическую, технологическую, геоэкологическую, ресурсно-экономическую и инерционно-колебательную группы.

2. Впервые с целью оценки техногенных залежей углеводородов и прогнозирования динамики их распространения адаптированы к использованию методы трехмерного цифрового моделирования с интерпретацией техногенной залежи углеводородов как многокомпонентной системы вынужденных гармонических колебаний.

3. Изучены зависимости эффекта очистки компонентов геосреды от углеводородов при помощи высоконапорной подачи рабочих растворов на основе флоккулянтов и карбонизированной воды.

4. Научно обоснованы принципы выбора защитных сооружений с определенными конструктивно-технологическими особенностями в зависимости от ландшафтно-геологических свойств фрагментов природной среды, нарушенной залежами.

Объект исследования: техногенная залежь углеводородов в составе природно-техногенных систем.

Предмет исследования: этапы и основные методы оценки техногенных залежей углеводородов для совершенствования действующих и освоения новых технологий их ликвидации.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы:

1. При помощи предложенной комплексной системы оценки природно-техногенных систем, вмещающих техногенные залежи углеводородов, установлено состояние крупного техногенного месторождения и выполнен прогноз его движения.

2. Адаптированные методы трехмерного цифрового моделирования позволяют многократно сократить объем мониторинговых исследований, а также определить технологию и последовательность ликвидационных и восстановительных работ.

3. Интерпретация техногенной залежи углеводородов как многокомпонентной системы вынужденных гармонических колебаний позволила установить соответствие между типом и конструктивными особенностями сооружений активной и пассивной защиты и свойствами фрагментов залежи.

4. Изученные зависимости эффекта очистки окружающей среды от углеводородов с использованием сочетания методов флоккуляции и высоконапорной промывки позволили разработать технологии восстановления территорий в зоне влияния залежей углеводородов.

5. Результаты проведенных исследований были внедрены в учебный процесс кафедры «Химическая технология и промышленная экология» ФГБОУ ВО «СамГТУ» в рамках реализации дисциплин «Основы геоэкологии» и «Учебная практика: проектная практика», «Практико-ориентированный проект» для направлений подготовки 18.03.02, 20.04.01.

Методология и методы исследования. В настоящей работе применен метод системного анализа данных на основе как существующих параметров, так и предлагаемых: эффективные радиус и глубина залежи, амплитуда, частота, фаза и период колебаний в системе «залежь – область разгрузки».

В качестве инструментов оценки использованы методы статистической обработки, численного и графического моделирования.

Отбор и анализ проб грунтов из залежей, подземных и поверхностных вод, а также углеводородов залежи проводили в соответствии с актуальными и утвержденными методиками с использованием современного оборудования.

Замеры уровней водного и углеводородного слоев в наблюдательной сети осуществляли межфазной рулеткой Solinist 122 (CSA) Interface Meter.

Анализ колебаний уровней водоемов проводили с использованием фондовых материалов Территориального фонда геологической информации, Министерства энергетики и ЖКХ, ПАО «РУСГИДРО» и других открытых источников с последующим сопоставлением их с результатами собственных замеров уровней поверхности залежи в скважинах и дренах.

Исследования по очистке компонентов залежей (грунты, подземные воды) от остаточных углеводородов проводили в лабораторных и промышленных условиях с использованием имеющегося в ФГБОУ ВО «СамГТУ» оборудования.

Для разработки цифровых и объемных моделей залежей, а также их выделенных фрагментов использовались программные продукты Petrel (Schlumberger) и Surfer (GoldenSoftware). На основании полученных в результате полевых и лабораторных исследований геометрических, гидрогеологических и фильтрационных параметров, характерных для рассматриваемых объектов, созданы базы данных. При этом, с учетом отличий техногенных залежей от природных месторождений нефти, уточнялись граничные условия: эффективная глубина и мощность, режим питания «сверху», наличие регионального водоупора и влияние области разгрузки подземных вод на миграцию залежи.

Степень достоверности результатов исследования. Все исследования выполнены в полном объеме, с использованием современного оборудования, по актуальным, утвержденным методикам, которые соответствуют цели и задачам исследования. Представленные в текстовой части научные положения, выводы и результаты основаны на фактических данных полевых, лабораторных исследований, а также фондовых данных профильных министерств. Статистический анализ и интерпретация полученных результатов проведены с использованием современных методов обработки информации и статистического анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Новые критериально-параметрическая оценка и блок-схема исследования техногенных залежей углеводородов для последующего обращения с ними как с источниками вторичных материальных ресурсов и объектами негативного воздействия на окружающую среду.

2. Инструмент оценки и моделирования техногенных залежей углеводородов, основанный на инерционно-колебательном подходе и использовании программных комплексов.

3. Результаты исследований очистки различных типов грунтов от углеводородов с применением реагентов и карбонизированной воды.

4. Технологии пассивной и активной защиты и восстановления окружающей среды, испытывающей негативное воздействие техногенных залежей углеводородов.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач диссертации, поиске объектов и обосновании методик исследования, непосредственном участии

в проведении полевых обследований, лабораторных экспериментов и промышленных испытаний, обобщении и верификации полученных результатов, формулировке основных научных положений, выносимых на защиту, их опубликовании и апробации на действующих производственных объектах. Часть исследований была проведена при исполнении договора, заключенного между ФГБОУ ВО «СамГТУ» с АО «НК НПЗ», № 3281818/1098Д от 25.09.2018.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на научном симпозиуме «Урбоэкология. Экологические риски урбанизированных территорий» (Самара – Тольятти, 2021 г.), 20-й международной выставке «Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса» НЕФТЕГАЗ-2021, XIX Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 2021 г.), семинаре «Геоэкологические проблемы техногенного этапа истории Земли» (11 октября 2019 г.) НИУ МГСУ, 21st International conference “Complex systems: control and modeling problems” CSCMP 2019, Седьмом международном экологическом конгрессе (девятой международной научно-технической конференции) «Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов» ELPIT 2019, Международной научно-технической конференции «Инновационные подходы в решении современных проблем рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды» (2019 г.), Ашировских чтениях (2019 г.), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Химия. Экология. Урбанистика» (Пермь, 18–19 апреля 2019 г.).

Публикации по результатам исследований. По теме диссертации опубликовано 17 работ, из которых 4 работы опубликованы в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, и журналах, индексируемых в международной реферативной базе Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 122 листах машинного текста и состоит из введения, 4 глав, списка литературы из 170 наименований, содержит 26 рисунков, 13 таблиц и 1 приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность работы, сформулированы цель и объект исследований, задачи, решение которых позволило разработать комплексную систему оценки и предложить технологии восстановления природно-техногенных систем, вмещающих техногенные залежи углеводородов, с использованием пассивных и активных методов.

