

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тульский государственный университет»**

На правах рукописи

ЛУСКИН Григорий Геннадьевич



**ГЕОТЕХНОЛОГИЯ ОТРАБОТКИ
ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛИАРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ,
ОБРАЗОВАВШИХСЯ ПРИ ГАЗИФИКАЦИИ
УГЛЕЙ И ТОРФА**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель -
д-р техн. наук, профессор
Николай Михайлович Качурин

Тула – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР, ЦЕЛЬ И ИДЕЯ РАБОТЫ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Обоснование и выбор объекта исследования.....	11
1.2 Географическая, социальная и геологическая характеристики района расположения объекта исследования.....	20
1.3 Геотехнология добычи стекольных песков.....	35
1.4 Воздействие на окружающую среду поселка Чагода Вологодской области смоляных отходов.....	39
1.5 Анализ возможных способов переработки ПАУ.....	52
Выводы.....	56
Цель и идея работы. Постановка задач исследования.....	58
ГЛАВА 2. ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СМОЛЯНЫХ ОТХОДОВ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ.....	61
2.1 Рекогносцировочное обследование загрязненной территории и исследование состава атмосферного воздуха.....	61
2.2 Результаты опытных геофизических работ по изучению смоляных отходов, накопленных на территории п. Чагода.....	68
2.2.1 Общие методические положения.....	68
2.2.2 Результаты георадарного профилирования.....	72
2.3 Результаты электроразведочных работ.....	79
2.4 Инженерно-геологическое опробование.....	82
2.5 Исследование состава смоляных отходов.....	89
2.5.1 Определение зольности смоляных отходов.....	90
2.5.2 Определение острой токсичности на гидробионтах.....	91
2.5.3 Определение качественного и количественного состава.....	92
Выводы.....	114
ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ ТЕХНОГЕННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СМОЛЯНЫХ ОТХОДОВ (ПОЛИАРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ).....	116
3.1 Исследование горючести техногенных отходов в инсинераторе..	116
3.2 Плазменная газификация углеродсодержащих техногенных отходов.....	130

3.3 Обоснование выбора установки плазменной газификации.....	138
3.4 Обоснование и выбор технологии и технических средств разработки смоляных озер как техногенных месторождений.....	141
Выводы.....	153
ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ФАКТОРОВ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОМПОНЕНТЫ ЭКОСИСТЕМЫ В ПЕРИОД ОСВОЕНИЯ ТЕХНОГЕННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАУ.....	155
4.1 Миграция токсичных компонентов в почве и подстилающих породах с поверхности, прилегающей к смоляным озерам.....	155
4.2 Моделирование геомеханического воздействия на геологическую среду при освоении техногенного месторождения ПАУ.....	160
4.3 Расчет выбросов в атмосферу от установки плазменного пиролиза при переработке ПАУ.....	172
4.4 Определение последствий негативного воздействия на водно- биологическую среду.....	173
4.4.1 Расчет ущерба, наносимого водным биоресурсам при освоении техногенного месторождения ПАУ.....	174
4.4.2 Рекомендации по восстановлению нарушенного состояния водных биоресурсов.....	179
Выводы.....	181
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	183
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	186

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Существующая экологическая ситуация, характеризующаяся накоплением значительных объемов отходов различного происхождения, включая углеродсодержащие промышленные остатки и техногенные образования, порожденные деятельностью горнодобывающего сектора, является ключевой проблемой современного устойчивого развития. Непрерывный рост объемов отходов в совокупности с ограниченными возможностями традиционных технологий их переработки создает острые экологические и экономические вызовы, особенно на территориях с повышенным техногенным воздействием. Одним из критических последствий многолетней эксплуатации таких регионов является техногенное воздействие на окружающую среду в процессе газификации углей. Также отсутствует научное обоснование геотехнологии отработки техногенных месторождений смоляных отходов, которыми являются месторождения полиароматических углеводородов (далее – ПАУ). Техногенные месторождения ПАУ в силу их высокой токсичности, устойчивости и сложности переработки требуют новых подходов к их утилизации.

Проблема техногенных ПАУ, накопившихся в результате деятельности предприятий добывающего и перерабатывающего секторов, является многогранной. Большинство существующих методов переработки этих отходов либо экологически небезопасны (например, неконтролируемое сжигание, сопровождающееся образованием диоксинов и других опасных соединений), либо требуют значительных энергозатрат при невысокой эффективности восстановления ресурсов ценных продуктов. Традиционные технологии переработки, такие как захоронение или пиролиз, не позволяют обеспечить полное разложение сложных органических соединений, а также в большинстве случаев сопровождаются образованием побочных продуктов, вторично загрязняющих окружающую среду.

В рамках федерального проекта «Чистая страна» одна из групп мероприятий проекта акцентируется на задачах, связанных с ликвидацией экологического ущерба от прошлой экономической деятельности. Планируется проведение работ по ликвидации накопленных промышленных отходов. Все объекты прошлой экономической деятельности должны быть размещены в государственном реестре (государственный реестр объектов накопленного вреда). На территории Вологодской области в Чагодощенском районе давняя экологическая проблема является – смоляные отходы, которые являются результатом добычи и газификации углей. Поэтому тема диссертации актуальна.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии со стратегической программой Инжинирингового центра ТулГУ «Машины и оборудование для горнодобывающей отрасли», а также тематическими планами НИР ТулГУ.

Степень разработанности темы исследования. Фундаментальные научные основы и прикладные аспекты развития методов оценки техногенного воздействия геотехнологий на окружающую среду созданы академиком РАН Трубецким К.Н., Чантурией В.А., Захаровым В.Н., членом-корреспондентом РАН Каплуновым Д.Р. Современные принципы развития технологий и выбора оборудования для формирования и отработки техногенных месторождений разрабатываются Пашкевич М.А., Шадруновой И.В., Гендлером С.Г., Качуриным Н.М., Карчагиной Т.В., Крупской Л.Т., Чантурией Е.Л., Александровой Т.Н., Корчагиной Т.В., Рыльниковой М.В., Ефимовым В.И., Мельником В.В., Сарычевым В.И., Левиным Л.Ю. и другими учеными. Однако дальнейшее развитие методических принципов прогноза последствий техногенного воздействия геотехнологий на окружающую среду и научного обоснования технологий освоения техногенных месторождений с учетом их физико-химической специфики в различных геологических условиях требует дополнительных исследований.

Объект исследования – смоляные отходы (полиароматические углеводороды), образовавшиеся при газификации угля и торфа в пойме реки Чагоды.

Предмет исследования – процесс техногенного воздействия полиароматических углеводородов на окружающую среду и геотехнологические аспекты разработки техногенных месторождений ПАУ.

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины по пунктам 9 и 13.**

Целью работы является уточнение закономерностей техногенного воздействия на окружающую среду процессов газификации угля для создания научно обоснованной геотехнологии освоения техногенного месторождения полиароматических углеводородов с применением пароплазменной газификации, обеспечивающей экологически безопасную переработку отходов прошлой экономической деятельности и рациональную технологическую последовательность разработки месторождений ПАУ.

Идея работы заключается в том, что геотехнология освоения техногенного месторождения ПАУ, обеспечивающая экологически безопасную переработку отходов прошлой экономической деятельности и рациональную технологическую последовательность разработки месторождений ПАУ, основывается на использовании метода пароплазменной газификации смоляных отходов.

Современное состояние степени разработанности темы исследований по рассматриваемой проблеме, цель и идея работы обусловили постановку и решение следующих задач:

1. Выполнить рекогносцировочное обследование загрязненной территории, геологический и геотехнологический анализ формирования длительного загрязнения ландшафтов смоляными отходами и оценить общую массу накопленных смоляных отходов.

2. Провести геофизические исследования территорий, загрязненных смоляными отходами, изучить состав и физико-химические свойства смоляных отходов и оценить воздействие на приземный слой атмосферы.

3. Исследовать состав жидких загрязнителей, формирующихся на внешней поверхности смоляных озер, и разработать математическую модель фильтрационно-диффузионной миграции жидких загрязнителей в почвах. Провести вычислительные эксперименты.

4. Определить глубину проникновения жидких загрязнителей в прибрежных почвах р. Чагодоши.

5. Разработать геотехнологические паспорта выемочно-транспортных работ на смоляных озерах и р. Чагодоше.

6. Разработать защиту русла р. Чагодоши от попадания смоляных загрязнителей с использованием шпунтовых ограждений из композитных материалов. Провести моделирование напряженно-деформированного состояния шпунтового ограждения и определить условия безаварийной эксплуатации.

Научная новизна основных теоретических и практических результатов выполненных исследований заключается в следующем:

1. Получена оценка контрастности удельного электрического сопротивления исследуемых грунтов и возможность выделения смоляного загрязнения в грунтовых и донных отложениях электрометрическими методами.

2. Разработаны математические модели нестационарной и стационарной вертикальной миграции компонентов полиароматических углеводородов в горных породах, проведены вычислительные эксперименты и определены физические условия для расчета глубины проникновения загрязнителя.

3. Для разработки техногенного месторождения ПАУ разработаны технологические паспорта ведения выемочных работ, при этом для очистных работ в русле предложено установить экскаватор на понтонах ППЗЗ, которые позволяют экскаватору передвигаться как по берегу, так и по воде. Благодаря дополнительным понтонам и удлиненной стреле экскаватор-амфибия может

вести работы с открытой поверхности воды до глубины 9 м и с глубиной копания 12,5 м.

4. Доказано, что наиболее перспективной технологией утилизации смоляных отходов является пароплазменная газификация, основанная на высокотемпературном воздействии и полном разложении утилизируемых продуктов с помощью дуговой термической плазмы водяного пара. В результате на выходе получается синтез-газ, который представляет собой смесь водорода и оксида углерода и является ценным энергетическим сырьем.

Основные научные положения исследования заключаются в следующем.

1. Электрометрическими методами можно оценить контрастность удельного электрического сопротивления исследуемых грунтов и выделить углеводородное загрязнение в грунтовых и донных отложениях.

2. Миграция токсичных компонентов с поверхностей, примыкающих к техногенным месторождениям углеводородов, удовлетворительно описывается одномерным уравнением параболического типа с учетом кинетики сорбции загрязнителя твердой фазой почв и подстилающих пород для полубесконечного одномерного пространства и граничных условий первого рода.

3. Освоение техногенного месторождения полиароматических углеводородов экологически целесообразно реализовать путем пароплазменного пиролиза с использованием установки, обеспечивающей плазменную газификацию смоляных отходов с получением синтез-газа, и последующей выработкой электрической и тепловой энергии.

Методы исследований. В данной диссертационной работе использовались методы, направленные на комплексное изучение компонентов экосистемы и особенностей техногенных месторождений ПАУ. Для достижения поставленных целей применялись геологические, геофизические и геодезические подходы. Геологическое обследование месторождений ПАУ проводилось с использованием двух способов бурения: колонкового и шнекового.

Колонковый метод бурения обеспечил высокую точность отбора образцов, позволив извлечь практически неизмененные керны породы и техногенных отложений. Анализ кернов дал возможность изучить физико-химические свойства отложений и их внутреннюю структуру. Шнековый метод бурения позволил быстро охватить большие участки месторождений, получить данные о распределении ПАУ по глубине и выявить зоны их наибольшей концентрации. Совместное применение этих методов обеспечило точное картографирование месторождений ПАУ на поверхности. Геофизические исследования помогли определить потенциальное строение смоляных озер, а также построить профили распределения смоляных отходов в русле реки. Дополнительно в работе использовался геодезический метод, который позволил получить точные данные для построения расчетных моделей и проведения комплекса вычислительных экспериментов. Это обеспечило возможность моделирования сценариев безопасного поведения техногенной и геологической среды, а также формирования оптимальных условий для проведения геотехнических работ по разработке месторождений ПАУ, минимизируя риск воздействия на окружающую среду.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов подтверждаются значительным объемом проведенных полевых и лабораторных исследований (геодезические работы, геофизическое профилирование, геологическое опробование участка работ, исследование состава воздуха на техногенном месторождении, исследование химического состава техногенных отходов, оценка степени негативного воздействия месторождения ПАУ на отдельные компоненты экосистемы, экспериментальное термодеструкционное разложение ПАУ, биотестирование зольного остатка, замеры исходящих газов при термодеструкции, оценка пластичных свойств ПАУ, апробация метода биодеструкции и результатами вычислительных экспериментов.

Реализация результатов работы. Основные научные результаты использовались в разработке проектной документации ФГБОУ ВО «Тульский

государственный университет», для реализации геотехнологии по ликвидации техногенного месторождения ПАУ на территории Чагодощенского района Вологодской области, а также в учебном процессе при подготовке горных инженеров по специальности «Горное дело».

Апробация работы. Основные научные положения и практические рекомендации диссертационной работы в целом и отдельных ее разделов докладывались и обсуждались в Московском горном институте НИИТУ МИСИС (г. Москва, 2022–2024 гг.), на научных семинарах кафедры механики материалов и геотехнологий ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (г. Тула, 2022–2024 гг.), на семинарах кафедры экологии Ярославского государственного технического университета (г. Ярославль, 2022–2024 гг.).

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 5 печатных работ, в изданиях, входящих в Перечень ВАК при Минобрнауки России.

Личный вклад автора заключается в выполнении натуральных наблюдений, анализе и обработке статистических данных, полученных в ходе этих наблюдений, разработке математических моделей, проведении вычислительных экспериментов, а также в формулировании научных положений, выводов и практических рекомендаций. Кроме того, автором выполнен полный комплекс экспериментальных исследований, обеспечивших всестороннюю разработку темы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа выполнена и оформлена в соответствии с ГОСТ Р 7.0.112011 на 202 страницах машинописного текста, содержит введение, четыре главы, заключение, 73 рисунка, 23 таблицы, список литературы из 146 наименований.

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР, ЦЕЛЬ И ИДЕЯ РАБОТЫ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Обоснование и выбор объекта исследования

В рамках ряда Федеральных проектов [113, 114, 115] в 2019 году планируется ликвидация 16 несанкционированных свалок в границах городов и 17 наиболее опасных объектов для окружающей среды на территории следующих 8 субъектов Российской Федерации: Кабардино-Балкарская Республика, Республика Северная Осетия – Алания, Чеченская Республика, Волгоградская область, Московская область, Смоленская область, Брянская область, Республика Ингушетия. Проект «Чистая страна» предусматривает поэтапную ликвидацию накопленного экологического ущерба. Одна из групп мероприятий проекта акцентируется на задачах, связанных с ликвидацией прошлого экологического ущерба. Планируется проведение работ по ликвидации накопленных промышленных отходов. Все объекты прошлого экологического ущерба должны быть размещены в государственном реестре.

Вологодская область не попала в перечень проекта «Чистая страна», а на территории области, в Чагодощенском районе, давней экологической проблемой являются накопленные смоляные отходы.

Смоляные отходы Чагодощенского стекольного завода (п. Чагода Вологодской области) образовались в результате сжигания различных видов топлива на заводе. «Чагодощенский стекольный завод на протяжении длительного периода являлся одним из крупнейших производителей оконного стекла. В качестве топлива для стекловарения завод с начала своего существования (с 30-х годов прошлого века), вплоть до 1965 года применял генераторный газ. В качестве первичного топлива для получения синтез-газа применялся торф и каменный уголь марки Г. В процессе газификации топлива, при производстве генераторного газа, образуется значительный объем побочных продуктов, среди которых основным компонентом являются тяжёлые смолы, выделяющиеся в ре-

зультате пиролиза органических материалов. Для очистки генераторного газа от загрязняющих примесей, в первую очередь от смолистых компонентов, на заводе применялись скрубберы – устройства, в которых фильтрация газа осуществлялась с использованием воды. Однако сточные воды, насыщенные тяжелыми смолами пиролиза, а также взвешенными веществами, не подвергались должной утилизации или переработке. Вместо этого они сливались в естественные понижения рельефа на территории завода, расположенные вблизи русла реки Чагодоши. С течением времени по мере заполнения понижений рельефа смоляными отходами (тяжелыми смолами пиролиза) на территории стекольного завода образовались «смоляные озера». В дальнейшем промышленные стоки, исчерпав ёмкость естественных накопителей, стали сливаться в русло реки Чагодоши. На территории бывшего стекольного завода находятся три смоляных озера, площадь которых составляет: малое озеро (западное) – 5 000 м², большое озеро (восточное) 13 500 м², озеро засыпанное – 35 000 м²» [142].

Газификация – это термохимический процесс, при котором углеродсодержащее сырье превращается в синтез-газ, представляющий собой смесь водорода (H₂), монооксида углерода (CO) в различных соотношениях, в зависимости от метода получения синтез-газа, и варьируется (CO:H₂) от 1:1 до 1:3. Также в составе неочищенного синтез-газа присутствуют и другие вещества: метан (CH₄), диоксид углерода (CO₂), инертные газы (N₂), серосодержащие соединения (H₂S) при условии содержания серы (S) в исходном сырье, а также ароматические углеводороды (C_nH_{2n-6}). Именно наличие полиароматических углеводородов (далее – ПАУ) способствует образованию большого количества смоляных отходов. Следует отметить, что образование смолы является постоянным побочным продуктом газификации, который образуется на стадии пиролиза в виде первичных оксигенатов и превращается в ароматические углеводороды, которые вступают в реакцию с другими газами и влагой [117, 120].

Технологии получения синтез-газа, принявшие масштабный характер в начале 30-х годов XX века, не обладали уровнем технического оснащения, позволяющим снижать количество образования тяжелых смол пиролиза в процессе

получения синтез-газа, что приводило к образованию больших объемов смоляных отходов: до 100 г на 1 м³ синтез-газа [1].

Так, по данным из открытых источников, на территории города Улан-Уде находится смоляное (фенольное) озеро, появление которого можно отнести к первой половине XX века, а именно к концу 1930-х годов.

Образовались отходы как побочный «продукт» получения синтез-газа от газогенераторной станции. Смолы, образующиеся в процессе производства, перемещали в карьер золошлакового отвала ТЭЦ-1, по некоторым данным, смоляные отходы сливались в р. Уду. Отсутствие гидроизоляции основания карьера привело к перманентному поступлению химических веществ в подстилающие породы и грунтовые воды. Объем накопленных смоляных отходов составляет 71 000 м³ на площади 3 гектара [118]. Ориентировочный экологический ущерб оценивается в 1,69 млрд рублей.

В период с 2006 по 2008 год проводились мероприятия по рекультивации исследуемого участка с использованием метода отсыпки фенольного озера песчано-гравийной смесью, для отсыпки использовалось 74 тыс. т песчано-гравийной смеси, а стоимость работ составила 16,5 млн руб. [138].

На основании анализа результатов дешифрирования космических снимков различных временных периодов [135, 136, 137] можно сделать вывод, что сокращение площади зеркала фенольного озера явилось, вероятно, единственным положительным результатом данной технологии (рисунки 1.1–1.2). Вместе с уменьшением площади поверхности озера, предположительно, произошло перераспределение отходов: смешивание смоляных масс с песчано-гравийной смесью могло привести к увеличению общего объема техногенных отходов за счёт выдавливания смоляных отходов из нижележащих слоёв грунтового карьера в результате механического воздействия.

Изначальная площадь озера была ~ 27 000 м², после выполнения работ по отсыпке площадь озера составляет ~ 10 000 м², но если приблизительный объем техногенного отхода в карьере ранее был 108 000 м³, то теперь объем техноген-

ного отхода в карьере составляет 182 000 м³ с учетом загрязненной песчано-гравийной смеси.

Таким образом, проведенные мероприятия существенно изменили как геометрию объекта, так и физические характеристики накопленных техногенных масс, что необходимо учитывать при последующих исследованиях территории и разработке планов её дальнейшего восстановления.



Рисунок 1.1 – Космоснимок 1966 г., фенольное озеро (выделено красным),
Улан-Удэ [135]



Рисунок 1.2 – Космоснимок 2020 г., фенольное озеро (выделено красным),
Улан-Удэ

В Нижегородской области (г. Дзержинск) имеется аналогичный техногенный объект (рисунок 1.3). Стоит отметить, что этимология происхождения данного техногенного объекта, до конца не понятна, как и достоверный качественный и количественный состав отходов, несмотря на ряд проведенных исследований [139, 140].



Рисунок 1.3 – «Черная дыра», Нижегородская область

Называют данный техногенный объект «Черная дыра», образован он в 70-х годах прошлого века и представляет собой карстовую воронку в геологической среде, заполненную отходами производства оргстекла с различной морфологической структурой. Площадь объекта составляет 15 000 м², а общий объем техногенных отходов ~ 70 700 м³ (рисунок 1.4) [139].

В ходе исследований, проведенных на объекте различными исследовательскими коллективами, было установлено, что отходы содержат соединения тяжелых металлов, такие как мышьяк (As), висмут (Bi), кадмий (Cd), кобальт (Co), медь (Cu), хром (Cr), железо (Fe), никель (Ni), свинец (Pb), селен (Se), стронций (Sr), ванадий (V), цинк (Zn), марганец (Mn) и титан (Ti). Также в составе обнаружены сернистые соединения, смолисто-асфальтеновые вещества,

алифатические и ароматические углеводороды, кислородсодержащие органические вещества (включая сложные эфиры), хлорсодержащие органические соединения и соли неорганических кислот [139, 140].



Рисунок 1.4 – Морфологический состав отходов в шламнике «Черная дыра»

Также в исследовании [139] выявлены метилметакрилат, различные углеводороды (не уточняется их полициклическая природа), а также такие соединения, как дибутилфталат, фенол, изопропилбензол, альфаметилстирол, цианиды и бутилметакрилат, полихлорированные бифенилы. Однако прямого упоминания ПАУ, к которым относятся, например, нафталин, антрацен, бензапирен, нет.

В июне 2011 года Президентом Российской Федерации Д.А. Медведевым по итогам президиума Госсовета по проблемам экологии в Дзержинске было выдано поручение о ликвидации «Черной дыры» [141].

В рамках реализации проекта ликвидации «Черной дыры» было выделено свыше 1 млрд руб., на технологию термической деструкции. Технология по ликвидации «Черной дыры» основана на перемешивании отхода с инертным материалом (песком) с помощью шнековой установки, далее смесь по конвейерному транспорту (рисунок 1.5) подается в грузовые автомобили для транспортировки на площадку обезвреживания.



Рисунок 1.5 – Мероприятия по ликвидации «Черной дыры»

Логично предположить, что в конкретном случае классический способ сжигания не является экологически безопасным способом ликвидации ввиду большого количества химических веществ в составе техногенных отходов, относящихся к I классу опасности, и сжигание в термодеструкционной установке может привести к значительному увеличению ореола загрязнений экосистемы летучими соединениями, образующимися в процессе сгорания.

Стоит отметить, что обезвредить удалось более 10 000 м³ отходов в период с 2019 по 2020 год, но в 2021 году работы по ликвидации были остановлены ввиду необходимости внесения изменений в проектную документацию.

В настоящее время объект пытаются включить в новый Федеральный проект «Генеральная уборка» Минприроды РФ для дальнейшей актуализации проектной документации, возможно, разработки нового проекта с принципиально другой технологией ликвидации.

Рассматривая различные виды техногенных месторождений ПАУ, можно с уверенностью утверждать, что одной из ключевых проблем, препятствующих их эффективной разработке и переработке, является отсутствие единой и целостной технологической цепи. Именно данный фактор наряду с отсутствием

детально проработанных технологий ликвидации (переработки) техногенных месторождений, содержащих полициклические ароматические углеводороды и углеродосодержащие отходы, определяет актуальность этой задачи в современных условиях.

В период с 2020 года по 2024 год в атмосферу было выброшено 181,58 млрд тонн (рисунок 1.6) диоксида углерода (CO₂) [116], что обусловлено непрерывным ростом потребления первичных энергоресурсов вследствие активной индустриализации мировой экономики, что подтверждается данными различных аналитических служб.