В первой главе рассмотрены причины возникновения техногенных залежей и их генезис. Представлено сравнение исследуемых ПТС и ближайших объектов-аналогов: загрязненных углеводородами почв, месторождений подземных вод и традиционных месторождений нефти. Составлен обзор существующих критериев и параметров оценки объектов-аналогов.

На примере рассматриваемых техногенных залежей показана потенциальная возможность обращения с ними одновременно как с источниками вторичных материальных ресурсов и объектами негативного воздействия на окружающую среду.

Показано, что существующие подходы к техногенным залежам углеводородов препятствуют созданию системы их оценки и прогноза трансформации в окружающей среде и подбору обоснованной поэтапной ликвидации с последующим восстановлением компонентов окружающей среды. Показано, что рассматриваемые ПТС являются нестационарными в пространстве и времени многокомпонентными техногенными системами.

Препятствием на пути ликвидации техногенных залежей углеводородов и последующего восстановления компонентов окружающей среды является подверженность ПТС колебаниям уровней воды в областях разгрузки и процессам трансформации углеводородов. Основными задачами выступают ограничение миграции поллютантов в породах зоны аэрации, максимальное извлечение и использование ресурсной составляющей залежи и последующая доочистка природных фрагментов системы.

Во второй главе представлено первое положение, выносимое на защиту, – критериально-параметрическая оценка залежи. Здесь же представлены теоретические предпосылки и методологический аппарат исследований.

Объектами создаваемой системы оценки были выбраны техногенные залежи углеводородов возрастом от 15 до 80 лет, различающиеся по региональной принадлежности и ландшафтным особенностям расположения источника поступления токсикантов в ОС, запасам нефтепродуктов в геосреде-коллекторе в пределах от 0,05 до 2,0 млн т, по товарным углеводородам, глубине расположения водоупора в диапазоне 5,0–100,0 м, радиусу горизонтального распространения загрязнений от 0,5 до 15,0 км.

Наиболее значимые характеристики для последующей оценки залежей как нарушенных природно-техногенных систем представлены в таблице 1. Объекты разнятся по типу и, соответственно, фильтрационным характеристикам вмещающих пород зоны аэрации, дифференцированных на песчано-, глиноподобные и карбонатные. Также различается состав ключевого токсиканта в нефтесодержащем флюиде: от легких до тяжелых фракций, включая содержание ряда тяжелых металлов, участвовавших в процессах этилирования и катализа, иных технологиях химического преобразования углеводородного сырья в продукты. Особое внимание акцентировано на важном

элементе ПТС – типе и порядке водоисточников области разгрузки токсикантов. Именно паводково-меженный режим водоисточников в совокупности с работой водозаборов служит причиной перемещения токсикантов в сопредельные, незагрязненные фрагменты геосреды и определяет поведение ПТС-залежи как динамической системы, подчиняющейся закону вынужденных гармонических колебаний.

Техногенные залежи являются сложными динамическими системами. Выбор и обоснование методов обращения с ними (повышение продуктивности, иммобилизация, локализация очагов загрязнений сопредельных горизонтов, реабилитация или ликвидация) немислимы без прогнозирования поведения углеводородов в породах, отличающихся от коллекторов природных нефтяных месторождений широким набором биотических и абиотических факторов среды. Подобное прогнозирование требует привлечения аппарата численного и объемного моделирования, а также программных продуктов, используемых в отраслях-аналогах: нефтяном, водном, ресурсодобывающем комплексах.

Комплексную оценку исследуемых ПТС на основе залежей предложено проводить с использованием параметрических групп: геометрической, технологической, геоэкологической, ресурсно-экономической и инерционно-колебательной (см. таблицу 1). Сформулированы физический смысл и граничные условия применимости предлагаемых параметров оценки залежи с позиций обоснования последующего производства ликвидационных работ. В частности, предложены такие новые параметры оценки, как эффективные радиус (R_3) и глубина (H_3) залежи, а также новые критерии, влияющие на выбор методов обращения с залежью, – ресурсный потенциал (P), соотношение между свободными и защемленными углеводородами ($N_{св/защ}$). Перечисленные критерии рассчитываются по формулам:

$$P = Z_{п} + C + Y_{пр} + Э_{эп} - Z_{пер} - Z_{трансп} \quad (1)$$

где:

$Z_{п}$ – затраты на извлечение углеводородов и водонефтяной эмульсии, руб.;

C – стоимость извлеченных вторичных ресурсов, руб.;

$Y_{пр}$ – предотвращенный экологический ущерб, руб.;

$Э_{эп}$ – экономия на экологических платежах, руб.;

$Z_{пер}$ – затраты на переработку по оптимальной из существующих технологий, руб.;

$Z_{трансп}$ – затраты на транспортировку, руб.

$$N_{св/защ} = N_{св}/N_{защ} \quad (2)$$

где:

$N_{св}$ – количество свободных углеводородов;

$N_{защ}$ – количество защемленных углеводородов.

Данные показатели определяли расчетным путем на основании проработки материалов инженерных изысканий.

В главе описаны методы и режимы обследования природно-техногенных систем, включающих в себя залежи углеводородов, а также методы лабораторной апробации компонентов окружающей среды и самих углеводородов, обозначены перечни приоритетных показателей.

Блок-схема основных этапов оценки, прогнозирования и управления состоянием ПТС, вмещающих техногенную залежь, показана на рисунке 1.

В главе представлены основные этапы процесса моделирования одной из исследуемых залежей в программном обеспечении Surfer (Golden Software) и Petrel (Shlumberger).

В качестве методического обеспечения обработки, систематизации и наглядной интерпретации результатов оценки состояния техногенной залежи предложены современные инструменты обработки многопараметрических данных – 3D-моделирование в программном обеспечении Surfer (Golden Software) и Petrel (Shlumberger), а также инструменты статистической обработки массива данных полевого этапа обследования – MathCAD и пакет «Анализ данных» Excel. Адаптация подхода к моделированию с помощью специализированных программных комплексов, применяемых для объектов-аналогов, позволила определить принципиальную возможность их использования в целях описания состояния техногенных залежей углеводородов.

В дополнение к описанным методам оценки разработаны предпосылки создания инерционно-колебательной модели ПТС (см. главу 3), позволившие выделить специфические ландшафтно-геологические фрагменты, а также определить режимы, места и объемы работ по восстановлению компонентов окружающей среды.

В **третьей главе** представлены результаты лабораторных и полевых исследований техногенной залежи, описаны этапы ее моделирования и проведена оценка ПТС в соответствии с разработанной системой критериев (см. главу 2, таблицу 1).

Всего в период с января 2014 г. по сентябрь 2021 г. было исследовано 117 скважин с периодичностью 1–2 раза в месяц.

Анализ результатов исследований показал, что в весенний паводок мощность слоя углеводородов снижается за счет резкого подъема границы раздела фаз «нефть – вода» и затем увеличивается после падения ее уровня. При этом «защемленные» углеводороды переходят в свободное состояние. Изменение отметок зеркала залежи происходит с запаздыванием от аналогичного показателя области разгрузки (водохранилища). Данное запаздывание интерпретировано в настоящей работе в качестве фазового сдвига (см. рисунок 3). Численные значения фазового сдвига обусловлены типизацией рельефа и геологии.

На основании просматриваемой на графиках (рисунок 2, верхний график) синхронности хода уровней представлено второе положение, выносимое на защиту. Выявлено, что поведение залежи определяется инерционными свойствами как колебательной системы. Это обусловило подходы к оценке состояния залежи набором показателей: амплитуда (A), период (T), частота (f) и фаза (φ). Значения амплитуды определяют максимальные отметки отклонения зеркала залежи от среднесноголетнего уровня. Период определяет промежуток времени, за который техногенная залежь совершает одно полное колебание. Фаза определяет задержку отклика уровня в скважине на подъем воды в области разгрузки. Данный набор значений является уникальным для каждой скважины и области разгрузки. Практическая ценность выявленных значений определяет режимы откачки углеводородов из добывающих скважин.

Характеристики наиболее изученных техногенных залежей

Территориальная принадлежность	Ландшафтный тип	Ориентировочные запасы, тыс. т	Нзэфф, м	Рэфф, км	Источник утечек	Возраст, лет	Преобладающий тип пород коллектора и Кф (см/с)	Ключевые компоненты загрязнителя	Область разгрузки
Среднее Поволжье	Пойменно-склоновый	1500±200	≤80	15,0±1,0	Рез. парк, коммуникации	70±5	Карбонатные (≤10-5)	Этил. бензин	Два водотока, далее – ввдхр.
Среднее Поволжье	Пойменно-террасный	150±30	≤50	~3,0±0,5	Рез. парк, коммуникации	80±5	Карбонатные (≤10-5)	Дизтопливо	Водоток, далее – старица
Среднее Поволжье	Водораздельный	400±20	≤25	~5,0±1,0	Рез. парк, коммуникации, оборудование	75±5	Глинистые (≤10-6)	Дизтопливо, мазут	Водоток, далее – ввдхр.
Среднее Поволжье	Пойменно-склоновый	50±10	≤25	~0,5±0,5	Рез. парк	60±5	Суглинистые (≤10-7)	Хром, фенол	Ввдхр.
Среднее Поволжье	Водораздельный	100±20	≤30	~1,0±0,5	Нефтешламо-накопитель	50±5	Суглинистые (≤10-7)	Сера	Два водотока
Среднее Поволжье	Водораздельный	50±10	≤35	~1,5±0,5	Шламовые амбары	60±5	Глинистые (≤10-6)	Этил. бензин, сера	Два водотока
Краснодарский край	Надпойменно-террасный	100±10	≤10	~5,0±0,5	Рез. парк, оборудование	85±5	Галечно-песчаные (≥10-3)	Нафта, дизтоп.	Водоток, море
Ростовская область	Надпойменно-террасный	2±0,5	≤5	~0,5±0,1	Рез. парк, оборудование	15±5	Глинисто-песчаные (≥10-4)	Бензин, дизтоп.	Два водотока
Московская область	Надпойменно-террасный	10±2	≤15	~1,0±0,5	Рез. парк	65±5	Песчано-глинистые (≥10-4)	Бенз., дизтоп., тяж. мет.	Водоток, далее – малое ввдхр.
Московская область	Надпойменно-террасный	15±3	≤35	~1,0±0,5	Рез. парк	80±5	Смешанные породы	Авиаци. бенз., битум	Водоток
Саратовская область	Надпойменно-террасный	2000±200	≤15	10,0±1,0	Рез. парк, накопители	70±5	Карбонатно-глинистые (≤10-5)	Бенз., дизтоп., мазут	Водоток, ввдхр.
Республика Коми	Надпойменно-террасный	1000±100	≤50	5,0±1,0	Рез. парк, накопители, коммуникации	80±5	Смешанные породы	Бенз., дизтоп.	Ручей в овраге, далее – водоток
Иркутская область	Пойменно-террасный	1000±100	≤100	5,0±1,0	Рез. парк, оборудование	60±5	Смешанные породы	Дизтоп., мазут	Один водоток-ввдхр.

Группы критериев и параметров для оценки техногенной залежи

Характеристика	Усл. обозн.	Ед. изм.	Значения (диапазон)			Примечание	
			Геометрическая группа				
Эффективный радиус	Rз	км	<1	>1		Расстояние от источника утечек до наиболее удаленной точки, в которой обнаружено загрязнение	
Эффективная глубина	Hз	м	<10	>10		Определяет способ реабилитации загрязненной геосреды	
Эффективная толщина	Δ	м	<10	>10		Расстояние от зеркала залежи до поверхности регионального водоупора	
Технологическая группа							
Тип области разгрузки подземных вод	-	-	-	-		Определяет выбор технологии геотехнологической защиты	
Соотношение свободных и зацементированных н/п	N _{св/зац}	-	<1	>1		Определяет необходимость применения технологий структурно-фазового перераспределения	
Соотношение концентраций н/п в жидкой и твердой фазах	N _{ж/тв}	-	<1	>1			
Геоэкологическая группа							
Степень опасности геосреды	Z	-	10	100	1000	10 000	Определяет токсичность жидкого флюида и степень загрязненности грунтов
Категория защищенности подземных вод	У _{пв}	-	1-6				Определяет необходимость экранирования фрагментов геосреды от загрязнения «сверху» и «снизу»
Концентрация нефтепродуктов в компонентах ОС	C _{н/п}	ПДК	<ПДК	>ПДК			Определяет соответствие компонентов геосреды региональным нормативам или ПДК
Коэффициент фильтрации	K _ф	см/с	<10 ⁻⁵ ; >10 ⁻⁵				Определяет тип коллектора по фильтруемости загрязнений
Площадь нарушенной территории	S	км ²	<1; >1				Определяет площадь воздействия на сопряженные компоненты ОС
Ресурсно-экономическая группа							
Количество и категория утвержденных запасов	V ₃	млн т	1	5	30	1000	Определяет величину месторождения и его потенциал дальнейшей разработки
Дебет залежи	Q ₃	т/сут	1	2			Определяет производительность сооружений по откачке вторичного ресурса и его подготовке