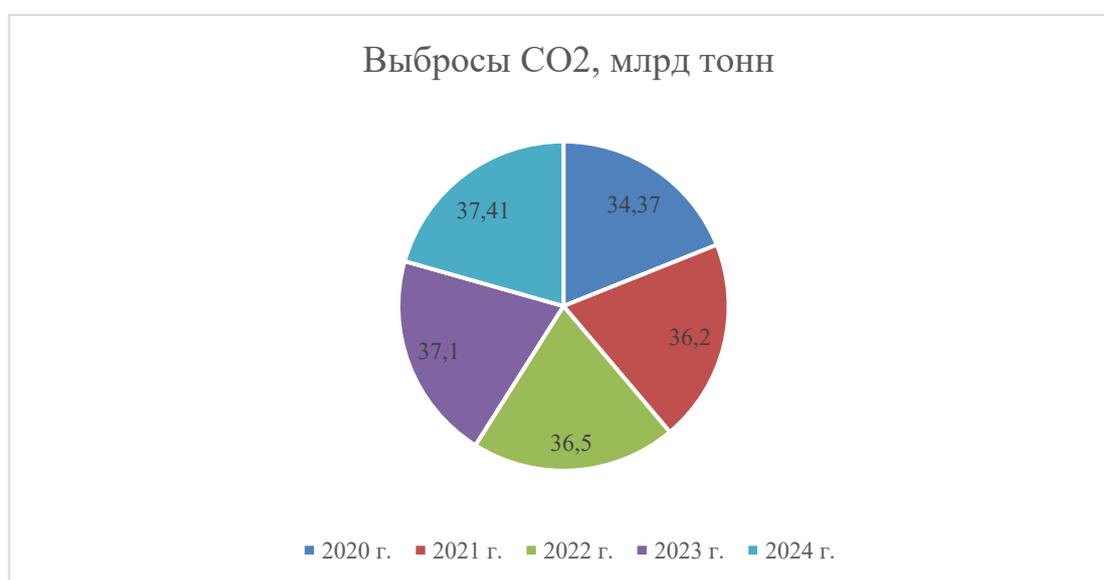


Рисунок 1.6 – Диаграмма выбросов CO₂ в период с 2020 по 2024 гг.

Согласно данным ОПЕК Annual Statistical Bulletin, подтвержденные запасы природного газа на 2024 год в мире составляют 206,4 трлн м³, а нефти – 1,536 трлн баррелей [119].

Также, по данным ОПЕК Annual Statistical Bulletin, мировое потребление нефти в 2024 году увеличилось на 1,82 млн баррелей в сутки и составило 104 млн баррелей в сутки [119]. При сохранении потребления на уровне 2024 года разведанных мировых запасов нефти хватит приблизительно на 40 лет, что в свою очередь обуславливает актуальность вопроса переработки техногенных

месторождений ПАУ, образовавшихся вследствие прошлой экономической деятельности.

Определение смоляных отходов как объекта исследования целесообразно, поскольку они представляют собой техногенный продукт, имеющий значительное накопление во времени и потенциал для переработки в целях извлечения полезных ресурсов. Изучение химического состава отходов (их органической и минеральной фракций) может стать ключом к разработке технологий их вторичного использования, что имеет перспективы как для снижения экологического ущерба, так и для возвращения этих отходов в производственные цепочки.

Ликвидацию последствий техногенного воздействия на окружающую среду, вызванного данными отходами, необходимо реализовать путем их переработки как техногенного месторождения. Подход к переработке должен быть основан на принципах ресурсосберегающих технологий и безотходного производства. Предлагаемый метод является перспективным по ряду нижеследующих причин:

1. Экологический аспект. Снижение накопленных токсичных отходов приведет к стабилизации экологической ситуации в районе Чагоды, что особенно важно для защиты гидрографической сети Вологодской области. Утилизация примесей, таких как смолы и нефтеподобные продукты, минимизирует риски их дальнейшего распространения в окружающей среде.

2. Экономический аспект. Смоляные отходы содержат ценные углеродсодержащие вещества, которые потенциально могут быть использованы в химической промышленности, например как сырье для получения углеродных материалов, топлива, смол или добавок. Использование отходов в качестве вторичных ресурсов позволит снизить экономическую нагрузку предприятий на закупку первичного сырья.

3. Научный аспект. Разработка методов переработки таких отходов потребует проведения глубоких исследований их составе, процесса пиролиза, свойств полученных фракций, а также технологических параметров обработки.

Это может способствовать созданию новых технологически передовых методов нейтрализации отходов.

1.2 Географическая, социальная и геологическая характеристики района расположения объекта исследования

Чагодощенский район – это территориальная единица в составе Вологодской области Российской Федерации. Административный центр – рабочий посёлок Чагода. Чагодощенский район – самая западная территория Вологодской области. Площадь его территории – 2 408,63 км². Протяжённость с севера на юг – 60 км и с запада на восток – 68 км (рисунки 1.7 – 1.8).



Рисунок 1.7 – Карта-схема Вологодской области

Чагодощенский район граничит: на северо-западе с Бокситогорским районом Ленинградской области; на северо-востоке с Бабаевским районом Вологодской области; на востоке с Устюженским районом Вологодской области; на юге с Пестовским районом Новгородской области; на юго-западе с Хвойнинским районом Новгородской области.



Рисунок 1.8 – Расположение п. Чагода

Район расположен в бассейнах рек Чагоды (Чагодощи) и Кобожи, являющихся левыми притоками Мологи. Основные притоки Чагодощи, протекающие в районе, – Горюн, Смердомка, Лидь, Песь (с притоком Ратца), Внина, а притоки Кобожи – реки Белая, Чёрная и Веуч. На территории района более 20 озёр. Наиболее крупные из них – Чёрное, Сиглинское, Угличное, Конево.

Демографическая ситуация в Чагодощенском муниципальном районе, как и в целом по области, в последние два десятилетия имеет стойкую отрицательную тенденцию. Численность постоянного населения Чагодощенского района, по состоянию на 01.01.2017, составила 12 589 человек, в том числе 9 241 человек (73,4 %) – городское, 3 348 (26,6 %) – сельское.

За последние пять лет численность постоянного населения по району сократилась на 1 206 человек (или на 8,7 %). Вместе с тем для района характерна общероссийская тенденция сокращения численности населения, которая обусловлена многими факторами: снижением рождаемости, высоким уровнем смертности, неблагоприятной возрастной структурой населения, негативными явлениями финансово-экономического характера.

Рассматриваемая территория исследования, входящая в Верхневолжский речной бассейн, обладает высокой степенью изученности благодаря значитель-

ному объёму накопленных гидрометеорологических данных и развитой сети наблюдательных пунктов. Территория географически расположена в пределах водосборного бассейна Верхней Волги, который относится к одной из главных водных артерий Восточно-Европейской равнины. Верхневолжский бассейн охватывает множество притоков и водосборных площадей реки Волга, включая участки с разнообразными природно-климатическими и гидрологическими характеристиками, что обуславливает его ключевую роль в формировании водных ресурсов региона.

В рамках исследования было учтено 22 гидрологических поста стационарной сети, которые обеспечивают большие непрерывные ряды наблюдений за стоком реки в течение длительного временного периода, охватывающего от 40 до 78 лет (по состоянию на 2013 г.). Распределение гидрологических постов по территории водосборного бассейна является равномерным, что гарантирует репрезентативность данных для различных участков бассейна. Площади водосборов, привязанные к рассматриваемым пунктам наблюдения, варьируются в пределах от 128 до 19 100 км², что позволяет характеризовать как малые, так и средние реки Верхневолжского бассейна.

Распределение постов по территории Верхневолжского бассейна оказалось равномерным, то есть гидрологическая сеть была устроена таким образом, что данные охватывали разные участки бассейна, не концентрируясь только на одной его части. Это очень важное преимущество, поскольку такая конфигурация обеспечивает репрезентативность, то есть позволяет делать выводы о состоянии всего бассейна реки, а не только об отдельных его зонах.

Кроме того, для анализа влияния климатических факторов на водный режим территории в исследование были включены наблюдения с трёх метеостанций, расположенных в пределах Верхневолжского бассейна (рисунок 1.9).

Локализация метеостанций и их параметры сведены в таблице 1.1.

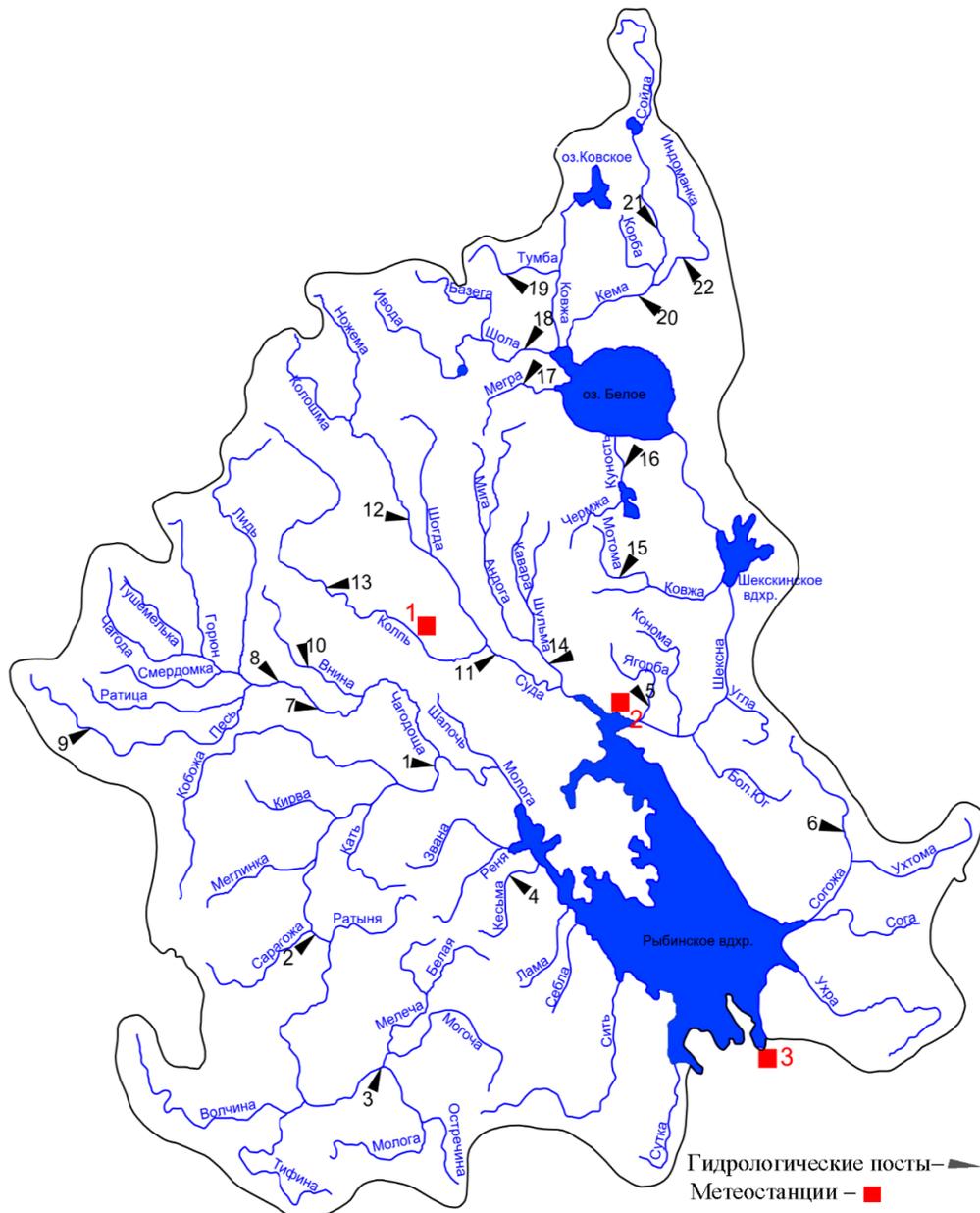


Рисунок 1.9 – Карта-схема расположения гидрологических постов и метеостанций Верхневолжского бассейнового округа

Рассматриваемая территория исследования относится к бассейну Верхней Волги, что подтверждается её физико-географическими характеристиками и результатами наблюдений на существующей сети гидрологических и метеорологических станций. Длительный временной ряд наблюдений, разнообразие используемых постов и репрезентация научных данных позволяют провести детальные исследования водного режима бассейна и выявить его основные этапы развития в контексте гидрологических и климатических процессов бассейна Верхней Волги.

Таблица 1.1 – Метеостанции

Номер на схеме	Индекс метеостанции	Название	Период наблюдения / кол-во лет
1	270080	Бабаево	1949-2010/ 61
2	271130	Череповец	1955-2013/ 58
3	27225	Рыбинск	1949-2013/ 64

Район проведения исследований характеризуется климатическими характеристиками, представленными в таблице 1.2.

Ход амплитуды температур наружного воздуха, а также ход среднего месячного парциального давления водяного пара в Чагодощенском районе Вологодской области показан на рисунках 1.10 – 1.11.

Климатические условия Чагодощенского района Вологодской области отличаются выраженной сезонностью, характерной для умеренно-континентального климатического пояса. Зимний период продолжительный, с устойчивыми отрицательными температурами, сохраняющимися на протяжении пяти месяцев, что создает специфические условия для хозяйственной деятельности. Летний сезон характеризуется умеренно теплой погодой без экстремально высоких температур. Особенностью местного климата является равномерное распределение атмосферных осадков в течение года с некоторым увеличением их количества в теплый период. Такие климатические параметры, включая стабильно высокую влажность воздуха на протяжении всех сезонов, формируют благоприятные предпосылки для развития сельского хозяйства и других видов экономической деятельности в регионе.

Согласно Приложению А СП 131.13330.2020 «Строительная климатология», исследуемый участок в Чагодощенском районе Вологодской области отнесён ко II В климатическому району.

Таблица 1.2 – Климатические параметры для Чагодощенского района
Вологодской области

№ п/п	Наименование климатического параметра	Численное значение климатического параметра
Климатические параметры теплого периода		
1	Барометрическое давление, гПа	1000
2	Температура воздуха, °С, обеспеченностью 0,95	21
3	Температура воздуха, °С, обеспеченностью 0,98	26
4	Средняя максимальная температура воздуха наиболее теплого месяца, °С	22,5
5	Абсолютная максимальная температура воздуха, °С	35
6	Средняя суточная амплитуда температуры воздуха наиболее теплого месяца, °С	11,6
7	Средняя месячная относительная влажность воздуха наиболее теплого месяца, %	73
8	Средняя месячная относительная влажность воздуха в 15 ч наиболее теплого месяца, %	60
9	Количество осадков за апрель–октябрь, мм	450
10	Суточный максимум осадков, мм	60
11	Преобладающее направление ветра за июнь–август	3
Климатические параметры холодного периода		
1	Температура воздуха наиболее холодных суток, °С, обеспеченностью 0,98	-40
2	Температура воздуха наиболее холодных суток, °С, обеспеченностью 0,92	-36
3	Температура воздуха наиболее холодной пятидневки, °С, обеспеченностью 0,98	-36
4	Температура воздуха наиболее холодной пятидневки, °С, обеспеченностью 0,92	-31
5	Температура воздуха, °С, обеспеченностью 0,94	-17
6	Абсолютная минимальная температура воздуха, °С	-47
7	Средняя суточная амплитуда температуры воздуха наиболее холодного месяца, °С	7,5

Продолжение таблицы 1.2

№ п/п	Наименование климатического параметра	Численное значение климатического параметра
Климатические параметры теплого периода		
8	Продолжительность периода со среднесуточной температурой воздуха ≤ 0 , сут.	158
9	Средняя температура воздуха периода ≤ 0 , °С	-7,3
10	Продолжительность периода со среднесуточной температурой воздуха ≤ 8 , сут.	231
11	Средняя температура воздуха периода со среднесуточной температурой воздуха ≤ 8 , °С	-3,8
12	Продолжительность периода со среднесуточной температурой воздуха ≤ 10 сут.	250
13	Средняя температура воздуха периода со среднесуточной температурой воздуха ≤ 10 , °С	-2,7
14	Средняя месячная относительная влажность воздуха наиболее холодного месяца, %	86
15	Средняя месячная относительная влажность воздуха в 15 ч наиболее холодного месяца, %	84
16	Количество осадков за ноябрь–март, мм	174
17	Преобладающее направление ветра за декабрь–февраль	ЮЗ
18	Средняя скорость ветра за период со средней суточной температурой воздуха < 8 °С, м/с	3,6

Климат района характеризуется выраженной сезонностью и умеренно-континентальными чертами. Теплый период довольно продолжительный (231 сутки), со средней температурой $-3,8$ °С, умеренно влажный и характеризуется умеренно высокой температурой воздуха. Зимний период суров и продолжителен (250 суток со среднесуточной температурой ниже 0 °С), с низкими температурами, особенно в ночное время, и значительно меньшими осадками. Общая влажность воздуха остается достаточно высокой в течение года, отличаясь только небольшой сезонной динамикой.

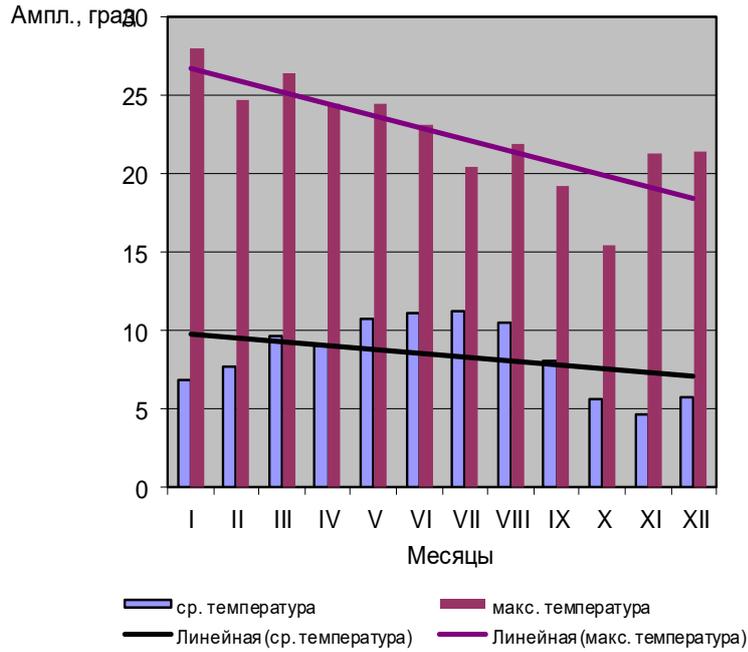


Рисунок 1.10 – Ход амплитуды температур наружного воздуха в Чагодощенском районе Вологодской области

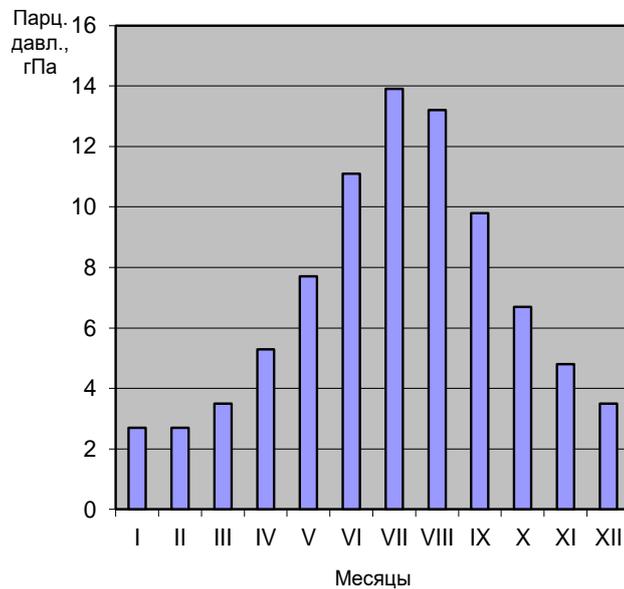


Рисунок 1.11 – Ход среднего месячного парциального давления водяного пара в Чагодощенском районе Вологодской области

Геологическое изучение Вологодской области имеет долгую историю и включает в себя несколько этапов, которые тесно связаны с развитием геологических наук и потребностями народного хозяйства на разных этапах истории. Основное внимание исследователей было сосредоточено на западной и юго-восточной частях области, где в разные годы проводились поиски и изучение полезных ископаемых, разведка подземных вод и анализ четвертичных отложений. Расположение области на Русской платформе и значительная территория, покрытая осадочными породами, привели к интересу к этой области как у российских, так и у зарубежных геологов.

Область географически расположена в пределах Восточно-Европейской равнины, а геологически – в составе Русской платформы. Эта структура включает древний кристаллический фундамент, перекрытый мощным слоем осадочного чехла, где возраст пород варьируется от докембрийских до четвертичных. Кристаллический фундамент здесь состоит из гранитов, гнейсов, амфиболитов и других метаморфических пород архейского и протерозойского возраста. Он существенно углубляется в юго-восточном направлении, что исторически затрудняло доступ к фундаменту для более детального изучения. Осадочный чехол покрывает территорию области неравномерно и состоит из песчаников, глин, известняков и мергелей, накопленных в различные геологические периоды, начиная с палеозоя и заканчивая современными отложениями.

Геологическое строение и полезные ископаемые. Первичные сведения о геологическом строении Вологодской области начали появляться в XVIII–XIX веках. На этом этапе исследования носили преимущественно поверхностный и рекогносцировочный характер. Значимый вклад в изучение региона внесли работы пионеров российской геологии, таких как М.В. Ломоносов, который уделял внимание описанию минеральных богатств северных районов России, включая территорию современной Вологодской области. В XIX веке геологоразведочные изыскания здесь проводились в рамках более крупных проектов по изучению Европейской части России. Уже тогда было установлено, что значительные тер-

ритории области покрыты отложениями, сформированными в результате древних морских трансгрессий и последующих ледниковых эпох [2, 3, 4, 5].

Качественный скачок в геологическом изучении региона произошел в XX веке. В 1930-е годы сюда начали прибывать специализированные научные экспедиции, которые не только изучали стратиграфию осадочных пород, но и занимались поиском полезных ископаемых, включая бокситы, фосфориты и карбонатные породы. Во время советского периода особое внимание уделялось разведке месторождений сырья, необходимого для промышленности, таких как цементное сырье, строительный камень, песок и глины [2,5].

В 1950–1970-х годах в области проводились масштабные геологические съемочные работы в масштабе 1:500 000 и 1:200 000. Это было время активного уточнения геологической карты региона, выявления структур осадочного чехла и уточнения границ кристаллического фундамента. Кроме того, значительная часть исследований была посвящена изучению четвертичных отложений, связанных с последними оледенениями, которые сильно повлияли на современный рельеф области [6, 7, 11].

Геологическое строение Вологодской области определяет ее принадлежность к Русской платформе. Осадочный чехол сформирован породами палеозойского, мезозойского и кайнозойского возраста. Среди них выделяются слои девонских известняков, которые часто выходят на поверхность на юге области, образуя карстовые формы рельефа. Известняки юрского возраста встречаются на северных и западных окраинах области. Эти породы являются важным источником сырья для местных цементных и известковых производств [5, 6, 7, 8, 9, 10].

Кристаллический фундамент области залегает на значительных глубинах. Достоверные сведения о его составе были получены благодаря глубокому бурению, начатому в 1950-х годах. Он включает породы архейского и протерозойского возрастов, а также граниты, гнейсы и метаморфические породы. Находки минералов в этих породах включают кварц, полевой шпат и слюды, однако промышленное значение этих находок не было подтверждено.

Особое внимание уделялось поискам полезных ископаемых. Вологодская область оказалась бедной на крупные месторождения рудных полезных ископаемых. На значительной части территории велись поиски бокситов (в основном в районе Тихвина на западе области), но их запасы оказались нерентабельными для разработки. Небольшие запасы фосфоритов и гипса не нашли промышленного применения. Однако на территории области ведется добыча строительного сырья, включая пески, гравий, мергель и известняк. Кроме того, в местах значительного развития карбонатных пород был зафиксирован выход минеральных вод, которые могли бы быть использованы в лечебных целях.

Четвертичные отложения составляют важный элемент геологической структуры области. Территория Вологодской области в значительной степени была покрыта ледниковыми щитами во время московского, днепровского и валдайского оледенений. Эти процессы оставили после себя мощные слои морен, песчано-гравийные отложения, а также различные формы ледникового рельефа – валы, гряды, холмы и овраги. Четвертичные отложения используются в строительстве, главным образом как нерудные материалы.

Гидрогеологическая структура области сложная и разнообразная. На территории распространены как грунтовые, так и артезианские воды. В некоторых участках артезианские воды залегают в соленосных отложениях и поэтому имеют частично минерализованный состав. Минеральные воды были локализованы в западной и южной частях области, хотя масштабы их использования пока ограничены. Большие запасы пресной воды находятся в четвертичных отложениях, что делает их значительным природным ресурсом региона.

Главным фактором, сформировавшим современный рельеф области, стало воздействие ледников. Территория была многократно покрыта ледниками, которые оставили после себя разнообразные ландшафтные формы: моренные равнины, ледниковые валы, озерные котловины, созданные талой водой. Эти процессы также повлияли на структуру почвы и растительный покров области. В постледниковый период начались процессы эрозии и аккумуляции, которые

сформировали низменные долины ряда крупных рек, таких как Сухона, Северная Двина и Молога [2, 3, 4, 5, 12, 13].

В последние десятилетия геологическое изучение Вологодской области акцентировано на экологических аспектах. Осуществляются мониторинг состояния подземных вод, изучение устойчивости ландшафтов к антропогенному воздействию, а также вопросы охраны природных ресурсов. Изучение четвертичных отложений и рек также продолжает быть актуальным для понимания истории формирования рельефа региона.

Таким образом, геология Вологодской области представляет собой сочетание изучения древних глубоких структур Русской платформы с современными процессами, связанными с четвертичной геологией и гидрогеологией. Регион богат ресурсами для локального использования, однако дефицит крупных месторождений рудных ископаемых делает его менее привлекательным для масштабных разработок.

Полезные ископаемые. На территории Вологодской области отсутствуют крупные месторождения полезных ископаемых, имеющих общенациональное значение. Тем не менее регион успешно обеспечивает свои экономические и хозяйственные нужды благодаря собственному минерально-сырьевому потенциалу. Особенно важным является наличие месторождений строительных материалов, таких как глины для производства кирпича, инертные материалы и агрохимическое сырье, которые в полной мере удовлетворяют внутренние потребности области [4, 14].

Геологическое строение Вологодской области определяет состав полезных ископаемых – преобладание нерудных и почти полное отсутствие рудных. Разведаны существенные запасы минерального сырья для обеспечения потребности промышленности. В основном это строительные материалы: известняк, доломиты, мергель, песок, гравий. Широко распространены различные виды глин, торф, сапропель, поваренные соли, болотные железные руды. В восточной части Вологодской области были обнаружены залежи алмазов.

Кроме того, в недрах региона находятся пресные воды, а также воды с низким уровнем минерализации и минеральные источники [14, 15, 16].

Экономика Вологодской области не характеризуется как экономика, основанная на минерально-сырьевом секторе. Доля её минерально-сырьевого потенциала составляет лишь 0,045 % от общероссийского уровня. Согласно проведённой геолого-экономической оценке, стоимость запасов полезных ископаемых региона оценивается в 266,5 млрд руб.

Месторождения строительных песков широко распространены на территории Вологодской области. На государственном балансе числится 25 таких месторождений, а территориальный баланс включает ещё 20 небольших объектов. К наиболее значимым относятся русловые месторождения: Тотемское 2, Тотемское 1, Котельное, Усть-Толшменское и Сухореченское, которые находятся в русле реки Сухоны, а также Высоковское и Чирковское, расположенные в русле реки Кубены. Запасы строительных песков также учитываются на месторождениях песчано-гравийных материалов, таких как Гремяченское и Абакановское [14, 16, 18].

Вологодская область не имеет выраженной минерально-сырьевой специализации в экономической структуре. Доля региона в общероссийском минерально-сырьевом потенциале составляет всего 0,045 %, при этом суммарная оценка запасов полезных ископаемых области достигает 266,5 млрд рублей.

Строительные пески широко распространены на территории области. В настоящее время на государственном балансе числятся 25 месторождений, дополнительно 20 небольших месторождений состоят на территориальном учете. Наибольшее промышленное значение имеют русловые месторождения: Котельное, Тотемское 1 и 2, Сухореченское и Усть-Толшменское в русле реки Сухоны, а также Чирковское и Высоковское в бассейне реки Кубены. Отдельно учитываются запасы песчано-гравийных месторождений Абакановское и Гремяченское. В бассейне реки Шексны и акватории Рыбинского водохранилища расположены неэксплуатируемые месторождения: Красный Бор, Новосудское,

Романдовские Мысы, Торовское, Федосово и Черная Речка, часть которых по экологическим соображениям отнесена к забалансовым [14, 16, 18].

Регион полностью обеспечен строительными песками для текущих потребностей. Перспективы расширения добычи связаны с использованием песков-отсевов на действующих песчано-гравийных месторождениях и результатами поисково-оценочных работ. Единственное месторождение кварцевых стекловых песков Сазоновское характеризуется относительно низким качеством сырья (90,7 % кремнезема, 83 % оксидов железа, 4,7 % глинозема) и используется для производства темного бутылочного стекла. В Вытегорском районе разведаны три месторождения кварцевых песков, пригодных для литейного производства. Из них только Кленовское месторождение (пески марок 4К20103 и 5К20103) состоит на государственном балансе и поставляет сырье для ОАО «Северсталь», тогда как Мокридинское и Патровское месторождения пока остаются на кадастровом учете.

Перспективные запасы кварцевых песков связывают с участком Мокридино-Озерки, который представляет собой значительный интерес для дальнейшей разработки. В регионе также обнаружены два месторождения, пригодных для получения сырья для производства силикатного кирпича: Тимошкинское, расположенное в Бабаевском районе, и Смердяч в Кадуйском районе. Тимошкинское месторождение ранее активно разрабатывалось для нужд Череповецкого завода силикатного кирпича, однако в настоящее время оно находится в состоянии консервации. Что касается месторождения Смердяч, то на данный момент оно рассматривается как резервный источник сырья.

Песок для производства стекла. Кварцевый песок – это уникальный природный материал, без которого невозможно представить изготовление стекла. Его главное преимущество – исключительная чистота: он почти полностью состоит из диоксида кремния (SiO_2), а примеси (глина, оксиды железа) тщательно удаляются в процессе подготовки. Чем чище песок, тем прозрачнее и прочнее получается стекло.

Процесс преобразования обычного песка в высококачественное стекло представляет собой сложный и многогранный технологический процесс, включающий несколько ключевых этапов. Первоначально исходное сырье проходит глубокую очистку, которая проводится с использованием разнообразных методов, включая промывку для удаления органических и механических загрязнений, магнитную сепарацию для устранения примесей железа, а также химическую обработку, позволяющую ликвидировать остаточные глинистые частицы и железосодержащие соединения. После завершения этапа очистки песок подвергается сушке для удаления излишней влаги и сортируется по фракционному составу, обеспечивая оптимальный размер зерен для дальнейшего использования. Самым ответственным и финальным этапом этой технологической цепочки становится плавление песчаной массы. Этот процесс выполняется в специальных промышленных печах при чрезвычайно высоких температурах, иногда превышающих $2\ 000^{\circ}\text{C}$, в результате чего кварцевый песок превращается в однородную жидкую массу, готовую для изготовления стеклоизделий различного назначения.

Конечное применение кварцевого песка в стекольной индустрии определяется уровнем его очистки и размером гранул. Для производства стандартных видов стекла, таких как оконное или тарное, достаточно песка с содержанием кремнезема (SiO_2) не ниже 99 %. Однако для создания продукции премиум-класса, например хрусталя или оптического стекла, требуется исключительно чистое сырье с минимальным содержанием железа, которое не должно превышать отметки в 0,02 %. Помимо базового состава, для изготовления специализированных видов стекла (например, лабораторного или жаропрочного) в процессе плавления к очищенному песку добавляют дополнительные химические компоненты, такие как оксид алюминия, что позволяет придавать стеклу уникальные эксплуатационные свойства и улучшать его устойчивость к высоким температурам или химическому воздействию.

Технология подготовки песка для производства стекла включает термическую обработку сырья под давлением 0,255 МПа при 30–90 °С. Затем температура поднимается до 500 °С и выше на 60–90 минут с добавлением аммиачного раствора. В результате получают кварцевый песок в оболочках из натриевой силикатной соли. Далее сухую и жидкую фазы разделяют вибрационным ситом, а влажный песок высушивают при 600–800 °С, что способствует энергоэффективности и качеству готового материала.

1.3 Геотехнология добычи стекольных песков

Открытый способ добычи в настоящее время является преобладающим методом разработки месторождений полезных ископаемых различных видов [23, 24]. В качестве основного оборудования для выемки и погрузки горной массы широко применяются одноковшовые экскаваторы [25]. Современные тенденции в горнодобывающей отрасли демонстрируют устойчивый рост использования гидравлических экскаваторов с оборудованием типа "обратная лопата" в составе экскаваторных комплексов [26, 27]. Наибольшее распространение данная техника получила на карьерах строительных материалов, включая разработку как сухих, так и обводненных месторождений песчано-гравийных смесей (ПГС) [28, 29, 30]. Следует подчеркнуть, что ПГС составляют порядка 50 % от общего объема добычи нерудных строительных материалов [31, 40].

В данной работе изучены технологические схемы для современных моделей экскаваторов. В качестве базовых выбран модельный ряд фирм – производителей карьерной техники Hitachi и Komatsu как наиболее распространенных на открытых горных работах России [46]. К каждой модели подбирался автосамосвал из расчета 4–6 ковшей, достаточных для полной загрузки кузова автосамосвала [47, 48]. Основными параметрами системы разработки при использовании гидравлических экскаваторов типа «обратная лопата» можно считать вы-

соту уступа, ширину заходки, ширину рабочей площадки. В современных условиях разработки наиболее распространенным методом ведения добычных работ на подступе является вариант с нижней погрузкой. Данная схема позволяет разрабатывать уступы на всю высоту одним проходом и может применяться при разработке мощных залежей необводненных ПГС. При делении на подступы появляется возможность более эффективно использовать верхнее или нижнее черпание гидравлического экскаватора типа «обратная лопата», при этом можно варьировать величину верхнего или нижнего подступа.

Технология разработки месторождений с подступа методом верхней погрузки (рисунок 1.14) имеет ограниченное распространение в горнодобывающей практике вследствие снижения производительности технологического процесса. Применение данной схемы требует комплексного подхода, включающего детальное изучение кинематики движения экскаваторного ковша, оптимизацию процесса разгрузки горной массы, а также тщательное проектирование размещения транспортного оборудования на вышележащем горизонте с учетом его технических характеристик. Однако существенным технологическим преимуществом этой схемы является возможность эффективной отработки месторождений с повышенной мощностью пластов при расположении экскаватора на подступе, что выгодно отличает её от традиционной схемы с нижней погрузкой [143].

Рассматриваемая технология предлагается для разработки месторождений ПАУ и может быть успешно реализована с использованием современных методов горной добычи, включая гидравлические экскаваторы типа «обратная лопата». Такой подход обеспечивает высокую производительность и гибкость при разработке месторождений, где залегание сырья имеет сложную структуру или требуется максимальная эффективность на отдельных участках.

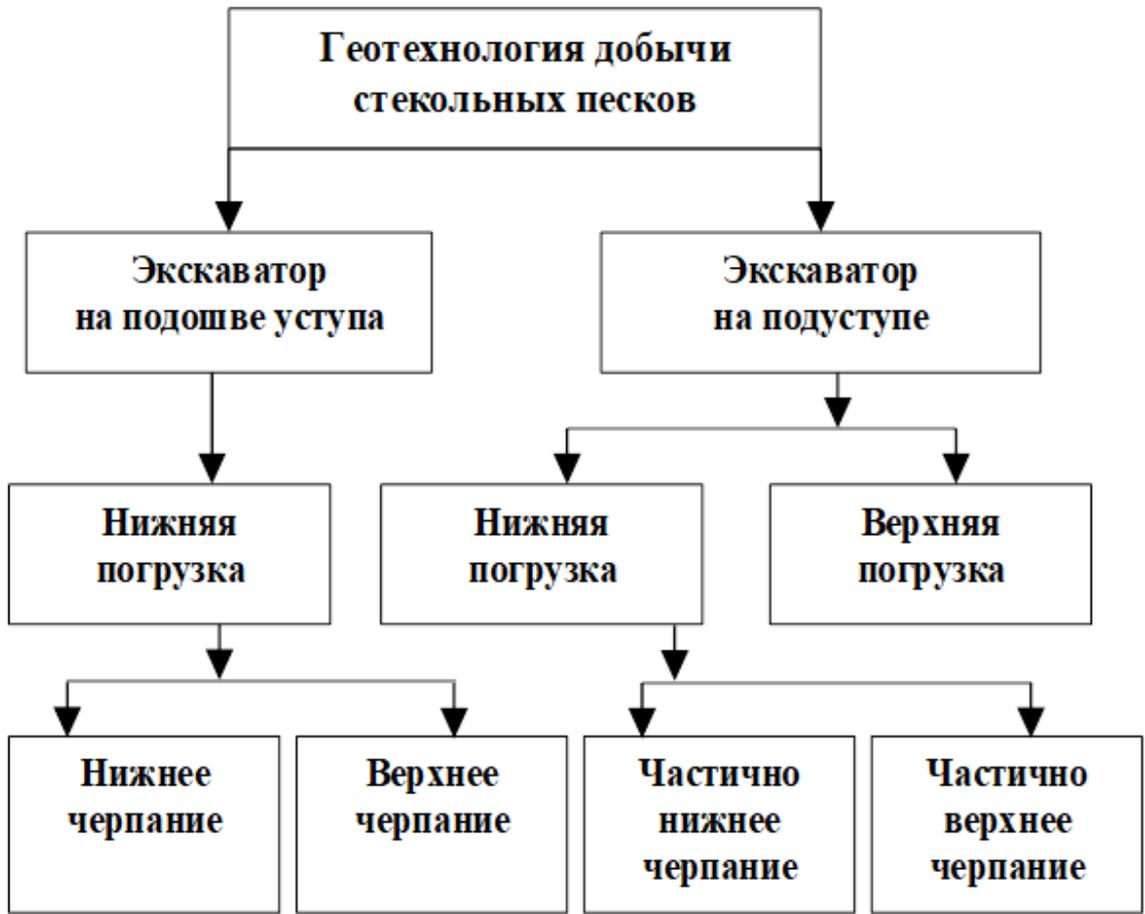


Рисунок 1.12 – Геотехнологическая схема добычи стекольных песков

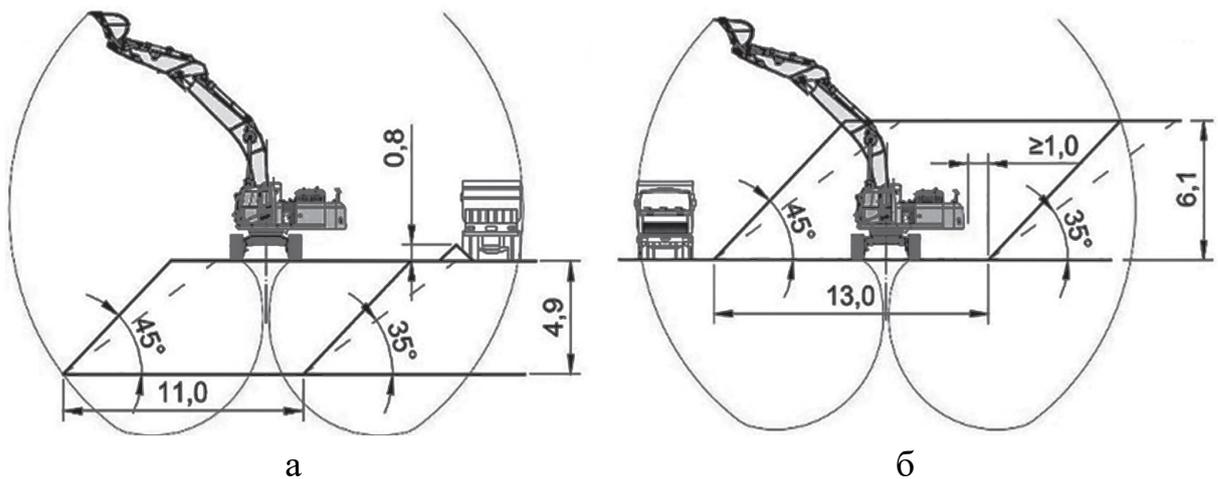


Рисунок 1.13 – Типовые технологические схемы ведения добычных работ экскаватором Komatsu PC-500LC-10MO [составлено авторами]: а – экскаватор располагается на кровле уступа, работу ведет нижним черпанием;
б – экскаватор располагается на подошве уступа, работу ведет верхним черпанием [143]

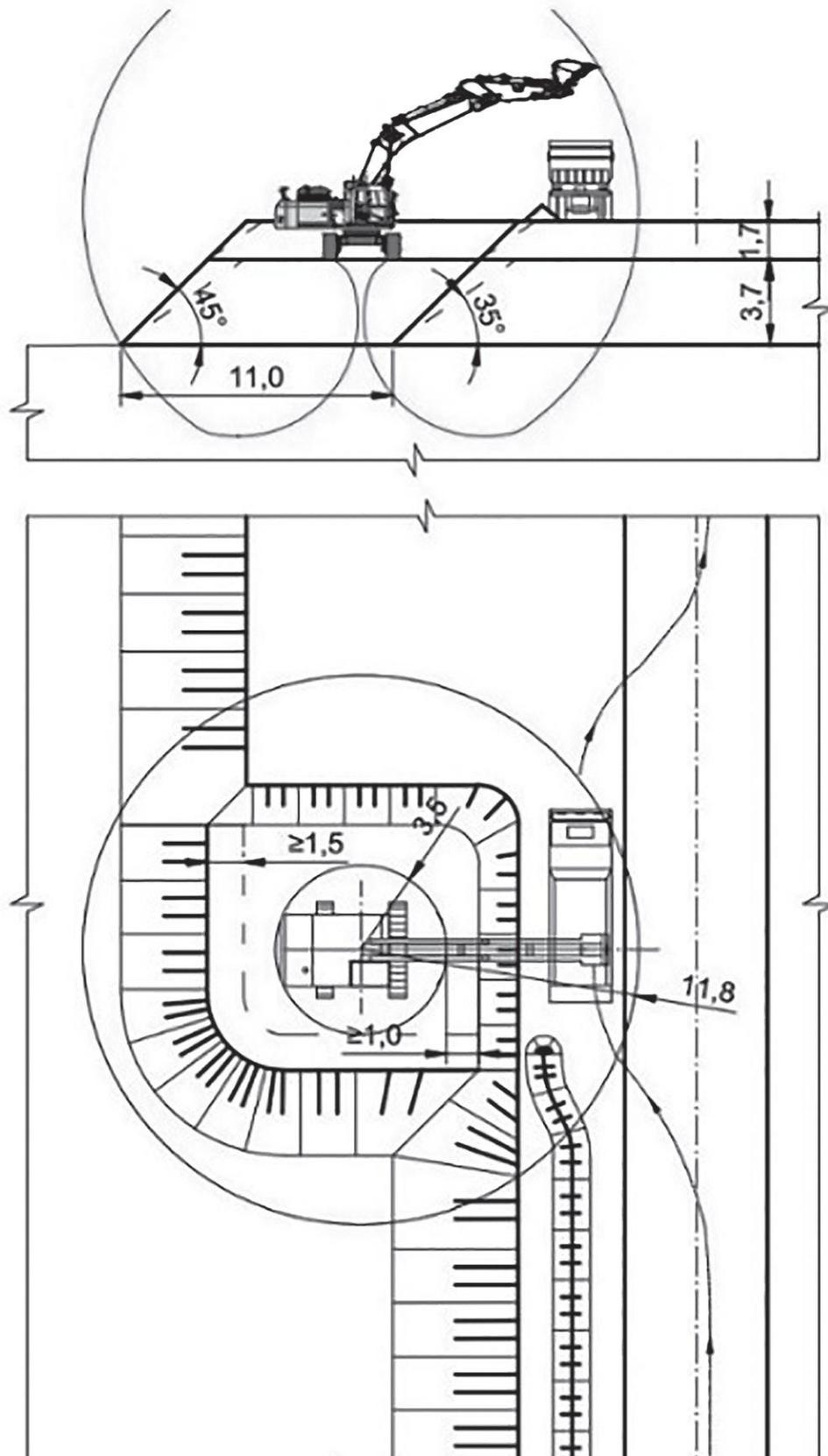


Рисунок 1.14 – Паспорт выемочных работ при открытой разработке месторождений стекольных песков [143]

1.4 Воздействие на окружающую среду поселка Чагода Вологодской области смоляных отходов

Смоляные отходы Чагодощенского стекольного завода (п. Чагода, Вологодская область) представляют собой высокотоксичные техногенные образования, сформировавшиеся в результате длительного использования генераторного газа в процессе стекловарения. Завод, являвшийся с 1930-х годов одним из крупнейших производителей оконного стекла, до 1965 года применял в качестве топлива генераторный газ, получаемый из древесины, торфа и каменного угля марки Г. Основным побочным продуктом такого технологического процесса стали так называемые тяжелые смолы пиролиза, богатые полициклическими ароматическими углеводородами (ПАУ) и фенольными соединениями.

Для очистки генераторного газа от смолистых компонентов использовались скрубберы, в которых загрязненная вода задерживала продукты пиролиза. Эта вода, насыщенная ПАУ, фенолами и взвешенными веществами органической и минеральной природы, сливалась в понижения рельефа, расположенные вблизи завода и реки Чагодощи. Общий объем смоляных отходов в 3 накопителях и русле реки составляет 207 295 т.

Полициклические ароматические углеводороды и фенольные соединения, являющиеся основными компонентами тяжелых смол пиролиза, обладают высокой химической устойчивостью и биоаккумулятивными свойствами, что делает их чрезвычайно опасными с экологической точки зрения. Вещества, входящие в состав ПАУ, обладают канцерогенными, мутагенными и токсичными свойствами, оказывая необратимое воздействие как на водные, так и на наземные экосистемы. Фенолы, характеризующиеся высокой растворимостью в воде, приводят к интенсивному загрязнению гидрологических систем, что угрожает не только биоте, но и качеству водных ресурсов.

Слив промышленных стоков в русло реки Чагодощи, проводившийся на протяжении десятилетий, усугубил экологическую ситуацию в районе, распространив токсиканты на значительные территории. Тяжелые смолы с течением

времени проникли в почвенные горизонты, что вызвало нарушение почвенных экосистем и устойчивое загрязнение подземных вод. На территории, прилегающей к смоляным озерам, до сих пор фиксируются высокие концентрации токсичных соединений, что свидетельствует о сохранении экологического риска.