Характеристика	Усл. обозн.	Ед. изм.	Значения (диапазон)			Примечание	
			2	10	20		
Среднее количество хранящихся одновременно УВ	$V_{\text{хран}}$	тыс. м ³	2	10	20	100	Определяет потенциал пополнения залежи сверху за счет потерь углеводородов в местах хранения
Ресурсный потенциал	$RP = Z_{\text{п}} + C + U_{\text{пр}} + Z_{\text{эл}} - Z_{\text{пер}} - Z_{\text{транс}}$						Определяет экономическую целесообразность добычи углеводородов и обращения с ними как с ресурсом
Инерционно-колебательная группа							
Амплитуда	A	м	<2,5			>2,5	Определяется зарегулированностью регионального водохранилища (водотока I рода)
Период	T	год	0,25	0,5		1	Определяется местными паводково-меженными условиями и согласуется с количеством паводков на ближайшем поверхностном водном объекте
Частота	f	1/год	4	2		1	
Задержка	Δt	сут.	15; 30; 60				Позволяет оценить величину отклика уровня воды на подъем воды в водохранилище
Фаза	$\varphi = 2\pi\Delta t/T$	-	0,26; 0,52; 1,03; 2,06; 4,12				Значения предложены на основании анализа картографического и фондового материалов по группам рассмотренных объектов, а также данных инженерных изысканий; определяется местными паводково-меженными условиями

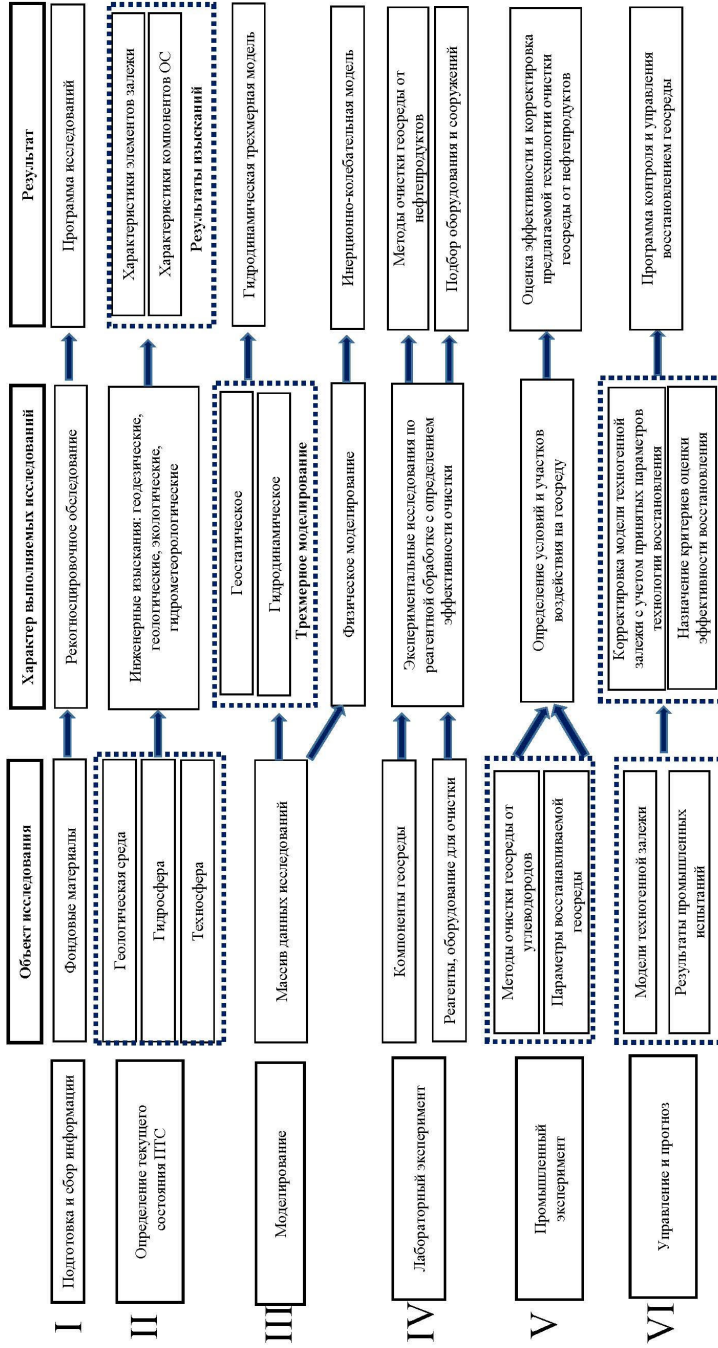


Рисунок 1. Блок-схема основных этапов оценки, прогнозирования и управления состоянием ПТС, вмещающих техногенную залежь

На рисунках 2 и 3 представлен пример графической интерпретации поведения залежи, как ПТС, выполненный в результате обработки группы колебательных параметров и их обобщения в одной из наиболее показательных дрен. Обобщение результатов наблюдений на рис.2 выполнено за период 2014 – 2021 гг., с учетом паводково-меженного режима водохранилища (линия – 1), подземных вод (линия 2), добычи (линия 3).

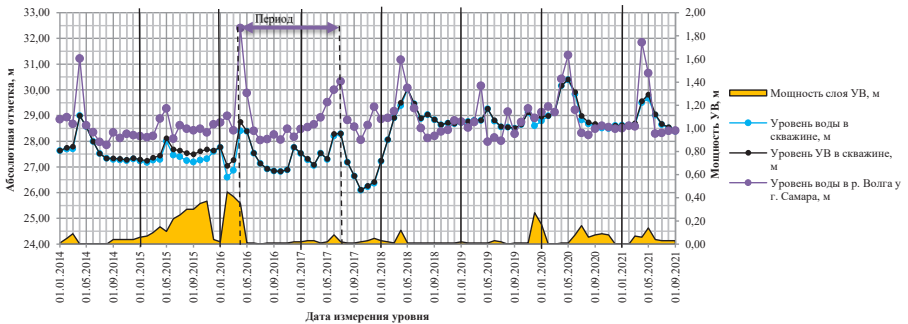


Рисунок 2. Результаты наблюдений за 2014–2021 гг. по одной из скважин

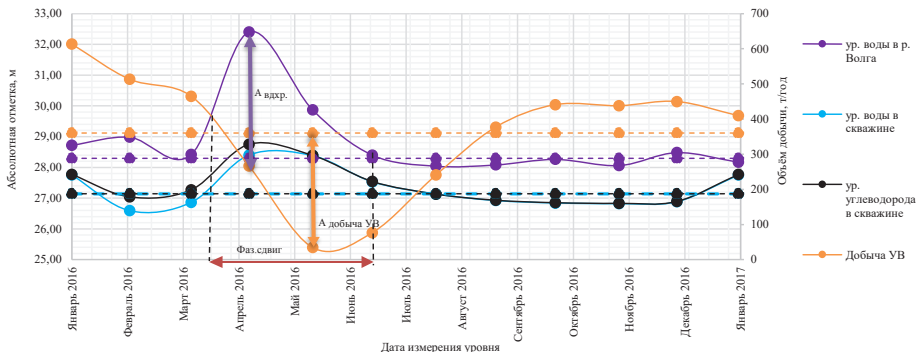


Рисунок 3. Пример инерционно-колебательной модели, выполненной в границах пойменного фрагмента залежи для периода с 01.01.2016 по 01.01.2017

Как видно из рисунка 2, поведение залежи носит волновой характер, с периодом колебаний T в пределах $(0,6–1,0) \pm 0,1$ год. Также на рисунке 3 выделен укрупненный фрагмент волновой интерпретации залежи за более короткий период, составляющий до 1,5 месяцев (паводок 2016 г.). На данном фрагменте представлены параметры колебательной группы – фаза (φ) и амплитуда (A). Фазовые характеристики водохранилища (область разгрузки) и поверхности углеводородов составляют 1,5 и 1,2 мес. соответственно. Амплитуды их колебаний – 4,11 и 1,61 м соответственно. При этом в период паводка (март – май) колебания водохранилища и уровней добычи расположены в противофазе.

На основании полученных в результате полевых и лабораторных исследований компонентов окружающей среды созданы статические и динамические модели ПТС (см. рис. 4 и 5). На сегодняшний день не существует адекватной аналитической модели для прогнозирования движения техногенных залежей в геологической среде, а также моделей, обеспечивающих их оценку как потенциального источника вторичного углеводородного сырья.

В Surfer (Golden Software) построены карты мощностей слоя углеводородов для каждого из обследуемых периодов. Значимым результатом стало определение месяца с измерениями, подходящими для использования при создании геологической модели в Petrel.

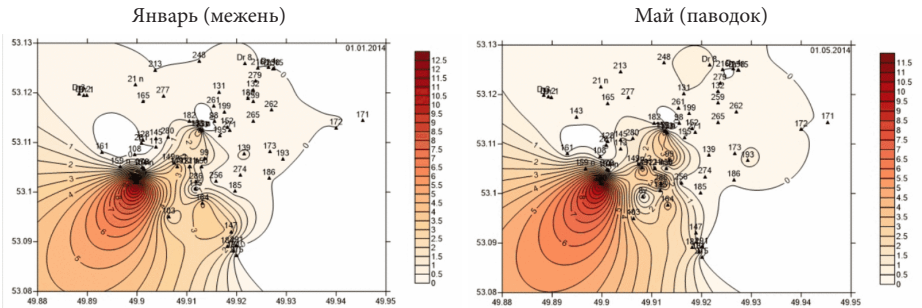


Рисунок 4. Статические модели поведения залежи, интерпретированные в программном обеспечении Surfer для различных паводково-меженных периодов за 2014 г.

Цифровая трехмерная модель техногенной залежи была разработана в Petrel (Shlumberger). На ее основании были определены запасы углеводородов в пределах рассматриваемой территории и основные направления, в которых необходимо усилить мониторинг в связи с миграцией.

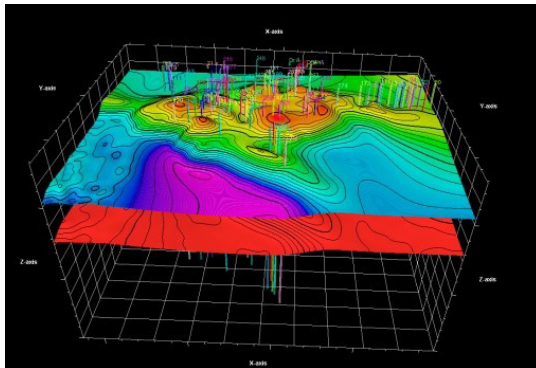


Рисунок 5. Фрагмент модели залежи в четвертичных отложениях, полученный с использованием программного комплекса Petrel, адаптированного к критериально-параметрическим условиям четвертичных отложений

В лабораторных условиях проведено определение загрязняющих веществ в компонентах окружающей среды, качественного и количественного состава углеводородной части залежи, а также подбор реагентов для доочистки подземных вод и грунтов пород зоны аэрации в зоне влияния техногенной залежи.

Содержание нефтепродуктов в породах определялось по фоновым данным по 70 образцам из 17 скважин. Содержание нефтепродуктов в породах зоны аэрации не зависит от их номенклатуры и колеблется в пределах 1,5–3,0 мг/кг при фоновом их содержании 0,3–0,7 мг/кг породы.

Качественный и количественный состав углеводородов, составляющих техногенную залежь, определялся по утвержденным методикам. Дополнительно проводилась хроматография флюида. По результатам качественной оценки в отобранных пробах преобладают углеводороды с длиной цепи С6-С7 (47,55 % масс.), С9 (19,36 % масс.) и С5 (19,09 % масс.). Средняя плотность содержащегося в залежи флюида лежит в интервале 0,726–0,773 г/см³.

В свойствах углеводородного флюида также наблюдается сезонная изменчивость. В паводковые периоды плотность потенциального сырья резко увеличивается, а минимальная наблюдается в периоды, предшествующие наиболее активной добыче нефтепродуктов из очистительных скважин. Среднегодовой тренд плотности углеводородной смеси возрастающий, что отражает процессы «старения» залежи, а значит, и сокращение постоянно поступающих поллютантов в окружающую среду. Содержание свинца (от 5 до 196 мг/кг в период с 2018 по 2021 г.) в пробах потенциального сырья свидетельствует об образовании залежи в период производства этилированных бензинов.

В главе 4 представлено третье положение, проведен лабораторный эксперимент по оценке эффективности реагентной очистки водной и геологической среды от остаточных углеводородов. В испытаниях участвовали следующие марки реагентов: О-БИС, Флокатор 200, Праестол 853, Nalco 4757, Юниклин. Выбор был обусловлен доступностью и обоснован свойствами указанных реагентов. Результаты эксперимента представлены на рисунке 6. Наиболее рациональным для поставленной задачи является отмыватель безотходный ингибирующий самоочищающийся (О-БИС) в дозировке 4 мг/кг обрабатываемого грунта. Достоинством выступает возможность разделения рабочего раствора на углеводород, механические примеси, само вещество после обработки загрязненного грунта и его повторное использование.

На рисунке 7 представлены зависимости эффекта промывки от продолжительности наблюдения для различных условий проведения и геологических особенностей фрагмента залежи. На основании проведенных испытаний выявлено, что наиболее рационально использовать сочетание реагентов и разработанную высоконапорную технологию (зависимости 1, 5, 7).

В четвертой главе рассматривается подбор технологических решений для каждого из этапов ликвидации залежей. Обращение с рассматриваемыми объектами предложено разделить на два этапа:

- Ресурсный этап. Основной целью является извлечение свободных углеводородов, представляющих ресурсную ценность.
- Восстановительный этап ликвидации залежи. Задачей выступает доочистка компонентов окружающей среды от поллютантов до санитарных требований и региональных нормативов.