Таким образом, накопленные смоляные отходы завода представляют собой серьезную угрозу для компонентов экосистемы. Они привели к деградации почв, загрязнению поверхностных и подземных вод и созданию очагов техногенной нагрузки, требующих сложных технологических решений для их ликвидации. Судя по информации в СМИ, в решении проблемы утилизации смоляных отходов в разные периоды начиная с 2004 г. были задействованы областные депутаты и ученые, руководители района, специалисты Департамента природных ресурсов и охраны окружающей среды, а также представители утилизирующих предприятий. Вроде бы предложены варианты утилизации смоляных озёр, но подробной информации по этому вопросу нет. Следует отметить, что это не простая технологическая задача. Наиболее серьезные исследования по данной проблеме провели и опубликовали в 2004 г. ученые Вологды и Москвы: профессора Л.Г. Рувина (Вологда) и Э.Ф. Вайнштейн (Москва) и доцент А.В. Белый (Вологда) [126]. Было принято однозначное решение – смоляные отходы необходимо уничтожить, и предложено уничтожать смоляные отходы методом окисления, а не сжигания. Но этот проект не был реализован.

Тулский государственный университет (ТулГУ) совместно с ОАО НИИ «Ярсинтез» в соответствии с государственным контрактом «Разработка проектно-сметной документации по рекультивации смоляных отходов, образовавшихся в результате деятельности стекольного завода в поселке Чагода», исследовал состав смоляных отходов. Расшифрованные хроматограммы позволили идентифицировать индивидуальные органические соединения.

По результатам биотестирования водных вытяжек из отходов, данные смоляные отходы следует отнести к III классу опасности. Для определения фактического объема загрязнения и построения профиля распределения отхода в понижениях рельефа и русле реки Чагоды был проведен ряд геофизических

исследований и предпроектного обследования территории. В пределах участка Чагодощенского стекольного завода, прилегающей территории и в русле реки Чагодощи с поверхности, методами электроразведки и георадарного сканирования изучены электрические и электромагнитные свойства грунтов, загрязненных смоляными отходами завода. Геофизические работы проведены ТулГУ совместно с ООО «Инжиниринговый Геотехнический Центр», г. Москва, в период с 12 по 23 июля 2019 г. В результате геофизических исследований установлены максимальные и средние значения глубин смоляных озер. Эти данные показывают, что на земной поверхности находится около 144 тыс. тонн смоляных отходов.

На кафедре геотехнологий и строительства подземных сооружений ТулГУ были разработаны технологические решения выемки смоляных отходов, как на земной поверхности, так со дна реки Чагодощи. Выбрано необходимое оборудование и транспортные средства. Следует отметить, что особую сложность в освоении и переработке месторождения рассматриваемых ПАУ представляют их физико-химические свойства, существенно зависящие от внешних условий. При этом куда-либо их перемещать или консервировать на месте нецелесообразно, ввиду отсутствия гидроизолированного основания в котлованах.

Предлагается переработку смоляных отходов реализовать путем пароплазменного пиролиза с использованием установки «ПЛАЗАРИУМ MGS». Осуществлен выбор промышленной плазменной системы, обеспечивающей плазменную газификацию смоляных отходов с получением синтез-газа и последующей выработкой электрической и тепловой энергии. В рамках проведения исследований и подбора оборудования для решения экологических задач особое внимание привлекает инновационная система плазменного уничтожения отходов, объединяющая передовые технические разработки с практическими аспектами применения. Уникальность данной установки заключается в её многофункциональности, эффективности и минимальном экологическом воздействии, что делает её перспективным инструментом для выполнения научных экспериментов и практической утилизации отходов в самых разных условиях.

Одним из ключевых преимуществ данной установки является её компактность и адаптивность, обусловленная модульной конструкцией, позволяющей легко транспортировать оборудование и интегрировать его в существующие технологические цепочки. Установка обеспечивает одинаково стабильную производительность как на стационарных объектах, так и в мобильных условиях, что делает её применимой в удалённых регионах или в чрезвычайных ситуациях.

Отдельного внимания заслуживает автоматизированный функционал, минимизирующий участие человека в процессе эксплуатации. Благодаря простоте управления и эргономичному интерфейсу, система гарантирует безопасность работы и соответствие международным стандартам качества. Ряд проведённых тестов подтвердил её надёжность и долговечность в ходе эксплуатации.

Универсальность оборудования позволяет перерабатывать широкий спектр отходов, включая твёрдые бытовые, биологические и даже промышленные отходы без необходимости предварительной сортировки или подготовки (например, сушки). Это значительно упрощает логистику процесса утилизации, снижая требования к предварительному этапу обработки материалов.

Следует отметить, что система демонстрирует стабильную производительность в любых климатических условиях. Она сохраняет свою эффективность при температурных режимах от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также при высоких уровнях влажности и даже в условиях повышенной запылённости.

С точки зрения экологической безопасности технология представляет собой практически эталонное решение. Она гарантирует 99,99 %-ное уничтожение отходов без образования побочных токсичных продуктов, таких как диоксины, фураны или смолы. В процессе переработки выделяется исключительно чистый синтез-газ ($\text{CO}+\text{H}_2$), что даёт возможность его последующего использования в качестве источника энергии. Рассматриваемая установка полностью соответствует как российским (ГОСТ и СанПиН), так и европейским экологическим нормам. В рамках научной работы были проведены переговоры с предста-

вителями компании «ПЛАЗАРИУМ», являющейся производителем данного вида оборудования.

Новый подход, внедрённый в данной технологии, способен существенно повлиять на отрасль утилизации отходов. Он сочетает в себе высокую степень экологической безопасности, энергетическую эффективность и экономическую целесообразность за счёт генерации востребованного побочного продукта – синтез-газа. Это делает систему особенно актуальной в условиях ужесточения экологического законодательства, а также при возрастающей необходимости минимизации ущерба окружающей среде. Таким образом, установка представляет собой перспективный инструмент как для научных исследований, так и для внедрения в промышленные процессы.

Предварительная оценка воздействия на окружающую среду при реализации проекта предлагаемого способа освоения техногенного месторождения показала, что проект является экологически рациональным и полностью соответствует действующим нормативам.

Методические положения разработки паспорта отхода для смоляных отходов, образовавшихся в результате деятельности стекольного завода в поселке Чагода Вологодской области.

Постановление Правительства Российской Федерации № 712 от 16 августа 2013 года устанавливает порядок паспортизации отходов I–IV классов опасности, утверждая правила оформления паспортов на такие отходы и типовую форму паспорта. Согласно постановлению обязанность по составлению паспорта возлагается на юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, деятельность которых сопровождается образованием отходов указанных классов опасности. Документ составляется на основании данных об опасных свойствах и составе отходов с учетом их влияния на окружающую среду. Процедура оформления паспорта регулируется требованиями Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Если отходы включены в федеральный классификационный каталог отходов, паспорт составляется в соответствии с утвержденной формой. Для отходов, которые отсутствуют в этом

каталоге, их класс опасности должен быть подтвержден в течение 90 дней с момента образования таких отходов. Полученные документы, подтверждающие класс опасности, направляются в территориальные органы Росприроднадзора. Паспорт отходов оформляется однократно, действует бессрочно, и внесение изменений в него не предусмотрено. Отдельно следует отметить, что постановление не распространяется на радиоактивные и биологические отходы, а также на сбросы в воду и атмосферу, регулирование которых осуществляется в рамках иных нормативных актов [133].

Паспорт в данном случае составляется юридическими лицами, в процессе деятельности которых образовались смоляные отходы. Определение данных о составе и свойствах смоляных отходов, включаемых в паспорт, осуществляется с соблюдением установленных законодательством Российской Федерации об обеспечении единства измерений требований к измерениям и средствам измерений [145].

Отнесение смоляных отходов к III классу опасности осуществлено в порядке, установленном Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации [76].

На отходы I–IV классов опасности, включенные в федеральный классификационный каталог отходов, индивидуальные предприниматели и юридические лица составляют и утверждают паспорт по форме, утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 16 августа 2013 г. № 712 [75, 145].

Копия паспорта отхода, надлежащим образом заверенная уполномоченными представителями юридических лиц, а также документация, подтверждающая отнесение вида отхода к соответствующему классу опасности, подлежат направлению в территориальное подразделение Федеральной службы по надзору в сфере природопользования (Росприроднадзор), осуществляющее деятельность в регионе местонахождения объекта хозяйствования.

Паспорт отхода признаётся действительным без ограничения срока действия. Редактирование содержания паспорта, включая внесение корректировок,

дополнений или изъятий сведений, законодательством не предусмотрено.

Выполненные исследования показывают, что, во-первых, смоляные отходы Чагодощенского района Вологодской области не включены в федеральный классификационный каталог отходов, во-вторых, для составления паспорта целесообразно воспользоваться ближайшим аналогом по физико-механическим и физико-химическим свойствам. В классификаторе отходов (ФККО) 2018–2019 ближайшим аналогом являются отходы (фусосмолы) переработки угля Кайерканского месторождения, имеющие код 6 42 991 12 33 3.

Действующим законодательством Российской Федерации (РФ) регламентируется реализация любой хозяйственной деятельности с учетом принципов экологической безопасности.

Хозяйственная деятельность юридических лиц, оказывающая прямое либо косвенное воздействие на окружающую среду, должна осуществляться на основе следующих принципов [49, 56, 57, 72, 100]:

- презумпция экологической опасности планируемой хозяйственной деятельности;
- обязательность оценки воздействия на окружающую среду при принятии решений об осуществлении хозяйственной деятельности;
- использование наилучших доступных технологий;
- внедрение мероприятий по охране природы;
- выполнение требований экологической безопасности, охраны здоровья населения и сохранения биологического разнообразия;
- платность природопользования и возмещение вреда окружающей среде;
- запрещение хозяйственной деятельности, последствия воздействия которой непредсказуемы для окружающей среды, а также реализации проектов, которые могут привести к деградации естественных экологических систем и истощению природных ресурсов.

При осуществлении технологических процессов по ликвидации смоляных отходов должно быть обеспечено выполнение требований в области охраны окружающей среды, восстановления природной среды, рационального использо-

вания и воспроизводства природных ресурсов, обеспечения экологической безопасности с учетом ближайших и отдаленных экологических, экономических, демографических и иных последствий эксплуатации указанных объектов [8, 56].

В научной работе отражены следующие мероприятия, условия и нормативы, обеспечивающие безопасность технологических процессов по ликвидации смоляных отходов для окружающей среды [49, 50, 56, 57, 58, 83, 84, 112]:

- использование наилучших доступных технологий, способствующих охране окружающей среды, рациональному использованию и воспроизводству природных ресурсов, а также обеспечивающих предотвращение и снижение воздействия вредных факторов производственной среды;
- внедрение мероприятий по охране окружающей среды;
- обеспечение автоматизации процессов, применение дистанционного управления технологическими процессами и операциями;
- выполнение прогнозного расчета уровня загрязнения атмосферного воздуха населенных мест с учетом фоновое (существующего) загрязнения, осуществляемого в соответствии с действующими нормативными документами.

Охрана атмосферного воздуха [56, 57, 58, 64, 81, 86, 88, 104]. Для реализации нормативных требований необходимо:

- прогнозировать изменения качества атмосферного воздуха, учитывать фоновый уровень загрязнения атмосферы [57, 88];
- предусматривать меры по уменьшению выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух [57, 88];
- принимать меры по предупреждению и устранению негативного воздействия шума и иного негативного физического воздействия на окружающую среду [56, 57, 88, 104];
- соблюдать ПДК в жилой зоне, а также 0,8 ПДК на границе садово-огородных участков [34];
- устанавливать санитарно-защитную зону вокруг промышленных площадок, предусматривать мероприятия и средства на организацию СЗЗ [56, 57, 87, 88];

- обеспечивать проведение лабораторных исследований за загрязнением атмосферного воздуха в зоне влияния выбросов объекта загрязнения атмосферного воздуха [57, 88];

- осуществлять плату за выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух [57, 58, 67].

Охрана водных ресурсов [51, 79, 90, 96, 100]. Для реализации нормативных требований необходимо:

- принимать меры и разрабатывать мероприятия по предотвращению загрязнения, засорения поверхностных и подземных водных объектов [51, 89, 100];

- обеспечивать водонепроницаемость емкостей для хранения сырья, продуктов производства, производственных отходов, твердых и жидких бытовых отходов [89, 100];

- предупреждать фильтрацию загрязненных вод с поверхности почвы в водоносные горизонты [100].

При этом запрещено:

- размещение новых производственных объектов в зонах санитарной охраны источников водоснабжения, водоохраных и прибрежных зонах рек [97];

- размещение складов горюче-смазочных материалов, накопителей промстоков, шламохранилищ и других объектов, обуславливающих опасность химического загрязнения подземных вод в границах III пояса ЗСО;

- проектирование прямоточных систем технического водоснабжения [51];

- введение в эксплуатацию новых объектов, которые не обеспечены мероприятиями и сооружениями для предотвращения загрязнения поверхностных вод [43].

Порядок обращения с отходами [56, 59, 64, 66, 67, 70, 74, 86, 97, 112]. Для реализации нормативных требований необходимо:

- вводить в эксплуатацию новые объекты, которые не обеспечены мероприятиями и сооружениями для предотвращения загрязнения поверхностных вод [90];

– осуществлять плату за размещение отходов производства и потребления [55, 59, 67];

– осуществлять деятельность по сбору и размещению отходов IV класса опасности на основании лицензии на соответствующие виды деятельности [64, 70];

– разрабатывать проекты нормативов образования отходов и лимитов на их размещение и иметь утвержденные в установленном порядке лимиты на размещение отходов [59];

– предусматривать специальные стационарные склады или площадки для временного хранения производственных отходов на территории предприятия, а также предусматривать защиту от воздействия атмосферных осадков и ветра на массу складываемых отходов [59, 86, 97];

– вести в установленном порядке учет образующихся, используемых, обезвреживаемых, передаваемых другим лицам или получаемых от других лиц отходов [59, 112];

– максимально механизировать и герметизировать все работы, связанные с выгрузкой и размещением отходов [86];

– вносить объекты размещения отходов в государственный реестр объектов размещения отходов [59];

– лицам, допущенным к обращению с опасными отходами, иметь профессиональную подготовку, подтвержденную свидетельствами на право работы с опасными отходами [59];

– осуществлять плату за размещение отходов производства и потребления [55, 59, 67].

Допустимо длительное хранение отходов производства и потребления, которые на современном этапе развития технического прогресса не могут быть утилизированы на предприятиях [86].

Охрана земельных ресурсов и почв [50, 53, 56, 74, 91, 105]. Для реализации нормативных требований необходимо:

- использовать земельные участки в соответствии с их целевым назначением и разрешенными использованием способами [50, 54];
- учитывать физико-химические свойства, механический состав, ландшафтную, геологическую и гидрологическую характеристики почв [44];
- проводить обследование и оценку почв по различным показателям (в т. ч. химическим) [91];
- осуществлять производственный земельный контроль и мониторинг состояния почв [50, 91, 105].

Запрещен ввод в эксплуатацию объектов без завершения предусмотренных проектами работ по восстановлению природной среды, рекультивации земель, благоустройству территорий в соответствии с законодательством РФ [56, 73].

Промышленная безопасность объекта и аварийные ситуации [56, 57, 59, 60, 61, 62, 63]. Для реализации нормативных требований необходимо:

- учитывать на всех этапах проектирования требования и предусматривать мероприятия по обеспечению промышленной безопасности, предупреждению аварий и локализации их последствий [60];
- проектировать, планировать и осуществлять мероприятия по локализации и ликвидации последствий аварий на опасном производственном объекте [59];
- своевременно информировать персонал, население, органы местного самоуправления, органы, осуществляющие государственный санитарно-эпидемиологический надзор, об аварийных ситуациях, остановках производства, о нарушениях технологических процессов, создающих угрозу санитарно-эпидемиологическому благополучию населения [57, 59, 61, 63];
- иметь резервы финансовых средств и материальных ресурсов для локализации и ликвидации последствий аварий [64];
- при проектировании зданий и сооружений учитывать возможные проявления опасных природных процессов и явлений [61];
- разрабатывать и осуществлять меры по обеспечению пожарной безопасности [62].

Природоохранные мероприятия [56, 58, 59, 62, 97, 100, 105]. Для реализации нормативных требований необходимо:

– предусматривать мероприятия по охране, предупреждению и устранению загрязнения окружающей среды, рациональному использованию и воспроизводству природных ресурсов, обеспечению экологической безопасности [56, 97];

– планировать и осуществлять мероприятия по улавливанию, утилизации, обезвреживанию выбросов вредных веществ в атмосферный воздух, сокращению или исключению таких выбросов [58];

– предусматривать мероприятия по предупреждению аварий и локализации их последствий [59, 62];

– внедрять шумозащитные мероприятия [56, 58, 97];

– обеспечивать водонепроницаемость емкостей для хранения сырья, продуктов производства, отходов производств, твердых и жидких бытовых отходов, а также предупреждать фильтрацию загрязненных вод с поверхности почвы в водоносные горизонты [100];

– осуществлять утилизацию и захоронение выбросов, сбросов, отходов, стоков и осадков сточных вод с соблюдением мер по предотвращению загрязнения почв [105].

Запрещено вводить в эксплуатацию здания, строения, сооружения и иные объекты, не оснащенные техническими средствами и технологиями обезвреживания и безопасного размещения отходов производства и потребления, обезвреживания выбросов и сбросов загрязняющих веществ, а также не оснащенные средствами контроля за загрязнением окружающей среды, без завершения предусмотренных проектами работ по охране, восстановлению природной среды, рекультивации земель, благоустройству территорий [56].

Социальная ответственность и здоровье населения [50, 55, 56, 57, 72, 87]. Для реализации нормативных требований необходимо:

– информировать население о ходе реализации проекта, негативных воздействиях на окружающую среду (включая социальную среду), проводить об-

щественные обсуждения по намечаемому строительству [72, 54];

- уплачивать законно установленные налоги и сборы, вносить плату за негативное воздействие на окружающую среду [50, 55, 56];

- обеспечивать выполнение требований в области охраны окружающей среды, восстановления природной среды, рационального использования и воспроизводства природных ресурсов обеспечения экологической безопасности с учетом экологических, экономических, демографических и иных последствий [56];

- обеспечивать безопасность для здоровья человека выполняемых работ [57].

Охрана объектов растительного и животного мира [52, 65, 75]. Для реализации нормативных требований необходимо:

- предусматривать и проводить мероприятия по сохранению среды обитания объектов животного мира и условий их размножения, нагула, отдыха и путей миграции, а также по обеспечению неприкосновенности защитных участков территорий и акваторий при размещении, проектировании и строительстве предприятий, сооружений и других объектов и осуществлении других видов хозяйственной деятельности [65];

- восстанавливать нарушенные производственной деятельностью лесные дороги, осушительные каналы, дренажные системы, мосты, аншлаги, элементы благоустройства территории лесов [74];

- принимать меры по предотвращению заболеваний и гибели объектов животного мира [65];

- рекультивировать земли, которые использовались для строительства, реконструкции и (или) эксплуатации объектов, не связанных с созданием лесной инфраструктуры [52].

Запрещено:

- осуществлять действия, которые могут привести к гибели, сокращению численности или нарушению среды обитания объектов животного мира, занесенных в Красные книги [64];

– выжигать растительность, хранить и применять опасные для объектов животного мира и среды их обитания материалы, сырьё и отходы производства без осуществления мер, гарантирующих предотвращение заболеваний [64];

– реализовывать любые виды хозяйственной деятельности, которая может прямо или косвенно негативно повлиять на объекты животного мира и их среду обитания. Например, строительство, сельскохозяйственная, лесозаготовительная или промышленная деятельность должны учитывать требования по охране животного мира. Запрещены действия, приводящие к загрязнению водоёмов, почвы, воздуха, уничтожению растительности или перекрытию путей миграции животных [64].

1.5 Анализ возможных способов переработки ПАУ

Ранее выполненные исследования показали, что освоение техногенного месторождения по средствам пароплазменного пиролиза рассматриваемых ПАУ более выгодно из-за отсутствия эффективных технологических предложений по получению модифицированных продуктов [126]. Разделение сложной смеси веществ для получения нужного продукта также затруднено. В рамках настоящей научной работы проводились переговоры с крупнейшими нефтеперерабатывающими заводами Российской Федерации (ОАО «Славнефть – ЯНОС», ООО ПО «Киришинефтеоргсинтез») о возможности переработки тяжелых углеводородных фракций смоляных отходов с последующим получением бензина или дизельного топлива. По всем заявкам был получен отрицательный ответ.

Переработку смоляных отходов следует проводить без дополнительных реагентов, поэтому предлагались два метода – это окисление и сжигание. Традиционное сжигание характеризуется рядом существенных недостатков, включая неполную конверсию органической массы (85–92 %) и образование высокотоксичных полициклических ароматических углеводородов, в частности диоксинов и фуранов. Эти проблемы усугубляются высокой температурой воспла-

менения и низкой скоростью горения смоляных отходов. Трудности дополнительно усугубляются высокой температурой воспламенения и медленным горением смолистых материалов.

В качестве альтернативы используют метод окисления, предполагающий термическое разрушение органической матрицы при температуре 700 ± 50 °С. Этот процесс дополнен каталитической обработкой с использованием солей меди (например, CuSO_4 , $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$). Полная конверсия достигается за 15 ± 3 минуты, а конечными продуктами реакции становятся газообразные вещества H_2O , CO_2 и NO_x . Тем не менее, несмотря на прогресс в технологии, метод окисления сохраняет ключевые недостатки термической обработки, включая ограниченную производительность (не более 200 кг/час) и образование оксидов азота.

Альтернативные варианты переработки техногенных ПАУ:

1. Каталитический гидрокрекинг при $400\text{--}500$ °С и давлении $5\text{--}7$ МПа с использованием $\text{Ni-Mo/Al}_2\text{O}_3$ катализаторов, обеспечивающий конверсию до 95 % с получением легких углеводородов $\text{C}_1\text{--C}_4$.

2. Сверхкритическая водная экстракция ($T=374$ °С, $P=22.1$ МПа) с последующей фракционной конденсацией, позволяющая выделять ценные ароматические соединения.

Наиболее эффективной технологией признана плазмохимическая конверсия в пароводяной плазме ($T=2500\text{--}4000$ °С), обеспечивающая:

- полную деструкцию органической матрицы (99,99 %);
- отсутствие токсичных побочных продуктов;
- генерацию синтез-газа (55–65 % H_2 , 30–40 % CO);
- энергетическую эффективность 85–90 %.

Ключевым элементом установки является электродуговой плазмотрон с КПД преобразования электроэнергии в тепловую до 95 %. Оптимизация процесса требует детального моделирования термодинамики плазменного факела и кинетики реакций газификации с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD).

Ключевым элементом системы плазменной переработки является электродуговой плазмотрон, работающий при напряжении 400–600 Вт и силе тока 500-800 А. Его эффективность в преобразовании электроэнергии в тепловую энергию достигает 95 %. Для достижения оптимальных характеристик переработки необходимы детальные расчеты, включающие моделирование термодинамики плазменного факела и изучение кинетики реакций газификации. Эти задачи решаются с применением технологий вычислительной гидродинамики (CFD).

Основное направление улучшения данной технологии заключается в создании комбинированных систем, способных интегрировать плазмохимическое преобразование с другими процессами, такими как каталитическая очистка синтез-газа и утилизация тепловой энергии. Такая интеграция позволит увеличить общую энергетическую эффективность процесса до 92–95 %, что существенно повысит экономическую обоснованность технологий переработки полиароматических углеводородов (смоляных отходов).

Плазменная газификация углеродсодержащих техногенных отходов. Процесс газификации углеродсодержащих материалов исторически базируется на использовании тепловой энергии, генерируемой в ходе экзотермических реакций окисления в среде атмосферного воздуха или технического кислорода. Применение кислородного дутья способствует получению синтез-газа с повышенной теплотворной способностью и минимальным содержанием оксидов азота (NO_x). Однако высокая энергоёмкость криогенного разделения воздуха для выделения кислорода обуславливает экономическую предпочтительность альтернативных окислителей – атмосферного воздуха или перегретого водяного пара.

Актуальные технологические вызовы в области газификации углеродных отходов связаны с необходимостью интеграции экологических и энергетических аспектов. Ключевыми задачами являются:

– экологическая безопасность – полная деструкция токсичных компонентов до нейтральных соединений (H_2O , CO_2 , элементарные вещества);

– энергоэффективность – максимизация использования энергопотенциала отходов за счёт оптимизации параметров газификации (температура, давление, состав окислителя).

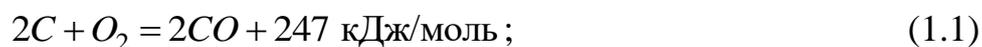
Плазменная газификация предлагает принципиально новый подход к вводу тепловой энергии в зону реакции. В качестве плазмообразующей среды могут использоваться различные газы: воздух, кислород, водород, водяной пар, синтез-газ или инертные газы. Выбор конкретного газа определяет конструктивные особенности плазмотрона и зависит от целевого назначения процесса. Для получения энергетического синтез-газа, пригодного для использования в двигателях или энергетических установках, технологически оправдано применение воздушно-азотных смесей. В случае переработки особо опасных отходов предпочтение отдается водяному пару, исключающему образование токсичных соединений.

С энергетической точки зрения газификация позволяет преобразовать потенциальную энергию отходов, сохранив до 85–90 % их теплотворной способности в виде горючих компонентов синтез-газа (CO и H₂). Экологическое преимущество метода заключается в полном разложении сложных органических соединений на простые, безопасные компоненты. Важно отметить, что восстановительная среда процесса предотвращает образование диоксинов и оксидов азота. Дополнительным преимуществом является существенное (в 3–5 раз) уменьшение объема газообразных продуктов по сравнению с традиционным сжиганием, что позволяет значительно сократить размеры и стоимость газоочистного оборудования.

Разработка оптимальных технологических решений начинается с комплексного термодинамического анализа, позволяющего определить предельные значения ключевых параметров и исключить принципиально неверные технические решения. Для расчета равновесного состава продуктов газификации тяжелых углеводородов применяется метод изобарно-изотермического потенциала Гиббса, основанный на анализе уравнений химических реакций. В расчетных моделях используются две ключевые термодинамические функции – энтропия

и полная энтальпия индивидуальных веществ, что позволяет с высокой точностью прогнозировать равновесные концентрации компонентов в системе.

Основными уравнениями химических реакций при газификации смоляных отходов являются следующие уравнения:



$$K = \frac{[CO] + [H_2O]}{[CO_2] + [H_2]} = 2,5; \quad (1.4)$$

где K – константа равновесия.

Результаты моделирования показали, что наиболее подходящей системой для ликвидации смоляных отходов является система парового плазменного пиролиза.

Выводы

1. Применение пароводяной электродуговой плазмы для переработки отходов характеризуется не только высокой технологической эффективностью, но и значительными экологическими и экономическими преимуществами. Основа преимуществ этой технологии – уникальный состав плазмы, состоящей только из активных реагентов водорода и кислорода, а также ее исключительные физико-химические свойства, включая экстраординарно высокую температуру, большую энтальпию и высокие транспортные характеристики водяного пара.

2. Отсутствие балластных компонентов, таких как азот, позволяет паровой плазме достигать высокой теплотворной способности процессного синтез-газа ($CO + H_2$), исключая образование азотсодержащих соединений, в частности оксидов азота (NO_x), и других трудно удаляемых токсичных газов, таких как свободный хлор, соединения серы и фосфора. Благодаря этому процесс минимизирует загрязнение окружающей среды вредными выбросами. Дополни-

но пароводяная плазма сводит к минимуму образование диоксинов при обработке хлорсодержащих отходов.

3. Экстремально высокая температура плазменного потока позволяет разрушать органические и биологические соединения, включая самые устойчивые токсины, такие как диоксины и фураны, а также переплавлять или испарять тугоплавкие неорганические вещества. Органические отходы подвергаются полному разложению с превращением углерода в газовую фазу без остаточного углерода в шлаке, что недостижимо в традиционных процессах термической обработки. Твердый остаток, образующийся в процессе, представляет собой инертный стекловидный шлак, пригодный для использования в строительных материалах, что позволяет свести объем отходов в твердой фазе к минимуму (до 1:400).

4. Высокое качество синтез-газа, получаемого в процессе газификации, обусловлено максимальным содержанием водорода, отсутствием балластных компонентов (азота, углекислого газа) и высокой теплотворной способностью (до 22 800 кДж/кг). Это делает синтез-газ универсальным продуктом, который может быть немедленно использован в процессах генерации электроэнергии, транспортирован к потребителю или преобразован в синтетическое топливо, обеспечивая энергонезависимость процесса переработки техногенных отходов.

5. Энергозатраты на получение условного топлива при использовании паровой плазмы значительно ниже, чем при процессах, основанных на кислородной или воздушной плазмах, а возможность использования комбинированных паро- и газотурбинных установок дополнительно оптимизирует энергопотребление. Плазменная горелка, являясь независимым источником тепла, обеспечивает гибкость технологии, позволяя эффективно перерабатывать отходы различного состава. Таким образом, пароводяная электродуговая плазма представляет собой уникальный инструмент для безотходной, экологически безопасной и экономически целесообразной переработки техногенных отходов.

Цель и идея работы. Постановка задач исследования

Целью работы является разработка научно обоснованной методики освоения техногенного месторождения ПАУ с применением технологии плазменной газификации на примере техногенного месторождения ПАУ в Вологодской области. Методика направлена на экологически безопасную переработку отходов прошлой экономической деятельности, а также разработку технологической последовательности освоения месторождений ПАУ с учетом комплексного изучения физико-механических свойств, качественного и количественного состава ПАУ.

Идея работы заключается в разработке и научном обосновании инновационной технологии освоения и переработки техногенных месторождений ПАУ с использованием метода плазменной газификации. Новизна данной технологии состоит в том, что плазменная газификация, благодаря своим высоким температурам и отсутствию вредных выбросов, позволяет эффективно разлагать сложные органические соединения ПАУ до синтез-газа или других полезных продуктов, полностью нейтрализуя их токсичное воздействие на окружающую среду. Это устранил накопленный антропогенный вред, сведет к нулю их негативное воздействие на экосистему, а также обеспечит положительный экономический эффект благодаря выходу пригодных для промышленного применения углеводородных продуктов и достижению экологической устойчивости.

Для исследования параметров техногенных месторождений полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) необходимо сосредоточиться на изучении их морфологических, структурных, химических, а также физико-химических характеристик, что позволит детально охарактеризовать свойства данного типа месторождений и их потенциальные возможности как полезных ресурсов, а также оценить экологические и технологические риски.

Цель и идея научной работы обусловили постановку следующих **задач исследования:**

1. Выполнить анализ структуры и морфологии техногенного месторождения ПАУ, включая пространственное распределение залежей отходов и выделение зон их наибольшей концентрации. Сложный характер структуры таких образований, обусловленный их неравномерностью распределения в понижениях рельефа и физико-химической неоднородностью, ограничивает возможности использования традиционных методов определения мощности смоляных пластов, таких как бурение. Это требует применения современных геофизических подходов, включая методы сейсморазведки, электротомографии или радиометрии, которые позволяют проводить бесконтактное исследование внутреннего строения месторождения, несмотря на высокую плотность и вязкость материала. Использование методов геофизической интерпретации позволяет не только уточнить мощность смоляных пластов, но и определить структуру залегания.

2. Провести комплексную оценку состояния всех компонентов экосистемы рассматриваемого месторождения ПАУ, применяя методы геологического, геодезического, экологического и гидрометеорологического опробования рассматриваемой территории.

3. Выполнить комплекс исследований для определения химического состава и горючих свойств смоляных отходов, составляющих техногенное месторождение. Детальный анализ состава отходов с акцентом на содержание различных полициклических ароматических углеводородов (таких как нафталин, антрацен, пирен и другие канцерогенные ПАУ) позволит установить химическую природу вещества, его реакционную активность и потенциальную токсичность. Изучение горючести, как важного физико-химического параметра, обеспечит возможность определения их энергетического потенциала, что подтвердит или опровергнет предлагаемую методику ликвидации ПАУ. Дополнительный анализ опасных (токсичных) свойств отходов способствует оценке их воздействия на окружающую среду.

4. Разработать рациональную технологическую схему освоения техногенного месторождения ПАУ, заключающуюся в создании комплексного подхода, включающего извлечение, транспортировку и переработку техногенных отхо-

дов, с наименьшими рисками для компонентов экосистемы, а также максимальным экономическим эффектом.

5. Выполнить моделирование геомеханических процессов, возникающих в геологической среде вследствие разработки рассматриваемого месторождения ПАУ, методом конечных элементов в расчетно-аналитическом комплексе Ansys, используя данные выполненных геодезических и геологических исследований.

ГЛАВА 2. ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СМОЛЯНЫХ ОТХОДОВ И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

2.1 Рекогносцировочное обследование загрязненной территории и исследование состава атмосферного воздуха

Для выявления очагов загрязнения береговой линии проводилось рекогносцировочное обследование территории. На рисунке 2.1 представлено рекогносцировочное обследование участка реки Чагоды, занятого смоляными отходами (в составе группы – сотрудники Тульского государственного университета, Московского государственного строительного университета, Чагодощенского стекольного завода, администрации Чагодощенского района и Департамента природных ресурсов и охраны окружающей среды Вологодской области). В ходе обследования были выявлены объемные очаги загрязнения береговой линии (рисунки 2.2 – 2.10).



Рисунок 2.1 – Рекогносцировочное обследование участка реки Чагоды, загрязненного смоляными отходами



Рисунок 2.2 – Особо загрязнённый участок береговой линии



Рисунок 2.3 – Фрагмент № 1 смоляного берега



Рисунок 2.4 – Долина реки Чагоды в районе бывшего стекольного завода



Рисунок 2.5 – Фрагмент № 2 смоляного берега



Рисунок 2.6 – Фрагмент № 3 смоляного берега



Рисунок 2.7 – Очаги загрязнения смоляными отходами на левом берегу реки Чагодыщи (точка съемки 1 – прибрежная поселковая береговая линия)



Рисунок 2.8 – Внешний вид большого смоляного озера (точка съемки 7)



Рисунок 2.9 – Внешний вид большого смоляного озера (точка съемки 8)



Рисунок 2.10 – Долина реки Чагоды в зимнее время – февраль 2020 г.
(точка съемки 2 – прибрежная поселковая береговая линия)

На участке ведения работ проводилось исследование атмосферного воздуха газоанализатором «ЭКОЛАБ» (рисунки 2.11 – 2.12) на наличие следующих компонентов: метил-меркаптан (CS_3SH), углеводороды ($\text{C}_1\text{-C}_{10}$), углеводороды ($\text{C}_1\text{-C}_5$), диоксид азота (NO_2), диоксид серы (SO_2), хлороводороды (HCl), аммиак (NH_3), сероводород (H_2S), формальдегид (CH_2O). Результаты исследования состава атмосферного воздуха представлены в таблице 2.1.



Рисунок 2.11 – Исследование состава атмосферного воздуха газоанализатором «ЭКОЛАБ» на большом смоляном озере



Рисунок 2.12 – Определение компонентных показателей на участке

Таблица 2.1 – Максимальные концентрации газовых примесей в воздухе, зафиксированные в п. Чагода вблизи смоляных озер

Концентрация, мг/м ³					Тем- пера- тура, °С	Атмо- сферное давле- ние, мм/рт. ст.	Относи- тельная влаж- ность, %
Метил- меркап- тан СН ₃ SH	Угле- водо- роды С1-С10	Диоксид серы SO ₂	Углево- дороды С1-С5	Серо- водо- род H ₂ S			
1,820	44,245	0,264	38,442	0,007	24,4	747,6	36
1,520	45,037	0,039	40,005	0,013	24,4	747,6	35
2,922	39,484	0	33,759	0	24,3	747,6	32
1,852	40,506	0,038	34,395	0,014	24,3	747,6	34
0,038	39,158	0,216	34,941	0,018	24,3	747,6	36
0,471	44,029	0,239	35,299	0	24,3	747,6	34
0,086	44,029	0,031	35,299	0	24,4	747,6	36
0,541	41,313	0,002	32,619	0,033	24,3	747,6	34
0,867	38,159	0,204	28,517	0	24,4	747,6	34
0,714	39,147	0,129	30,286	0,032	24,4	747,6	34
0,051	39,52	0,024	31,109	0	24,4	747,6	36
0	39,007	0,245	29,720	0,011	24,4	747,6	36
0,080	41,337	0	30,749	0	24,5	747,6	36
2,675	39,905	0,243	31,019	0	32,6	747,3	14
2,026	35,457	0,217	27,062	0,038	30,8	747,2	15
2,047	34,762	0,326	25,862	0,021	30,7	747,2	16
0	35,981	0,191	27,466	0	30,7	747,2	17
0	36,784	0	27,287	0	30,9	747,2	18
0	36,607	0	27,929	0,001	30,9	747,2	18
0	38,738	0,173	27,517	0	31,0	747,2	19
2,707	33,755	0	25,265	0	31,0	747,2	15
1,744	32,890	0	25,269	0	31,0	747,2	15

2.2 Результаты опытных геофизических работ по изучению смоляных отходов, накопленных на территории п. Чагода

2.2.1 Общие методические положения

Для проведения полевых натурных измерений использовался георадар, многоканальная электроразведочная аппаратура отечественного производства и современные отечественные программы для обработки и интерпретации полученных материалов. Работы проведены в опытном порядке.



Рисунок 2.13 – Карта-схема исследуемого участка территории, загрязненной смоляными отходами

В ходе проведённых исследований было отработано 11 георадарных профилей общей протяжённостью около 700 метров, что позволило получить детальную информацию о распределении электромагнитных свойств верхней толщи четвертичных отложений в пределах глубины 4–5 метров от поверхности земли. Особое внимание было уделено исследованию как наземных участ-

ков, так и территорий, непосредственно прилегающих к поверхностям смоляных озёр и руслу реки Чагодоши, что обеспечило более широкое покрытие и достоверность полученных данных при интерпретации сложных геологических условий в изучаемом районе.

Кроме того, в рамках комплекса исследований было выполнено два профиля электроразведки, каждый длиной по 235 метров: один из них проходил на территории завода, а другой – за его пределами, вдоль русла реки Чагодоши. Проведение этих профилей позволило получить ценную информацию о контрастности удельного электрического сопротивления (УЭС) грунтов, что является ключевым для понимания степени неоднородности геологической среды в данном районе. Благодаря электрометрическим методам была выявлена возможность надёжного выделения зон смоляного загрязнения как в четвертичных, так и в коренных отложениях, что особенно важно для оценки уровня техногенного воздействия и дальнейшего планирования экологических мероприятий.

Интерпретация данных, полученных с использованием георадарных и электроразведочных методов, дала возможность уточнить структурные особенности верхней части геологического разреза, выявить возможные локальные аномалии, а также определить влияние антропогенных факторов на прибрежную зону и прилегающие территории. Таким образом, сочетание этих двух подходов – георадиолокационного и электроразведочного – позволило не только решить задачи моделирования характеристик грунтов, но и выделить зоны повышенного техногенного риска, связанные с наличием смоляного загрязнения, что способствует повышению достоверности экологического мониторинга и разработки профилактических мер для защиты окружающей среды.

Полученные данные обладают высокой степенью надёжности и позволяют обеспечить комплексный подход к изучению геологической обстановки, что особенно ценно при проектировании мероприятий по восстановлению или предотвращению деградации природных систем. Карта-схема исследуемого участка загрязненной территории представлена на рисунке 2.13.



Рисунок 2.14 – Перемещение георадара по поверхности смоляного озера



Рисунок 2.15 – Перемещение георадара вдоль 4-го профиля

Работы по георадарному профилированию проводились в пределах условного деления на три различных участка, что позволило охватить разнообразные условия обследования и получить максимально полные данные о состояниях грунтов и их диэлектрических свойствах в пределах выявленных зон загрязнений. Первый участок включал георадарные профили, выполненные по поверхности грунта непосредственно на территории завода. На данном участке было осуществлено исследование по двум профилям, что позволило выявить особенности распространения загрязнений и оценить степень их про-

явления в структуре грунтов, а также получить первичные данные о влиянии смоляных отходов на распределение диэлектрической проницаемости в поверхностных слоях территории завода.

Второй участок охватывал исследования, проведённые прямо через территорию озёр со смолой. Здесь было выполнено также два профиля, которые проходили по поверхности смоляных зеркал, что представляло собой технически сложную задачу, требовавшую использования дополнительных методов защиты оборудования. В ходе работы для предотвращения порчи георадарного оборудования из-за возможного контакта с вязкими смолами антенный блок перед использованием был завернут в специальную плёнку, а сам радар перемещался с использованием верёвочной лебёдки. Такое техническое решение обеспечило выполнение задач в условиях повышенной сложности и агрессивной среды, а также позволило провести измерения без потери точности и качества данных (рисунки 2.14 – 2.15).

Третий участок предусматривал выполнение профилей по воде, поперёк русла реки. Этот этап исследований был важен для оценки распространения смоляного загрязнения вблизи водоёмов, а также определения, как это загрязнение влияет на свойства береговых порций донных отложений и водной поверхности. Выполненные измерения подтвердили, что жидкие и вязкие смоляные вещества существенно изменяют электрофизические свойства верхних слоёв, что проявляется в характерной аномальной зональности на георадарных данных.

Главной задачей применения метода георадиолокационного профилирования на всех трёх этапах исследований была оценка того, как именно смоляные отходы проявляются в поле диэлектрической проницаемости различных типов среды – грунта, смоляного озера или воды. Эти различия фиксировались с учётом различных диэлектрических свойств, которые позволили интерпретировать контрастность изображений на георадарных профилях. Все протяжённости и конфигурации георадарных профилей были нанесены на схему изучаемой

территории, сильно загрязнённой органическими смоляными отходами, что также позволило визуально представить зону работ и явное влияние техногенных факторов на исследуемую территорию.

Таким образом, проведение указанных исследований в условиях сложных и неоднородных сред продемонстрировало эффективность метода георадиолокации как инструмента для выявления и изучения зон техногенного загрязнения, что в перспективе позволит более детально оценить степень воздействия смоляных отходов на природную среду и разработать соответствующие меры по их локализации и устранению.

2.2.2 Результаты георадарного профилирования

Профиль 2. Длина профиля 2 составила 73,5 метра. Расположение профиля указано на рисунке 2.13. Диэлектрическая проницаемость на разрезе составила 7 ед. С такими свойствами максимальная глубинность исследований составила около 4 м. Радарограмма по профилю 2 представлена на рисунке 2.16.

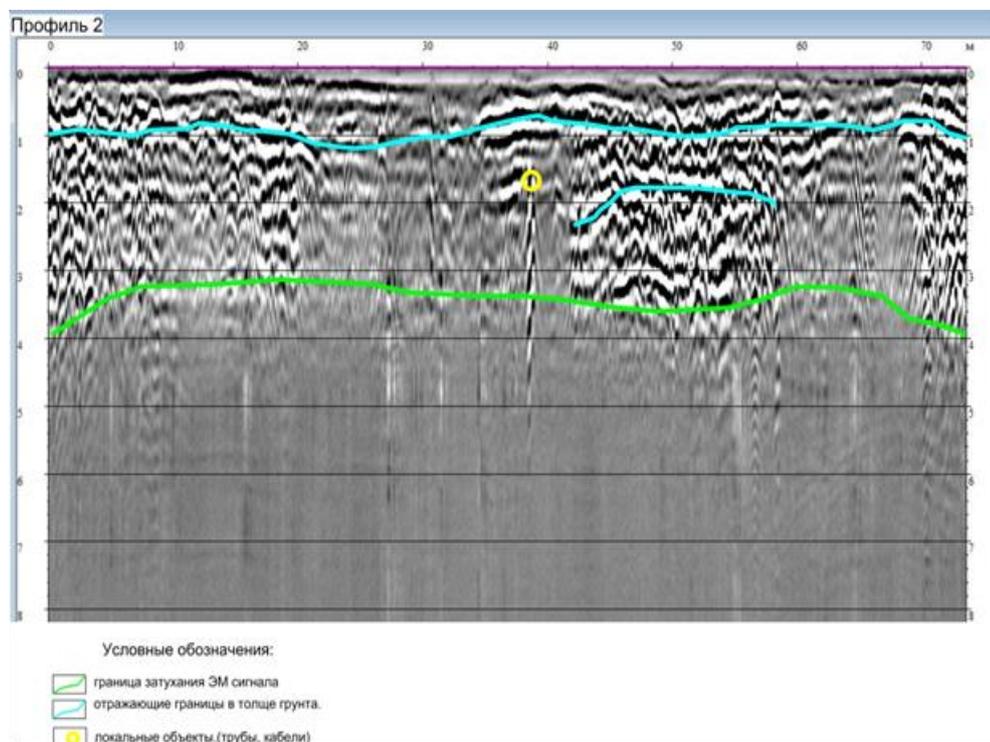


Рисунок 2.16 – Радарограмма по профилю 2

В районе ПК38 на глубине около 1,5 метра выделяется локальный объект, скорее всего, это труба или кабель. Также в толще выделяются еще несколько отражающих границ, но, к сожалению, без материалов архивных инженерно-геологических изысканий сложно сказать, с чем они связаны.

Профиль 3. Длина 3-го профиля составила 36,7 м. Расположение профиля указано на рисунке 2.13. Профиль проходил от малого озера со смолой через дорогу, которая помечена двумя вертикальными черными линиями (рисунок 2.17).