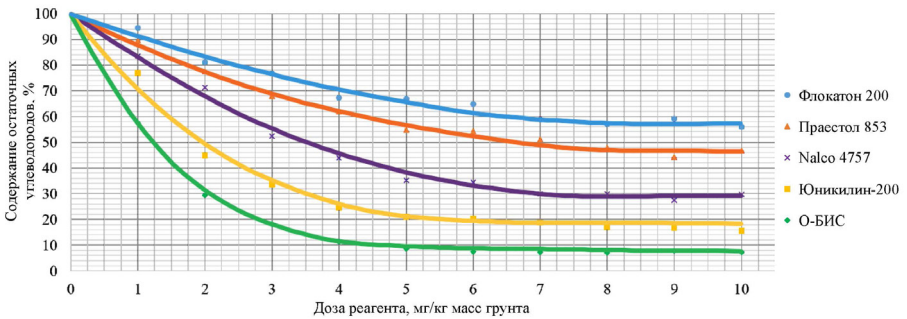
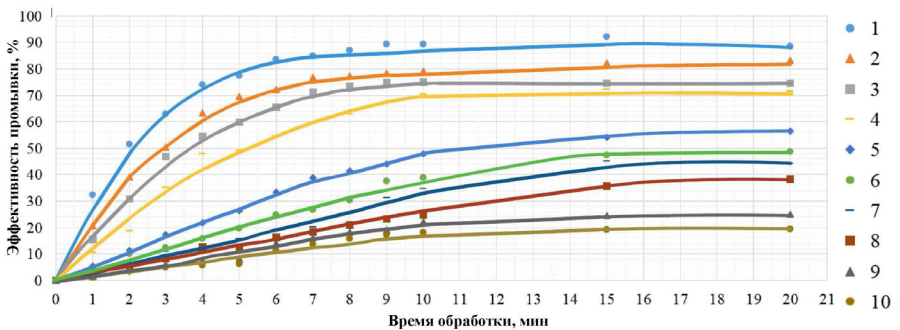


Рисунок 6. Результаты подбора реагентов для доочистки компонентов окружающей среды от остаточных углеводородов



Песчаные грунты:

- 1 – Карб. вода+флокулянт+сода+Jet,
 2 – Карб. вода+флокулянт+сода,
 3 – Карб. вода+флокулянт,
 4 – Карб. вода+Jet,

Карбонатные грунты:

- 5 – Карб. вода+флокулянт+сода+Jet,
 6 – Карб. вода+флокулянт+Jet,

Глинистые грунты:

- 7 – Карб. вода+флокулянт+сода+Jet,
 8 – Карб. вода+флокул+сода,
 9 – Карбон. вода+флокул,
 10 – Карбон. вода

Рисунок 7. Результаты комплексной промывки грунтов.

Песчаные грунты: 1 – карб. вода + флокулянт + сода + Jet,

2 – карб. вода + флокулянт + сода, 3 – карб. вода + флокулянт, 4 – карб. вода + Jet.

Карбонатные грунты: 5 – карб. вода + флокулянт + сода + Jet, 6 – карб. вода + флокулянт + Jet.

Глинистые грунты: 7 – карб. вода + флокулянт + сода + Jet,

8 – карб. вода + флокулянт + сода, 9 – карб. вода + флокулянт, 10 – карб. вода

По итогам проведенных исследований предложено деление залежей по ландшафтно-геологическому типу: пойменные, пойменно-террасные, склоновые, водораздельные, – учитывающее суммарно гидрологическую и гидрогеологическую обстановку. Цветом на космоснимке (рисунок 8) выделены соответствующие зоны, различающиеся по геомеханическим параметрам и величине отклика на гидрологический режим области разгрузки.

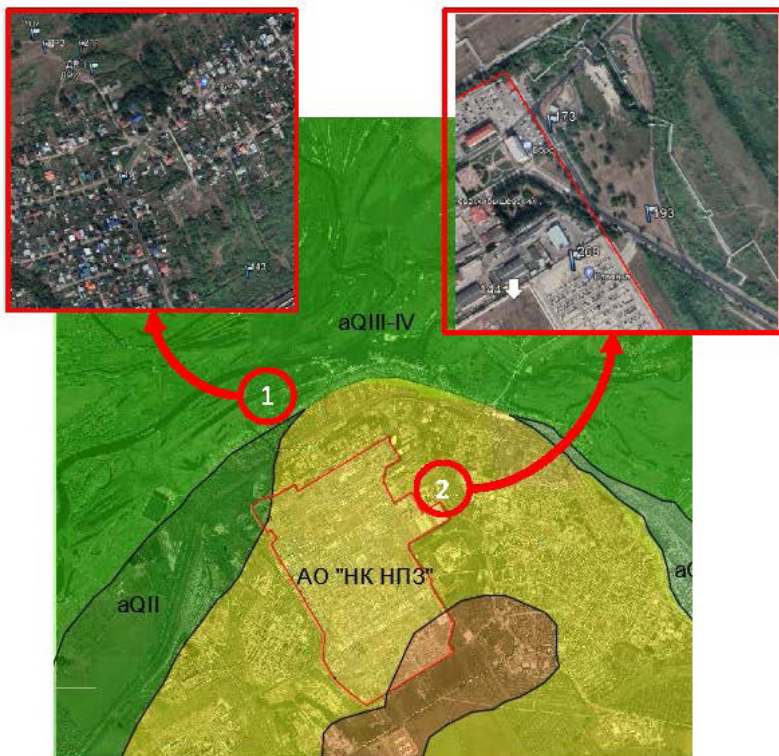


Рисунок 8. Места апробации высоконапорного метода восстановления ОС

Исследованная группа дрен размещается в пойме, где в аллювиальных глинах сосредоточена область аккумуляции углеводородов в виде линзообразного очага. Именно на этом фрагменте ПТС, интерпретированном в виде цифровой и колебательной моделей, рекомендуется устройство комбинированной вертикальной завесы, совмещенной с дренажем, в качестве сооружений пассивного обращения с залежью. При этом дренаж выполняет функции сбора ВМР, а шпунт (стена в грунте) выступает как сооружение локальной защиты области разгрузки от загрязнения со стороны ОНВОС.

На основании представленной типизации территории для каждого элемента ландшафта предложены совокупности активных и пассивных методов ликвидации техногенной залежи и инженерной защиты территории. Активными методами называют те, которые оказывают непосредственное влияние на техногенную залежь и меняют ее качественные и количественные параметры. Пассивные методы – инженерно-защитные сооружения в толще геологической среды, расположенные на пути миграции техногенной залежи и создающие сеть дренажей. Они представлены шпунтами, экранами, дренажными системами. На рисунках 9–11 представлены возможные варианты реализации пассивных методов.

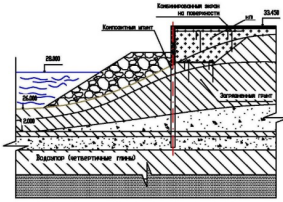


Рисунок 9. Склоновые и водораздельные фрагменты

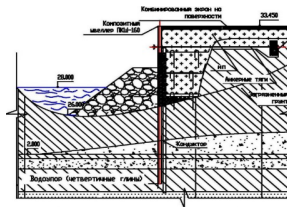


Рисунок 10. Пойменно-склоновые фрагменты

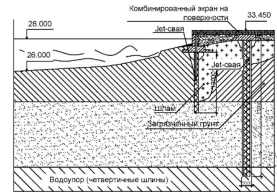


Рисунок 11. Пойменные фрагменты

Так, для пойменных и пойменно-террасных участков предлагается использовать методы пассивной защиты и дренажные системы, предотвращающие выклинивание углеводородов в водные объекты и обеспечивающие их сбор. Для террасно-склоновых фрагментов рекомендовано применение сочетания пассивной защиты на террасах совместно с перехватывающим дренажем и набором активных методов в зонах скопления углеводородов. Использование пассивной защиты для предотвращения увеличения площади и активных методов в виде откачки углеводородов предусматривается на террасах. Возможна интенсификация процессов добычи и очистки. Для водораздельных участков предлагается использовать сочетание пассивной защиты в направлении сторон объекта, приоритетных для распространения углеводородов, и активных методов в виде их добычи.

На рисунках 12–15 представлены технологические схемы восстановления компонентов окружающей среды, нарушенных под влиянием залежи углеводородов.

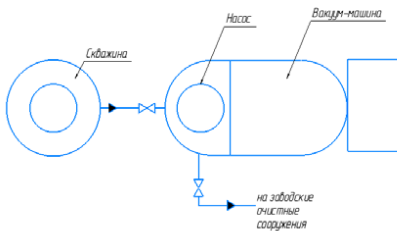


Рисунок 12. Технологическая схема откачки нефтяной эмульсии из геосреды

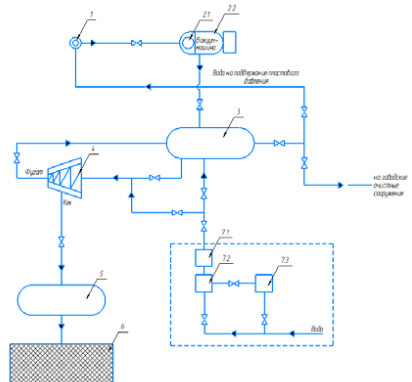


Рисунок 13. Технологическая схема предочистки нефтяной эмульсии без реагентной обработки геосреды:

- 1 – поглотительно-извлекающая скважина,
- 2.1 – насос, 2.2 – вакуум-машина, 3 – модульные КОС (ЛОС), 4 – центрифуга, 5 – биореактор, 6 – узел приготовления грунтоподобных материалов, 7 – узел приготовления флокулянта: 7.1 – дозатор, 7.2 – расходный бак, 7.3 – растворный бак

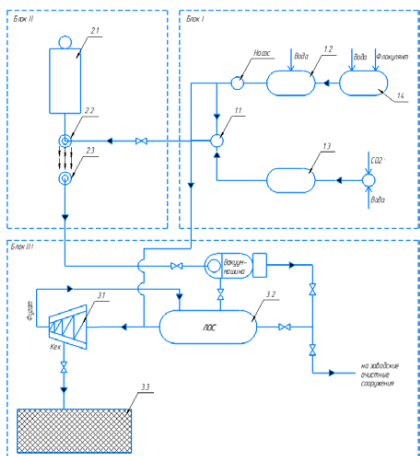


Рисунок 14. Технологическая схема

восстановления компонентов окружающей среды от углеводородов:

Блок I. Реагентное хозяйство: 1.1 – смеситель,

1.2 – расходная емкость, 1.3 – сатуратор,

1.4 – растворный бак.

Блок II. Зона обработки геосреды: 2.1 –

буровая установка, 2.2 – нагнетательная

скважина, 2.3 – извлекающая скважина.

Блок III. Зона очистки стока и обработки

шлама: 3.1 – декантер, 3.2 – модульные ЛОС,

3.3 – площадка компостирования

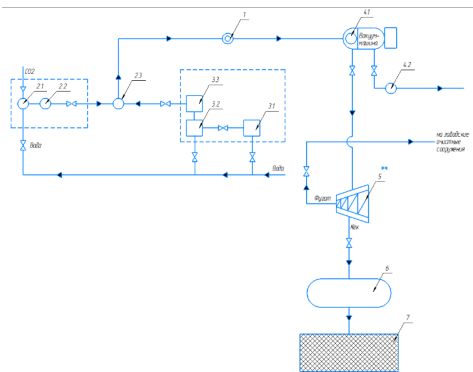


Рисунок 15. Технологическая схема предпочистки нефтесодержащих сточных вод (активный метод санации с совместной реагентной и углекислотной обработкой геосреды):

1 – поглотительно-извлекающая скважина,

2 – узел приготовления углекислой воды:

2.1 – смеситель, 2.2 – сатуратор, 2.3 – насос-

смеситель, 3 – узел приготовления флокулянта:

3.1 – растворный бак, 3.2 – расходный бак,

3.3 – дозатор, 4 – вакуум-машина:

4.1-2 – насос, 5 – центрифуга, 6 – биореактор,

7 – узел приготовления грунтоподобных

материалов

На рисунке 15 представлена технологическая схема, включающая в себя реагентную обработку с использованием высоконапорной технологии, защищенной патентом. Она представляет собой четвертое положение, выносимое на защиту. Предлагаемый способ обеспечивает очистку грунта на всю глубину распространения нефтяного загрязнения с использованием энергии высоконапорной струи карбонизированной воды и самого диоксида углерода. Эффективность очистки при применении высоконапорной технологии повышается за счет распространения применяемого раствора в порах грунта. Данный метод позволяет изменять соотношение заземленных и свободных углеводородов в поровом пространстве коллектора. Важной особенностью реализации технологии является извлечение реагентов и водонепроницаемой эмульсии при помощи предварительно пробуренных эксплуатационных скважин. Данный этап обеспечивает минимизацию как первичного, так и вторичного(реагентного) загрязнения компонентов окружающей среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги исследования:

1. На основе оценки состояния природно-техногенных систем, представленных залежами углеводородов, показано, что наиболее рациональным способом ликвидации является ресурсно-экологический подход, позволяющий на первой стадии локализовать распространяющийся загрязнитель и извлечь его с перспективой ресурсного использования, а на второй стадии довести качество компонентов окружающей среды до требований нормативных документов.