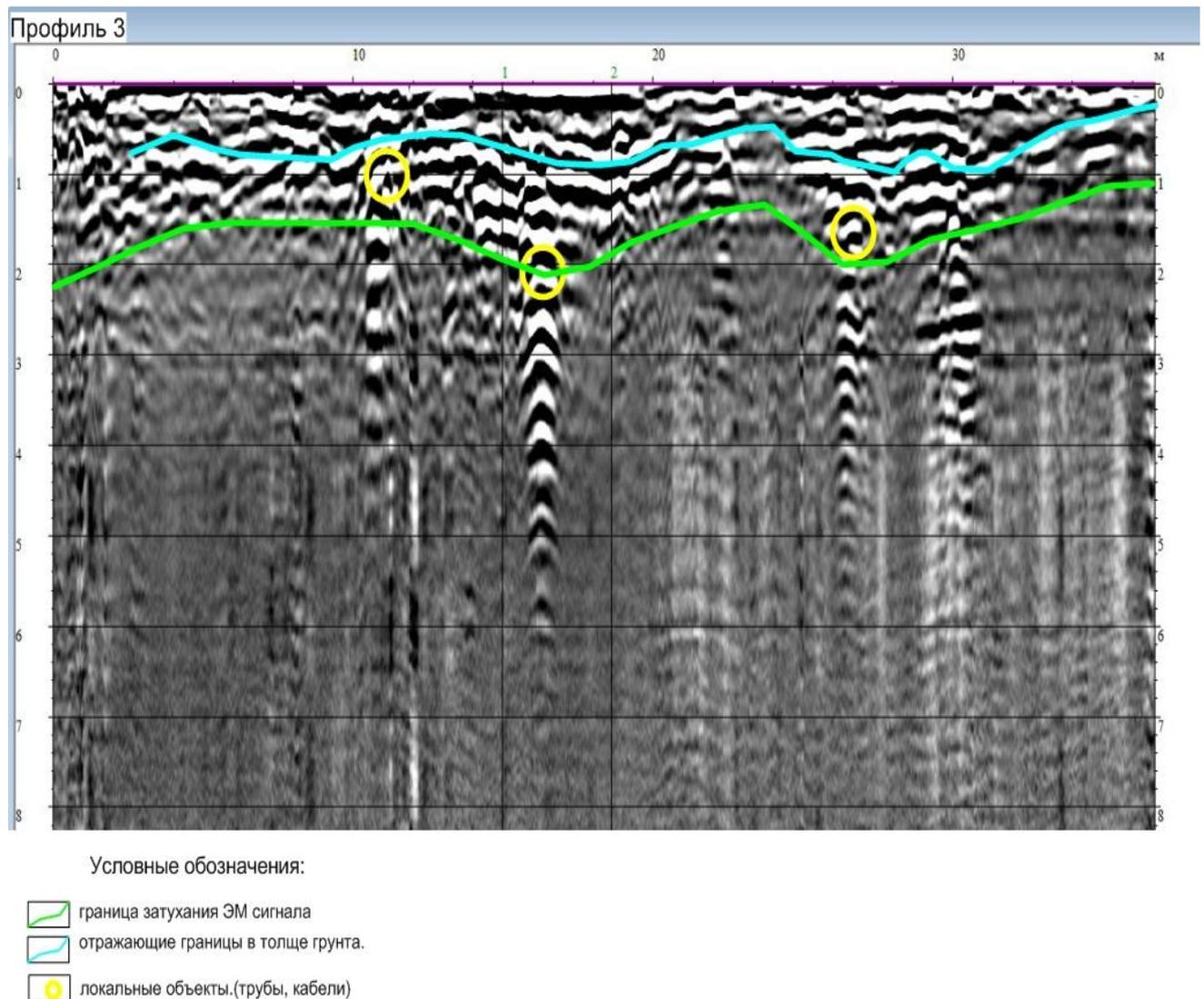


Рисунок 2.17 – Радарограмма по профилю 3

В трех местах на профиле выделяются локальные объекты, желтые кружки на разрезе. Также в толще выделяется отражающая граница.

Профиль 4. Длина профиля 4 составила 37,1 метра. Расположение профиля указано на рисунке 2.18. Диэлектрическая проницаемость на разрезе также составила 7 ед. Профиль проходил прямо через малое озеро с одного берега на другой. Радарограмма по 4-му профилю представлена на рисунке 2.18.

На разрезе рисунка 6 прослеживается отражающая граница минерального дна озера. Максимальная глубина при заданных свойствах – 3,2 м. Также в толще смолы, выделяются еще две отражающие границы, которые могут быть связаны с тем, что смола имеет разную степень разложения или разную условно фракцию.

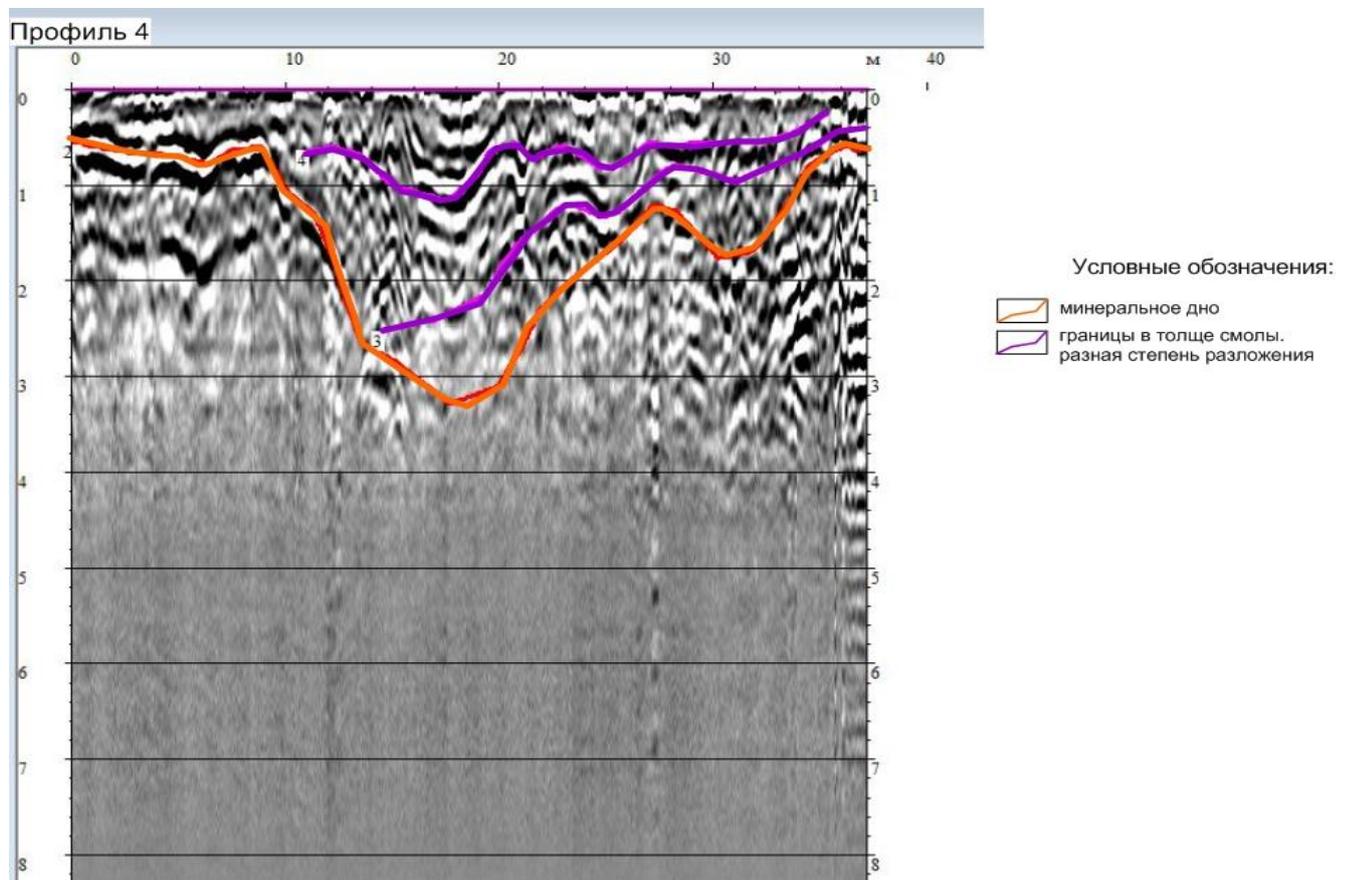


Рисунок 2.18 – Радарограмма по профилю 4

Профиль 5. Длина 5-го профиля составила 54,6 метра. Расположение профиля указано на карте-схеме (рисунок 2.13). Диэлектрическая проницаемость на разрезе составила 7 ед. Профиль проходил прямо через маленькое озеро с одного берега на другой, с той лишь разницей с профилем 4, что начало и

конец профиля были на 5 метров вынесены на сам берег, что хорошо видно из полученных данных. На рисунке 2.19 для 5-го профиля использовали другую развертку (максимальную длину записи). По результатам исследований видно, что выделяются те же самые отражающие границы.

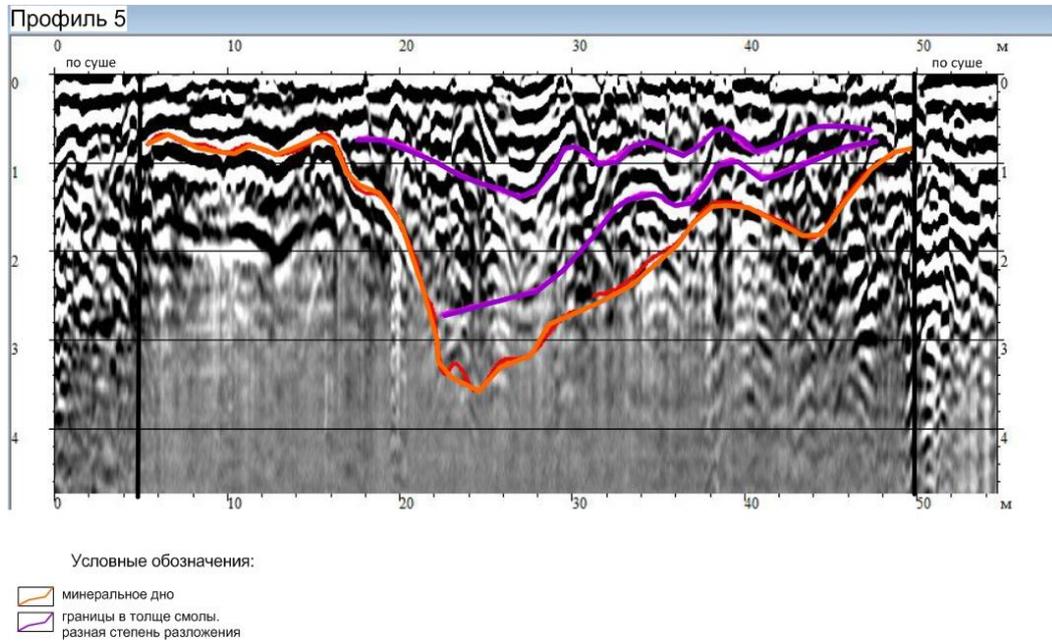


Рисунок 2.19 – Радарограмма по профилю 5

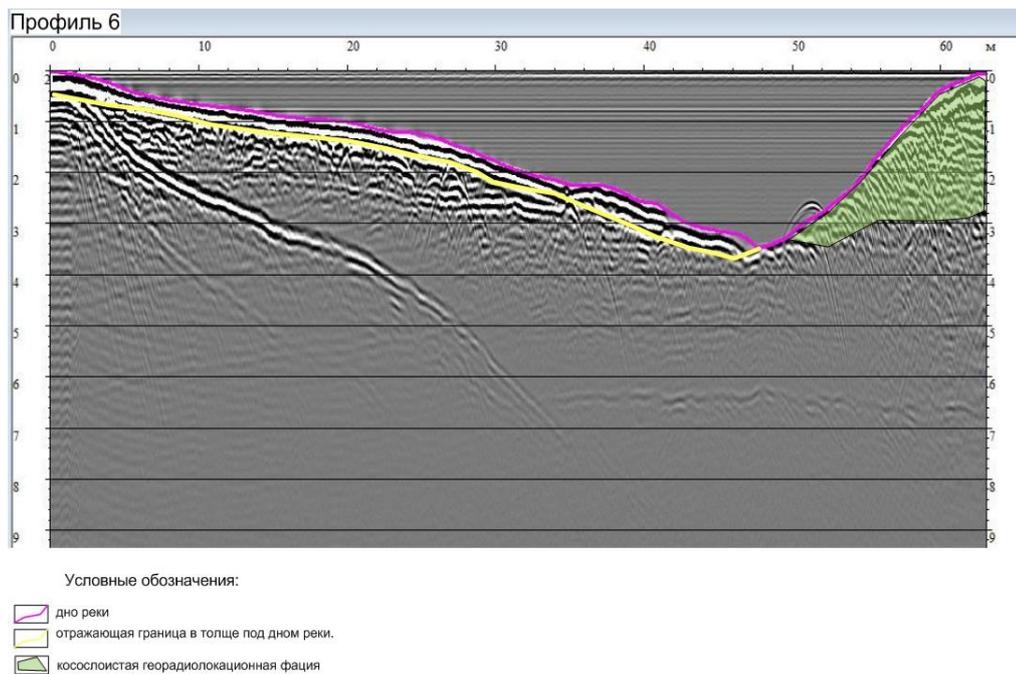


Рисунок 2.20 – Радарограмма по профилю 6

Скорее всего граница, выделенная желтым цветом связана с накоплениями на дне реки. В конце профиля с ПК50 и до конца профиля выделяется очень интересная, косослоистая георадиолокационная фация, которая может быть связана с особенностью залегания известняковых слоев.

Профиль 6. Длина профиля 6 составила 63 м. Расположение профиля указано на рисунке 2.13. Диэлектрическая проницаемость на разрезе составила 81 ед. для водной толщи, так как профиль проходил поперек реки, и 20 ед. для тех горных пород, которые залегают под толщей воды. Начало и концы профиля привязывались с использованием системы GPS. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о максимальной глубине реки в этом месте, которая составила примерно 3,5 м. Профиль 6 проходил на заведомо чистом участке, без распространения смолы с берега.

Профиль 7. Профиль 7 был исследован в том же самом месте, только в другую сторону, данные по нему абсолютно идентичны профилю 6. Здесь и далее будет приведены только по одному поперечному профилю через реку, так как нецелесообразно приводить по два профиля в прямом и обратном направлении.

Профиль 8. Длина профиля 8 составила 68 м. Расположение профиля указано на карте-схеме рисунка 2.13. Диэлектрическая проницаемость на разрезе составила 81 ед. для водной толщи, так как профиль проходил поперек реки, и 20 ед. для тех горных пород, которые залегают под толщей воды. Начало и концы профиля привязывались с использованием системы GPS. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о максимальной глубине реки в данном месте, которая составила примерно 2,5 м. Данный профиль тоже проходил, на том месте, где не было видно смолы с берега. Также выделяются границы донных отложений и косослоистой фации в конце профиля. Радарограмма по 8-му профилю представлена на рисунке 2.21.

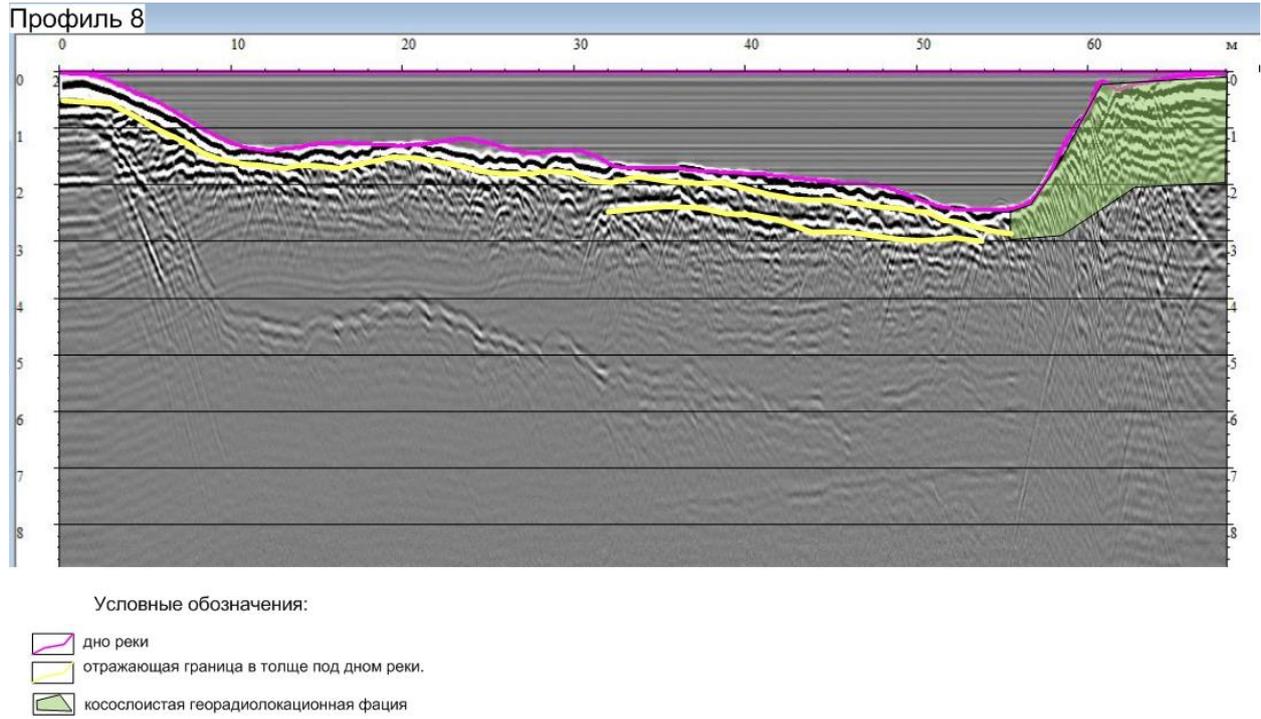


Рисунок 2.21 – Радарограмма по профилю 8

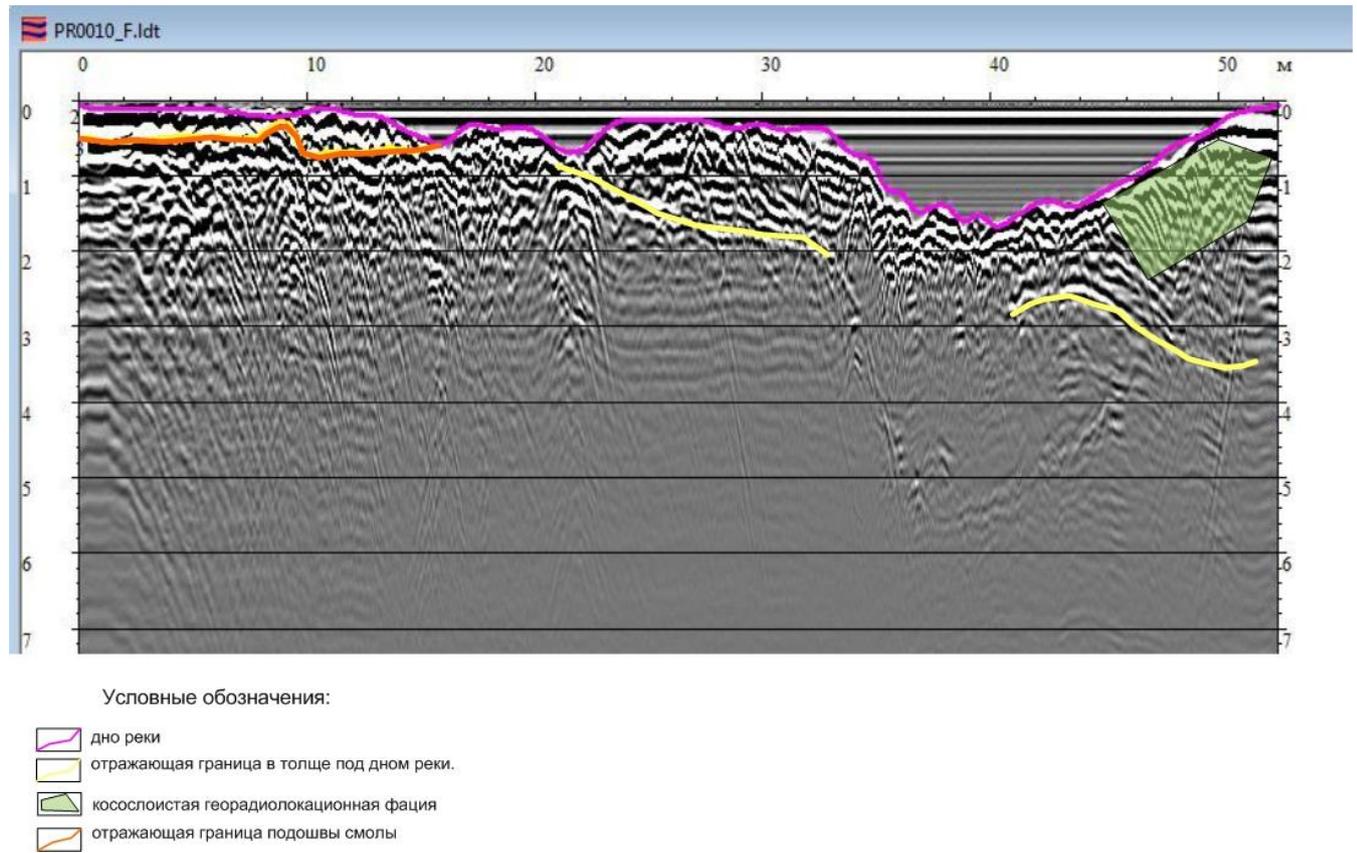


Рисунок 2.22 – Радарограмма по профилю 10

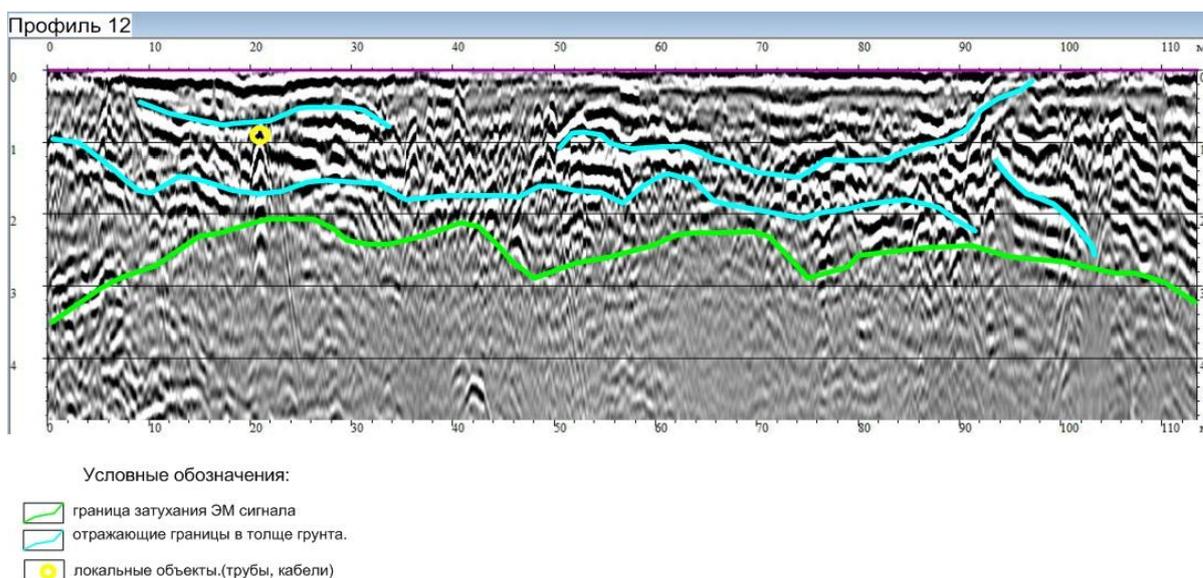


Рисунок 2.23 – Радарограмма по профилю 12

Профиль 10. Длина профиля 10 составила 52,6 метра. Диэлектрическая проницаемость на разрезе составила 81 ед. для водной толщи и 20 ед. для горных пород, которые залегают под толщей воды. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о максимальной глубине реки в этом месте, которая составила примерно 1,5 м. Данный профиль проходил в том месте, где с берега видны входы смолы в воду.

Таким образом, ПК0 профиля 10 был в 20 м от берега, так как не было возможности подойти ближе, очень мелко. На данном профиле выделяется подошва слоя предполагаемой смолы, на разрезе она обозначена оранжевым цветом. Также выделяются границы в толще известняков. В конце профиля в районе ПК50 выделена область косослоистой структуры (рисунок 2.22).

Профиль 12. Длина профиля 12 составила 113,4 метра. Диэлектрическая проницаемость на разрезе составила 7 ед. С такими свойствами максимальная глубина исследований получилась равной около 3 м. Данный профиль георадиолокации проходил прямо по профилю ЭТ-2. В районе ПК20 на глубине 90 см выделяется локальный объект. Также по всей толще наблюдаются отражающие границы, которые могут быть связаны как с загрязненным аллювием, так и с различным литологическим составом пород, слагающих данную толщу.

2.3 Результаты электроразведочных работ

Профиль ЭТ-1. Представленные исследования выполнены с использованием методов электроразведки на постоянном токе. Длина профиля ЭТ-1 – 235 м (рисунок 2.13). Удельные электрические сопротивления (УЭС) вдоль профиля и по глубине изменялись в пределах от 20 до 2500 Ом·м. По результатам интерпретации по профилю ЭТ-1 построен геоэлектрический разрез, который приводится на рисунке 2.24. В геоэлектрическом разрезе выделяются от двух до трех слоев. Максимальная глубина – 40 м. В южной части профиля ЭТ-1 примерно с ПК0 и до ПК70 выделяется высокоомный слой максимальной мощностью до 5–6 метров. Удельное электрическое сопротивление данного слоя – около 700 Ом·м. По нашему мнению, повышенные значения УЭС могут быть результатом загрязнения аллювия смолой. По всей протяженности разреза на глубинах от 10 до 15 метров выделяется кровля высокоомного слоя. В данном слое УЭС меняется от 700 до 2300 Ом·м. В литологическом плане данный слой представляет собой известняки разной степени выветренности. Последний факт как раз подтверждается таким большим диапазоном удельных электрических сопротивлений. В конце профиля начиная с ПК150 и до конца выделяется относительно низкоомный слой мощностью до 6 метров. Удельное электрическое сопротивление данного слоя меняется в пределах 20–60 Ом·м. Такие УЭС характерны для водонасыщенных четвертичных отложений.

Профиль ЭТ-2. Длина профиля ЭТ-2 также составляет 235 м (см. рисунок 2.13). Удельные электрические сопротивления (УЭС) вдоль профиля и по глубине изменяются в пределах от 20 до 2500 Ом·м. По результатам интерпретации профиля ЭТ-2 построен геоэлектрический разрез, который приводится на рисунке 2.25. В геоэлектрическом разрезе выделяются от двух до трех слоев. Максимальная глубина – 40 м. На протяжении всего профиля в геоэлектрическом разрезе выделяется относительно высокоомный слой, в котором УЭС изменяется в диапазоне от 400 до 2000 Ом·м.

Профиль ЭТ1

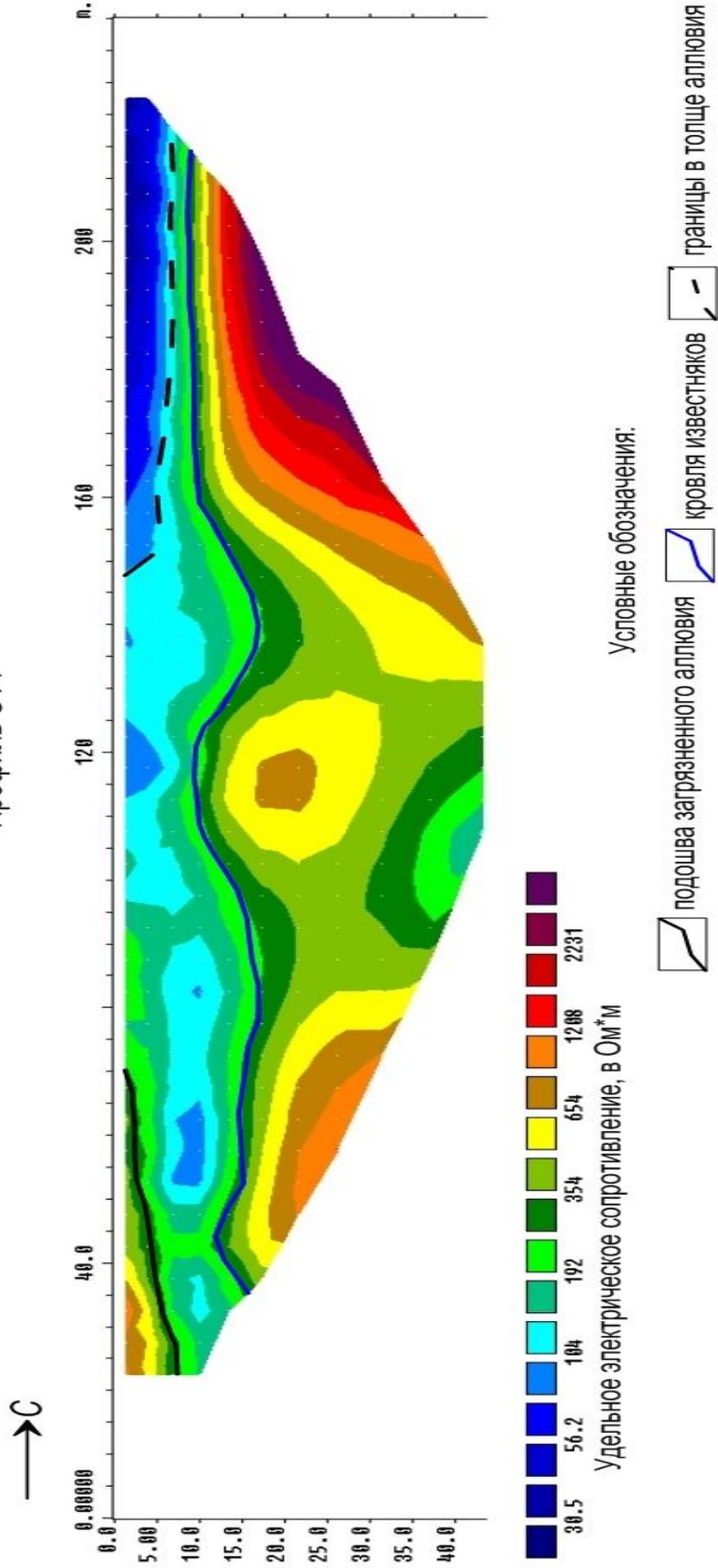


Рисунок 2.24 – Геоэлектрический разрез по профилю ЭТ-1

Профиль ЭТ2

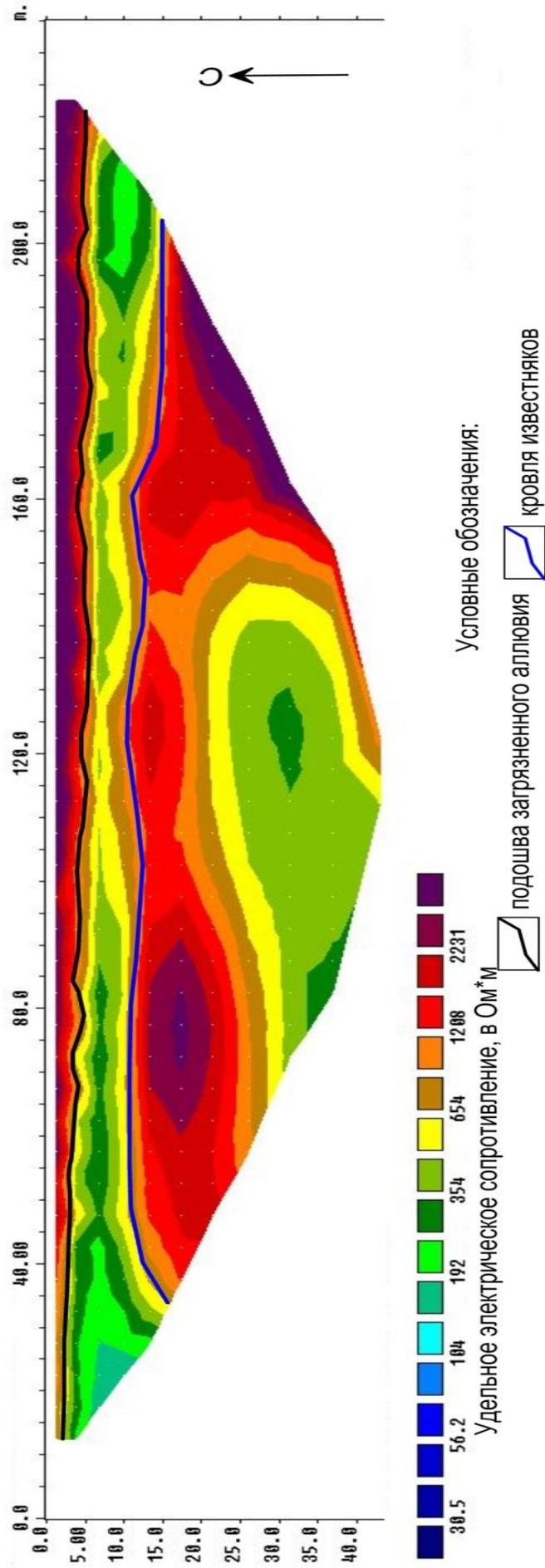


Рисунок 2.25 – Геоэлектрический разрез по профилю ЭТ-2

Мощность слоя немного увеличивается до 3 метров от ПК0 и до конца профиля. По нашему мнению, повышенные значения УЭС могут быть результатом загрязнения аллювия смолой. По всей протяженности разреза на глубинах от 15 метров в районе ПК30 и до 10 метров в районе ПК120 выделяется кровля высокоомного слоя. В данном слое УЭС меняется от 700 до 2300 Ом·м.

В литологическом плане данный слой представляет собой известняки разной степени выветренности. Последний факт как раз подтверждается таким большим диапазоном удельных электрических сопротивлений. Как и на профиле ЭТ-1, в середине геоэлектрического разреза под высокоомным слоем выделяется слой средних значений УЭС. Мощность слоя не превышает 10–12 м. Удельное электрическое сопротивление слоя характерно для водонасыщенных четвертичных отложений.

2.4 Инженерно-геологическое опробование

Инженерно-геологическое опробование представляет собой сложный процесс, направленный на исследование грунтов и горных пород с использованием интегрированного набора методик. Этот процесс включает основы расчета объемов работ, выбор оптимальных параметров исследований, а также применение технологий, обеспечивающих правильный отбор и сохранение образцов грунтов. Ключевая особенность данной методики заключается в её тесной взаимосвязи с другими видами исследований, такими как горно-буровые работы, полевые тесты и лабораторные анализы. В совокупности эти подходы позволяют получить полную и достоверную картину физических и механических свойств грунтов, а также их состава.

В отличие от универсальных самостоятельных методик, инженерно-геологическое опробование выступает лишь одной из составляющих более крупных исследовательских мероприятий, таких как инженерно-геологическая съемка, рекогносцировочные исследования и разведка. Проведение опробования основывается на последовательной реализации трех ключевых компонентов:

1. Методы расчета и планирования необходимых объемов работ, которые включают в себя определение количества полевых испытаний, выбор оптимального числа разведочных выработок и установление требуемого количества образцов грунта для последующего анализа.

2. Пространственная организация исследований, которая предполагает:

- выбор системы пунктов получения информации (СППИНФ);
- составление схемы размещения таких пунктов;
- определение параметров информационной сети для получения наиболее полных данных.

3. Использование специальных технологий для работы с образцами, включающих методы их отбора и дальнейшей консервации, обеспечивающей сохранность свойства грунтов для лабораторного анализа.

Выбор метода опробования должен осуществляться на основании комплексной оценки множества факторов, среди которых выделяются:

- литологический состав изучаемых пород;
- физико-механические характеристики грунтов;
- степень пространственной изменчивости основных свойств;
- наличие анизотропии геологических параметров;
- границы квазиоднородных геологических структур;
- также специфика проведения изысканий (тип проектируемого сооружения, этап строительства, стадии инженерно-геологических исследований).

Процесс инженерно-геологического опробования разделяется на три ключевых этапа, каждый из которых требует особого подхода:

1. Подготовительный этап. На данной стадии определяется оптимальное количество точек, где будет собираться информация, а также выбирается соответствующая система методов опробования.

2. Полевой этап. На этом этапе проводятся горно-буровые работы, выполняются испытания грунтов в полевых условиях и осуществляется сбор образцов для последующего анализа.

3. Лабораторный этап. Если исследование требует детального анализа, образцы передаются в лабораторию, где проводятся всесторонние испытания. При этом перед началом лабораторных работ образцы грунтов проходят процесс консервации.

Таблица 2.2 – Порядок проведения опробования [144]

Последовательность выполнения работ	Получение исходной информации о свойствах грунтов
I. Определение объема и параметров системы опробования (СППИНФ)	Анализ и обработка накопленной информации. Рекогносцировочные работы по опробованию и обработка их результатов
II. Измерение геологических параметров в рамках СППИНФа (системы пунктов получения информации)	Реализация системы опробования путем: 1) измерения геологических параметров полевыми методами; 2) отбора образцов грунта и измерения геологических параметров лабораторными методами; 3) совмещения работ, указанных в пунктах 1 и 2
III. Обработка данных опробования. Расчеты	Анализ, отбраковка и статистическая обработка информации о геологических параметрах с целью получения оценок их средних значений и мер рассеяния (размахов); статистика геологических полей, характеризующих пространственную изменчивость

Применение современных исследовательских методов позволяет выявить основные закономерности пространственной изменчивости геологических ха-

характеристик либо верифицировать ранее сделанные выводы о распределении этих параметров, полученные в ходе анализа геологических данных. Важной функцией данных методов является идентификация квазиоднородных геологических образований, обладающих сходными изучаемыми свойствами. Для таких образований разрабатываются специализированные системы параметров проектирования инженерно-геологических изысканий (СППИНФ) и определяются оптимальные методики опробования. Кроме того, эти методы дают возможность получить количественные показатели, необходимые для анализа структуры полей геологических параметров в разрезах, ориентированных в соответствии с основными направлениями изменчивости или режимами пространственной изменчивости.

Значимым аспектом применения данных методик является возможность определения статистических характеристик рассеяния геологических параметров, включая средние квадратичные отклонения и коэффициенты вариации. Эти показатели играют ключевую роль при расчете объемов и параметров систем опробования. В ситуациях, когда предшествующие этапы исследований уже обеспечили достаточную информационную базу для решения поставленных задач, необходимость в дополнительных рекогносцировочных работах обычно отсутствует.

После выполнения расчетных операций по определению объемов и параметров системы опробования разработанные системы внедряются в практику. Реализация осуществляется посредством проведения горно-буровых работ и полевых испытаний грунтов. Хотя данные мероприятия формально не входят в состав инженерно-геологического опробования грунтов, они выполняют важную подготовительную функцию. В процессе практической реализации систем осуществляется выбор наиболее подходящих методов отбора образцов, которые могут включать точечный, бороздовый, валовой способы или их комбинации. Последующим этапом является непосредственный забор образцов и их консервация для последующих лабораторных исследований.

Грунтовый образец представляет собой определенный объем грунтовой массы, отобранный для последующего изучения его свойств в лабораторных или полевых условиях. В зависимости от целей исследования и применяемой методики отбора образец может сохранять исходные характеристики структуры, текстуры, плотности и естественной влажности, либо эти параметры могут подвергаться изменениям в процессе отбора. Образцы, сохраняющие первоначальные структурно-текстурные особенности и физические свойства грунта, классифицируются как монолиты.

Понятие пробы грунта подразумевает строго или приблизительно определенный объем геологической среды, который может быть извлечен из массива или оставаться в нем и который взаимодействует с измерительными приборами в ходе полевых или лабораторных испытаний. В лабораторных условиях проба представляет собой точно дозированный объем или массу вещества, отобранную из образца в соответствии с нормативными требованиями, – так называемые лабораторные пробы. При полевых исследованиях взаимодействие происходит между измерительным оборудованием и определенной зоной грунтового массива, что моделирует реальные условия контакта геологической среды с инженерными сооружениями в процессе эксплуатации; подобные пробы определяются как полевые.

В ходе инженерно-геологических исследований применялось 2 способа бурения:

1. Дающий керн в виде столбика грунта с относительно ненарушенной структурой – колонковый (рисунок 2.27 б).
2. Дающий керн, представляющий собой грунт нарушенного строения – шнековый (рисунок 2.27 а).

На исследуемой территории выполнено бурение шести скважин, с максимальной глубиной закладки скважин, достигающей 9,5 м (рисунок 2.26). Работы проводились с целью изучения литологического состава грунтов, их инженерно-геологических характеристик, мощности слоёв, а также общей стратиграфической структуры разреза.

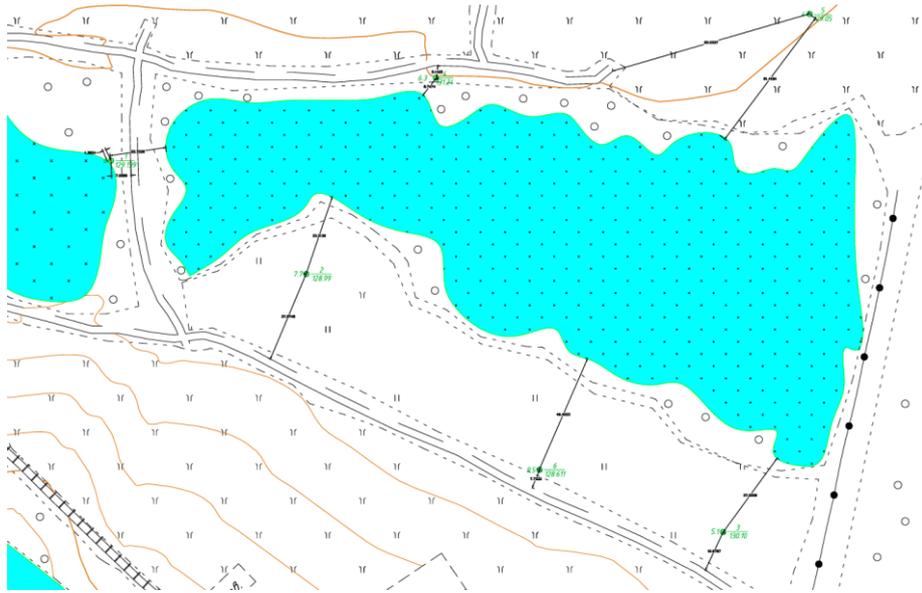


Рисунок 2.26 – Карта-схема горных работ

При бурении осуществлялся систематический отбор грунтов в виде проб кернов как нарушенной, так и ненарушенной структуры, что позволило обеспечить достоверность и полноту выполняемых работ.

При бурении скважин были выявлены слоевые скопления смоляных отходов под насыпными грунтами (рисунок 2.28), что указывает на проводимые ранее отсыпки смоляных озер.



а



б

Рисунок 2.27 – Геологическое бурение на техногенном месторождении ПАУ в Вологодской области:

а – шнековое бурение; б – колонковое бурение

По результатам обработки всех полученных данных при бурении были построены стратиграфические колонки (рисунок 2.28).

В геологическом строении исследуемого участка в пределах глубины бурения до 10,0 м принимают участие четвертичные отложения (Q) – Пески голоценового горизонта (alV) и суглинки озерно-ледниковых отложений валдайского горизонта ($lgIIIos$), а также отложения каменноугольной системы (C) – известняки доломитизированные подольского горизонта (C_2pd).

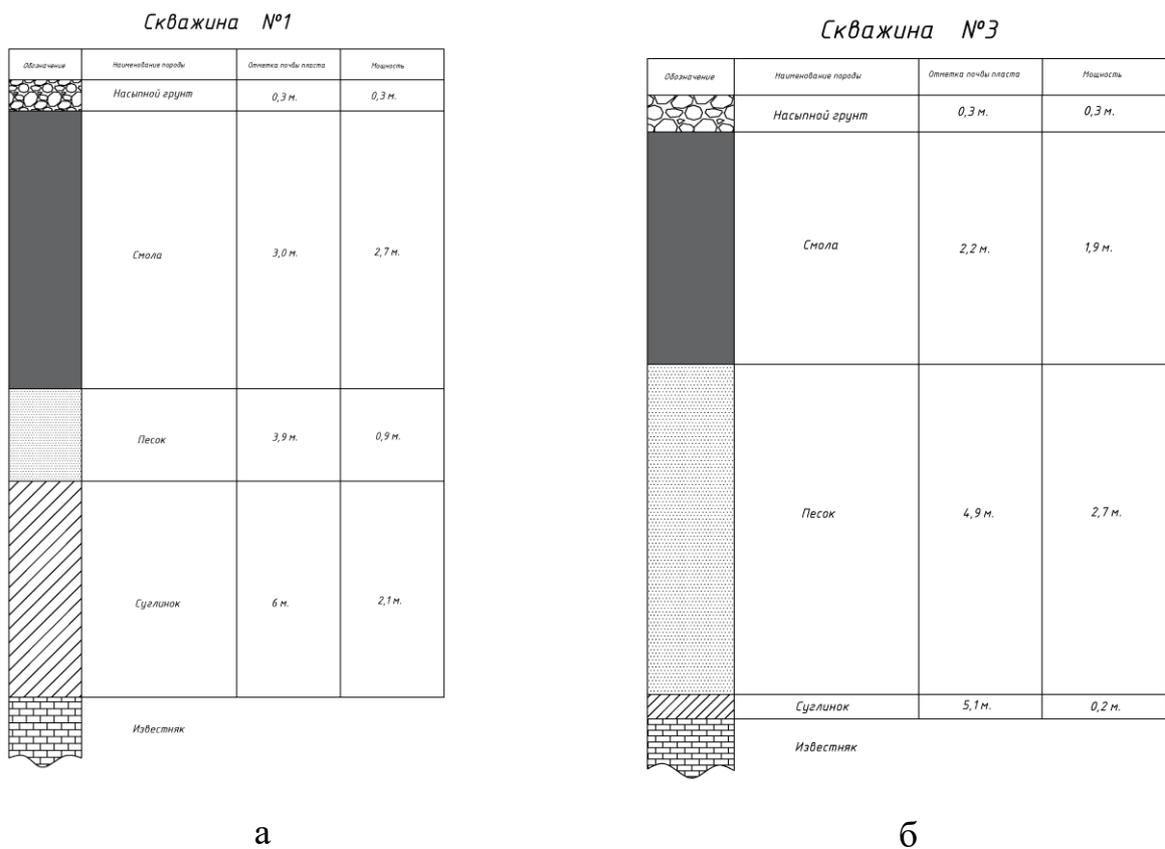


Рисунок 2.28 – Результаты геологического опробования:

а – горная выработка № 1; б – горная выработка № 2

В период выполнения полевых работ появившийся уровень грунтовых вод был зафиксирован на глубине от 2,1 до 3,65 м. Установившийся уровень грунтовых вод зафиксирован на глубине от 1,3 до 2,5 м. Водовмещающими грунтами являются суглинки бурые полутвердые (ИГЭ-2). Питание водоносного горизонта происходит за счёт инфильтрации атмосферных осадков, поверх-

ностных и талых вод. Разгрузка осуществляется в местную гидрографическую сеть. На основании проведенного инженерно-геологического опробования установлено, что коррозионная агрессивность грунтов в отношении углеродистых и низколегированных сталей оценивается как высокая. Данное заключение обусловлено наличием факторов, способствующих электролитической, химической и микробиологической коррозии металлов, таких как высокая влажность грунтов, их химический состав, включая содержание растворимых солей, а также специфический режим водообмена и аэрации. В то же время грунты исследуемой территории классифицируются как неагрессивные по отношению к бетонным и железобетонным конструкциям.

Октановая кислота, входящая в химический состав смоляных отходов, может вызывать коррозию металлов. В целом смоляные отходы нейтральны к металлам и бетонам.

2.5 Исследование состава смоляных отходов

Для исследования состава смоляных отходов отбирались пробы в различных точках смоляных озер. Процессы отбора проб показаны на рисунке 2.30. Исследование состава смоляных отходов выполнялось Научно-исследовательским отделом физико-химических методов анализа Испытательного Центра ОАО НИИ «Ярсинтез». Запись в Реестре аккредитованных лиц РОСС RU.0001.512846.