2. Система комплексной экологической оценки техногенных залежей углеводородов позволила выделить типы фрагментов исследуемой ПТС и предложить технологические решения для каждого из них.

3. Изучены особенности цифрового и численного моделирования залежей углеводородов как сложных динамических систем, с использованием программных комплексов, применяемых для природных месторождений. Определены границы применимости моделей.

4. Изучены закономерности реагентной обработки пород зоны аэрации с целью их доочистки от остаточных углеводородов с учетом геологического строения коллектора.

5. Предложены технологические схемы ликвидации техногенных залежей и высоконапорный метод доочистки пород зоны аэрации от остаточных углеводородов.

Рекомендации. Рекомендуется использование полученных результатов исследования при выполнении работ, связанных с ликвидацией техногенных залежей углеводородов и снижением техногенной нагрузки на окружающую природную среду.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Проведение газгеохимической оценки территории залежи с целью определения применимости данного метода при обследовании техногенных залежей и научного обоснования зависимости интервалов концентраций газообразных углеводородов в грунтах и вреда заглубленным сооружениям.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, а также в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и др.

1. Геоинженерная защита территорий, нарушенных объектами накопленного экологического вреда / К.Л. Чертес, О.В. Тупицына, В.Н. Пыстин, В.Я. Шишкин, А.А. Михасек, Е.Н. Петренко, А.А. Букин, А.В. Сергеева, Д.Н. Шерстобитов // Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 4. С. 10–15.

2. Перспективы утилизации шламов на основе серо- и формальдегидо-содержащих отложений / О.И. Кондрачев, Е.Н. Петренко, К.Л. Чертес, В.Н. Пыстин, О.В. Тупицына // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 5. С. 32–36.

3. Chertes K., Pystin V. and Petrenko E. Three-Dimensional Digital Modeling in the Rehabilitation of Hydrocarbon-Contaminated Geo-Environment as the Basis for Managing Man-Made Systems : 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara, Russia, 2019. P. 388–391. Doi: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976504.

4. Санация недр территории нефтеперерабатывающих заводов / Д.Е. Быков, К.Л. Чертес, Е.Н. Петренко, О.В. Тупицына, В.Н. Пыстин, А.А. Подъячев // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 2. С. 9–13.

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях

1. Особенности залежей углеводородов как природно-техногенных систем / К.Л. Чертес, Е.Н. Петренко, В.Н. Пыстин и др. // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология : Материалы Международной научной конференции, Алушта – Белгород, 1–5 июня 1920 г. / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород, 2022. С. 369–373.

2. Санация загрязненной углеводородами геосреды с использованием заводских станций аэрации биохимической очистки сточных вод / А.А. Мальцева, К.Л. Чертес, О.А. Самарина, Е.Н. Петренко // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2021 : Сборник трудов Восьмого международного экологического конгресса (десятой международной научно-технической конференции), Самара – Тольятти, 22–26 сентября 2021 г. / Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук. Самара, 2021. С. 86–89.

3. Проблемы геоэкологической оценки и восстановления пород зоны аэрации от техногенных линз загрязнений / К.Л. Чертес, О.В. Тупицына, В.Н. Пыстин, Е.Н. Петренко // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология / Российская академия наук. 2020. № 2. С. 53–57.

4. Sherstobitov D.N. Spectral index of oil in soil based on visible and near-infrared spectral regions // Twelfth Winter Symposium on Chemometrics. 2020. № 1. P. 62–63.

5. Жежеря А.А., Петренко Е.Н. Инновации в системе мониторинговых исследований техногенных залежей // Геология : Материалы 58-й Международной научной студенческой конференции, 10–13 апреля 2020 г. / Новосибирский государственный университет. Новосибирск : ИПЦ НГУ, 2020. С. 89.

6. Программный комплекс Petrel как инструмент оценки техногенных месторождений нефтепродуктов / А.А. Жежеря, А.А. Бочкина, М.Г. Казязян, Е.Н. Петренко, К.Л. Чертес // Нефть. Газ. Новации. 2020. № 1 (230). С. 81–82.

7. Петренко Е.Н., Чертес К.Л. Техногенные линзы углеводородов и экологическая безопасность предприятий нефтеперерабатывающей отрасли // Актуальные проблемы недропользования : Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции-конкурса студентов и аспирантов. Санкт-Петербург, 2021. С. 71–73.

8. Петренко Е.Н., Чертес К.Л., Тупицына О.В. Исследование техногенных залежей нефти для их последующей ликвидации. Инновационные подходы в решении современных проблем рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды : Сборник докладов Международной научно-технической конференции, Алушта, 3–7 июня 2019 г. Белгород : Изд-во БГТУ, 2019. Ч. II. С. 149–154.

9. Проблемы возникновения техногенных залежей и инновационный метод их решения / А.А. Жежеря, А.А. Бочкина, Е.Н. Петренко, В.Н. Пыстин // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ЕЛРИТ-2019 : Сборник трудов Седьмого международного экологического конгресса (девятой международной научно-технической конференции), Самара – Тольятти, 25–28 сентября 2019 г. С. 93–97.

10. Санация загрязненной углеводородами геологической среды под площадками нефтеперерабатывающих заводов / А.А. Бочкина, О.В. Тупицына, Д.Н. Шерстобитов, М.Г. Казаян, Е.Н. Петренко // Научные труды КубГТУ. 2019. № 3. С. 734–739.

11. Чертес К.Л., Штеренберг А.М., Петренко Е.Н. Оценка состояния и подходы к восстановлению геосреды, нарушенной в результате строительно-хозяйственной деятельности // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 9. С. 1140–1157.

12. Техногенная залежь как открытая геологическая система вынужденных гармонических колебаний / Е.Н. Петренко, К.Л. Чертес, В.Н. Пыстин, О.В. Тупицына // Материалы всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Химия. Экология. Урбанистика», Пермь, 18–19 апреля 2019 г. Т. 1. С. 187–191.

13. Чертес К.Л. Трехмерное цифровое моделирование в технологиях санации загрязненной углеводородами геосреды как базис управления техногенными системами // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : Труды XXI Международной конференции, Самара, 3–6 сентября 2019 г. : в 2 т. / под ред. С.А. Никитова, Д.Е. Быкова, С.Ю. Боровика, Ю.Э. Плешивцевой. Самара : ООО «Офорт», 2019. Т. 1. С. 532–535.

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 03.10.2022.
Формат 60 x 84 1 /16. Бумага офсетная.
Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,34. Тираж 100. Заказ

ООО «Научно-технический центр»
443096, г. Самара, ул. Мичурина, 58
Тел. (846) 336-27-52
E-mail: iopad@mail.ru