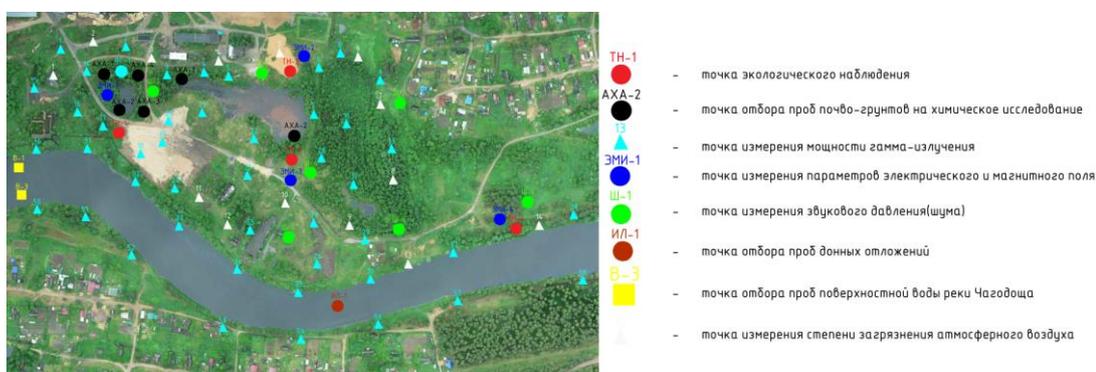


Рисунок 2.29 – Карта отбора проб и пунктов наблюдений

Пробы отбирались методом конверта с поверхности каждого смоляного озера в соответствии с ГОСТ 17.4.4.02-84 «Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для физико-химического и химического анализа» [105]. Пробы смоляных отходов находились в герметично закрытых стеклянных сосудах объемом 0,5 дм³ и были промаркированы.

Проводился качественный и количественный анализ растворенной твердой фазы, определялась зольность и оценивалась острая токсичность на гидробионтах, а также в рамках проведенных исследований были выполнены замеры физических факторов воздействия.

2.5.1 Определение зольности смоляных отходов

Зольность смоляных отходов определялась методом гравиметрии по изменению массы навески после прокаливания в муфельной печи. Непосредственно перед проведением анализа фарфоровый тигель, выполненный по ГОСТ 9147-80, высушивали до постоянной массы и взвешивали с точностью до 10⁻⁵ г.



Рисунок 2.30 – Отбор смоляных отходов на большом смоляном озере (точка 1)

Пробы отходов усредняли методом квартования и брали навески массой 0,15 – 0,17 г. Тигли с пробами помещали в холодный сушильный шкаф, нагревали до 105 °С и термостатировали в течение 3 ч. Высушенные пробы переносили в холодную муфельную печь и разогревали до 200 °С в течение 30 мин., после чего постепенно повышали температуру до 525 °С в течение 3 ч. Тигли с зольным остатком извлекали из муфельной печи, закрывали крышкой и ставили в эксикатор, а затем охлаждали до комнатной температуры. Тигли взвешивали, а зольность определяли как разность масс навесок отходов до и после прокаливания.

Определена зольность отходов. Результаты представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты определения зольности смоляных отходов

Наименование пробы	m_0 , г	m_k , г	Зольность, %
Большое смоляное озеро	0,15190	0,00080	0,53
Малое смоляное озеро	0,17085	0,00848	4,95

2.5.2 Определение острой токсичности на гидробионтах

Определение токсичности осуществлялось по следующим методикам:

1. ФР.1.39.2007.03223 «Методика определения токсичности вод, водных вытяжек из почв, осадков сточных вод и отходов по изменению уровня флуоресценции хлорофилла и численности клеток водорослей.

2. ФР.1.39.2007.03221 «Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости церодафний.

Обе методики допущены для целей государственного экологического контроля.

Исследования проводились совместно с Испытательным Центром ОАО НИИ «Ярсинтез» – аккредитованной лабораторией предприятия в рамках действующего аттестата аккредитации (запись в Реестре аккредитованных лиц РОСС RU.0001.512846).

Согласно полученным данным, отходы относятся к III классу опасности.

2.5.3 Определение качественного и количественного состава

Пробоподготовка. Твердая фаза представляла собой вязкую массу черного цвета, для проведения хроматографического исследования была проведена экстракция ацетоном. Для исключения влияния растворителя на результаты исследования было проведено хроматографическое исследование ацетона, установлено, что используемый ацетон не имеет примесей, чьи бы времена удерживания совпадали с временами удерживания компонентов анализируемой смеси. Перед проведением анализа экстракт был центрифугирован.

Использованное оборудование

1. Хроматограф «Кристаллюкс-4000М» с детектором по теплопроводности.
2. Хромато-масс-спектрометр Perkin Elmer Clarus 680 (GC) + Clarus SQ 8T (МС), снабженный колонкой ELITE-5ms 30 m×0,25 mm×0,25 um.

Ход проведения исследования

По стандартной методике определено содержание воды в представленных образцах с использованием хроматографа «Кристаллюкс-4000М» с детектором по теплопроводности (таблица 2.4). Исследование проводилось методом абсолютной градуировки, в дальнейшем был произведен перерасчет процентного содержания воды и результаты интегрированы в итоговую таблицу.

Таблица 2.4 – Результаты содержания воды в пробах

Место отбора пробы	% масс.
Большое озеро	2,19
Малое озеро	2,91

При проведении качественного и количественного анализа были подобраны условия хроматографирования. Условия хроматографирования приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Используемые условия хроматографирования

<i>Прибор:</i> Perkin Elmer Clarus 680 (ГХ) + Clarus SQ 8Т (масс-спектрометр)		
<i>Колонка:</i> ELITE-5ms 30 m×0,25 mm×0,25 um		
<i>Режим ввода пробы:</i> Ручной		<i>V</i> _{пробы} : 0,5 мкл
<i>T</i> _{инжектора} : 240 ⁰ С	<i>Деление потока:</i> 1:80	<i>Скорость газоносителя:</i> 1 мл/мин.
<i>Режим нагрева колонки</i>		
Скорость нагрева, °С/мин.	Температура, °С	Время, мин.
	40	5
4	200	5
<i>T</i> _{источника} =220 °С		

Ниже (таблица 2.6) приведены результаты исследования проб вод и смолы, причем в пробах количественное содержание металлов относительно невелико и отличается незначительно.

Таблица 2.6 – Результаты исследований проб воды и смолы (вода с поверхности смолы). Органолептические показатели качества воды

№	Определяемые показатели, единицы измерения	Объединённая проба	ПДК
1	Водород, показатель	7,35	6,5-8,5
2	Запах, баллы	4	не более 2
3	Азот аммонийный, мг/дм ³	3,13	1,5
4	Нитратный азот, мг/дм ³	445	45,0
5	Нитритный азот, мг/дм ³	0,49	3,3
6	Железо общее, мг/дм ³	0,52	0,3
7	Кальций, мг/дм ³	142	-
8	Магний, мг/дм ³	79,0	50
9	Калий, мг/дм ³	262	-
10	Растворенный кислород, мг/дм ³	4,2	не более 4
11	Сульфаты, мг/дм ³	<0,5	500

Продолжение таблицы 2.6

№	Определяемые показатели, единицы измерения	Объединённая проба	ПДК
12	Хлориды, мг/дм ³	1254	350
13	Фториды, мг/дм ³	0,59	-
14	Натрий, мг/дм ³	786	200,0
15	Нефтепродукты, мг/дм ³	0,11	-
16	Сухой остаток, мг/дм ³	2344	1000,0
17	Взвешенные вещества, мг/дм ³	97	-
18	БПК ₅ , О ₂ /дм ³	4,65	4
19	Гидрокарбонаты, мг/дм ³	514	-
20	Цветность, градус	6,95	не более 20
21	Мутность, ЕМФ	38,9	не более 2,6
22	Жесткость, мг/дм ³	13,6	7-10
23	ХПК, мг/дм ³	383	30
24	Марганец, мг/дм ³	0,62	0,1

Оценка массы смоляных отходов. Смоляные отходы представляют собой вязкую массу черного цвета с органическим запахом. Температура плавления составляет 39 °С, температура кипения – 145 °С. Вязкость образца при 25 °С составляет 200 ед. Плотность – 1100 кг/м³. Смола не возгорается при поднесении открытого пламени.

Основные характеристики смоляных озер представлены в таблице 2.7. Глубина определялась по радарограммам, а затем рассчитывалось среднее значение.

Таблица 2.7 – Основные характеристики смоляных озер

Наименование озера	Площадь зеркала, м ²	Средняя мощность слоя, м	Объем отходов, м ³	Масса отходов, т
Малое	5 000	1,6	8 000	8 800
Большое	13 500	1,7	22 950	25 245
Засыпанное	35 000	1,5	52 500	57 750
Русло р. Чагодищи	210 000	0,5	105 000	115 500
Итого				207 295

Смоляные отходы по их качественному составу относятся к ПАУ, что отображено в таблице 2.8.

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) характеризуются выраженной канцерогенной, мутагенной, тератогенной и токсической активностью. Их воздействие на организм человека и животных наблюдается при концентрациях, в 10–100 раз меньших, чем дозы, вызывающие общетоксическое действие. Благодаря своей гидрофобной природе молекулы ПАУ способны эффективно преодолевать биологические барьеры, включая клеточные мембраны, что способствует их накоплению в тканях живых организмов. Данное свойство гидрофобности также препятствует их доступности для ферментных систем, участвующих в процессах биodeградации токсических соединений, что затрудняет их детоксикацию и выведение из организма.

Воздействие полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) на организм сопровождается развитием окислительного стресса, представляющего собой дисбаланс между продукцией активных форм кислорода (АФК) и способностью клеточных антиоксидантных систем эффективно их нейтрализовать. Процесс метаболизма ПАУ при участии ферментов системы цитохрома P450 приводит к образованию высокореактивных промежуточных продуктов, таких как эпоксиды и диолэпоксиды, которые способны взаимодействовать с биомолекулами, включая липиды, белки и ДНК. Это взаимодействие генерирует значительное количество АФК, усиливая окислительное повреждение клеточных структур [127].

Накопленные мутационные изменения, если они затрагивают критически важные гены, такие как онкогены или гены-супрессоры опухолей (например, TP53 или RB1), могут приводить к нарушению регуляции апоптоза, клеточного цикла и процессов клеточной дифференцировки. В результате этих изменений клетки утрачивают контроль над делением и начинают пролиферировать бескон-

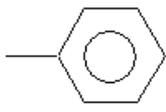
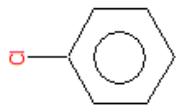
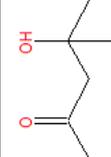
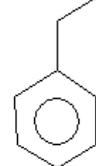
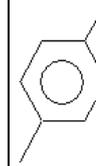
трольно, что инициирует процесс канцерогенеза. Более того, хронический окислительный стресс в тканях может поддерживать воспалительный микросредовой фон, который сам по себе способен стимулировать прогрессию злокачественных новообразований [127].

Ароматические углеводороды, такие как толуол, этилбензол, стирол и ксилолы (включая о-, м- и п-формы), являются летучими органическими соединениями (ЛОС). Они относятся к веществам с нейротоксическим эффектом, особенно в случае ингаляционного воздействия. Основные эффекты [128]:

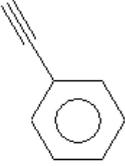
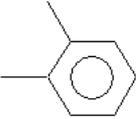
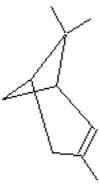
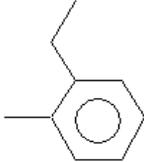
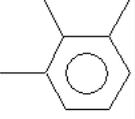
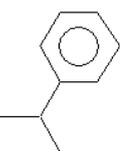
- раздражение слизистых оболочек (глаза, дыхательные пути);
- нарушение центральной нервной системы (головная боль, головокружение, снижение когнитивной функции, утомляемость);
- нарушение репродуктивной функции (например, толуол влияет на развитие плода у беременных женщин, что подтверждено различными исследованиями);
- высокая токсичность и канцерогенность, в том числе влияние на метаболизм, иммунный ответ и потенциальная связь с развитием лейкемии. Канцерогенность бензола обусловлена повреждением ДНК, изменением экспрессии генов и ингибированием ключевых ферментов репарации ДНК, таких как топоизомераза II. Метаболиты бензола, такие как гидрохинон и фенол, усиливают производство активных форм кислорода, что ведет к окислительному стрессу [129].

Качественный и количественный состав смоляных отходов представлен в таблице 2.8.

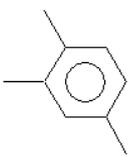
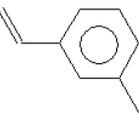
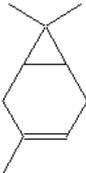
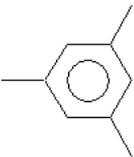
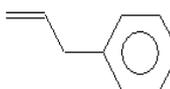
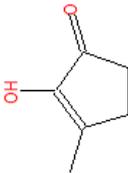
Таблица 2.8 – Качественный и количественный состав исследованных смоляных отходов

№ п/п	t _R , мин.	S _{пика} , ед. пл. : 10 ⁶		Компонент	Концентрация, % масс.		Структурная формула
		Малое озеро	Большое озеро		Малое озеро	Большое озеро	
1	4,92-4,93	1,91	2,79	Toluene	0,23	0,47	
2	6,30	1,40	-	Formamide, N,N-dimethyl-	0,17	-	
3	7,10	-	0,75	Benzene, chloro-	-	0,13	
4	8,04-8,06	0,77	0,77	2-Pentanone, 4-hydroxy-4-methyl-	0,09	0,13	
5	8,47-8,56	1,20	0,73	Ethylbenzene	0,14	0,12	
6	8,87	2,16	2,50	p-Xylene	0,26	0,42	

Продолжение таблицы 2.8

№ п/п	t _R , мин.	S _{ника} , ед. пл. : 10 ⁶		Компонент	Концентрация, % масс.		Структурная формула
		Малое озеро	Большое озеро		Малое озеро	Большое озеро	
7	9,16-9,26	0,71	0,68	Phenylethyne	0,09	0,12	
8	9,76	-	1,74	Styrene	-	0,30	
9	9,83	2,60	1,75	o-Xylene	0,31	0,30	
10	11,57	1,00	2,12	Bicyclo[3.1.1]hept-2-ene, 3,6,6-trimethyl-	0,12	0,36	
11	12,77- 12,83	1,55	1,94	Benzene, 1-ethyl-2-methyl-	0,19	0,33	
12	13,07	0,65	-	Benzene, 1,2,3-trimethyl-	0,08	-	
13	13,55- 13,57	1,09	1,00	Benzene, (1-methylethyl)-	0,13	0,17	

Продолжение таблицы 2.8

№ п/п	t _R , мин.	S _{пика} , ед. пл. : 10 ⁶		Компонент	Концентрация, % масс.		Структурная формула
		Малое озеро	Большое озеро		Малое озеро	Большое озеро	
14	14,09- 14,16	11,18	5,17	Benzene, 1,2,4-trimethyl-	1,34	0,88	
15	14,22	-	3,24	Benzene, 1-ethenyl-3-methyl-	-	0,55	
16	14,79	-	1,44	3-Carene	-	0,24	
17	15,30	4,66	3,88	Mesitylene	0,56	0,66	
18	15,56	3,00	0,41	Benzene, 2-propenyl-	0,36	0,07	
19	15,68- 15,92	3,29	1,66	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-	0,39	0,28	
20	16,17	12,15	9,52	Indene	1,46	1,61	

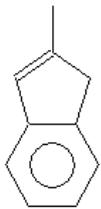
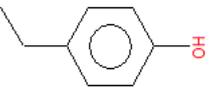
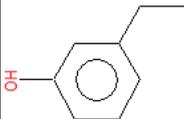
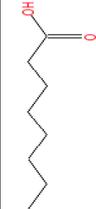
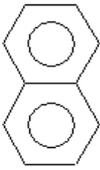
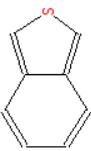
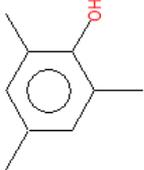
Продолжение таблицы 2.8

№ п/п	t _R , мин.	S _{пика} , ед. пл. : 10 ⁶		Компонент	Концентрация, % масс.		Структурная формула
		Малое озеро	Большое озеро		Малое озеро	Большое озеро	
21	16,63- 16,80	1,33	2,05	p-Cumene	0,16	0,35	
22	16,87- 16,89	3,58	1,12	Phenol, 2-methyl-	0,43	0,19	
23	17,14- 17,22	1,61	0,95	Benzyl nitrile	0,19	0,16	
24	17,68- 17,70	10,68	15,28	p-Cresol	1,28	2,59	
25	18,10	3,74	-	2-Cyclopenten-1-one, 3,5,5-trimethyl-	0,45	-	
26	18,48	3,66	-	2-Propenal, 3-phenyl-	0,44	-	
27	18,73	4,42	8,54	Benzofuran, 2-methyl-	0,53	1,45	

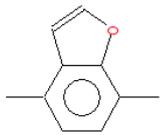
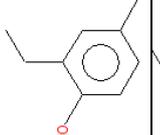
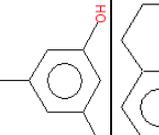
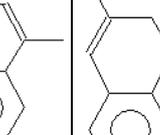
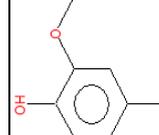
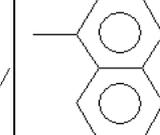
Продолжение таблицы 2.8

№ п/п	t _R , мин.	S _{пика} , ед. пл. : 10 ⁶		Компонент	Концентрация, % масс.		Структурная формула
		Малое озеро	Большое озеро		Малое озеро	Большое озеро	
28	19,00	0,37	-	Phenol, 4-ethyl-3-methyl-	0,04	-	
29	19,33	-	1,15	Indan, 1-methyl-	-	0,20	
30	19,79	-	0,54	Benzene, 4-ethenyl-1,2-dimethyl-	-	0,09	
31	20,12	-	0,54	Phenol, 3-ethyl-	-	0,09	
32	20,24	4,55	6,32	1H-Indene, 1-methyl-	0,55	1,07	
33	20,39	4,95	4,95	Phenol, 2,3-dimethyl-	0,59	0,84	

Продолжение таблицы 2.8

№ п/п	t _R , мин.	S _{пика} , ед. пл. : 10 ⁶		Компонент	Концентрация, % масс.		Структурная формула
		Малое озеро	Большое озеро		Малое озеро	Большое озеро	
34	20,47	6,85	8,40	2-Methylindene	0,82	1,42	
35	21,12	7,65	3,84	Phenol, 4-ethyl-	0,92	0,65	
36	21,19	6,26	2,23	Phenol, 3-ethyl-	0,75	0,38	
37	21,35- 21,42	3,69	1,44	Octanoic acid	0,44	0,24	
38	21,52	56,92	59,92	Naphthalene	6,81	10,16	
39	21,85	4,35	7,69	Benzo[c]thiophene	0,52	1,30	
40	22,32- 22,38	1,65	0,71	Phenol, 2,4,6-trimethyl-	0,20	0,12	

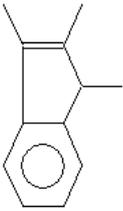
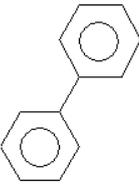
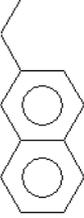
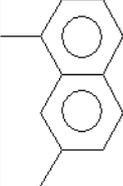
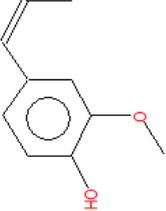
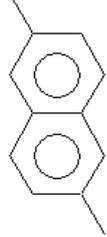
Продолжение таблицы 2.8

№ п/п	t _R , мин.	S _{пика} , ед. пл. : 10 ⁶		Компонент	Концентрация, % масс.		Структурная формула
		Малое озеро	Большое озеро		Малое озеро	Большое озеро	
41	22,44	0,79	0,39	Benzofuran, 4,7-dimethyl-	0,09	0,07	
42	23,28	5,29	2,71	Phenol, 2-ethyl-4-methyl-	0,63	0,46	
43	23,63	2,80	1,23	Phenol, 3-ethyl-5-methyl-	0,34	0,21	
44	24,19- 24,26	3,80	2,08	Naphthalene, 1,2-dihydro-4-methyl-	0,46	0,35	
45	24,39	10,80	8,00	Naphthalene, 1,2-dihydro-3-methyl-	1,29	1,36	
46	24,99	12,56	10,92	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-	1,51	1,85	
47	25,42	25,57	26,04	Naphthalene, 1-methyl-	3,07	4,42	

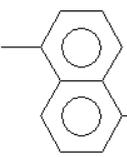
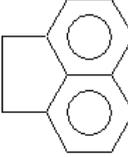
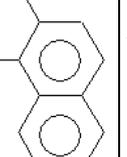
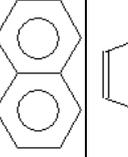
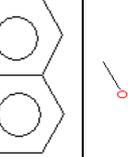
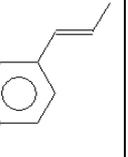
Продолжение таблицы 2.8

№ п/п	t _R , мин.	S _{ликая} , ед. пл. : 10 ⁶		Компонент	Концентрация, % масс.		Структурная формула
		Малое озеро	Большое озеро		Малое озеро	Большое озеро	
48	25,60	4,19	3,80	Tridecane	0,50	0,64	
49	25,99	25,48	21,11	Naphthalene, 2-methyl-	3,05	3,58	
50	27,36- 27,40	7,62	1,78	Phenol, 2,6-dimethoxy-	0,91	0,30	
51	27,54- 27,69	6,40	3,10	2-Isopropylamino-4-methylbenzotrile	0,77	0,53	
52	27,59	-	1,56	Eugenol	-	0,26	
53	27,91	9,23	2,39	Dihydroxypropiofenone 2',4'-	1,11	0,41	

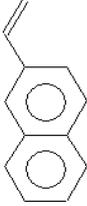
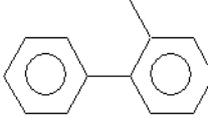
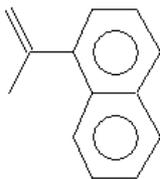
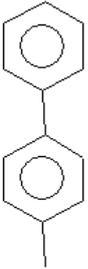
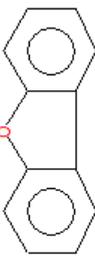
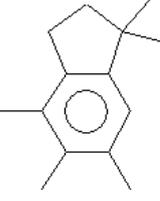
Продолжение таблицы 2.8

№ п/п	t _R , мин.	S _{пика} , ед. пл. : 10 ⁶		Компонент	Концентрация, % масс.		Структурная формула
		Малое озеро	Большое озеро		Малое озеро	Большое озеро	
54	28,05- 28,09	2,20	1,63	1,2,3-Trimethylindene	0,26	0,28	
55	28,25	8,89	3,83	Biphenyl	1,07	0,65	
56	28,60- 28,67	6,97	2,03	Naphthalene, 2-ethyl-	0,84	0,34	
57	29,03	8,97	6,09	Naphthalene, 1,7-dimethyl-	1,08	1,03	
58	29,22- 29,27	4,21	2,09	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-, (Z)-	0,50	0,35	
59	29,50	7,24	5,64	Naphthalene, 2,6-dimethyl-	0,87	0,96	

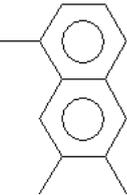
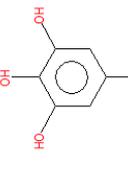
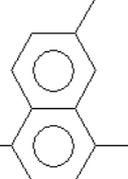
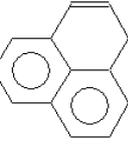
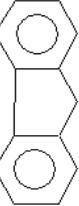
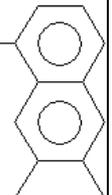
Продолжение таблицы 2.8

№ п/п	t _R , мин.	S _{пика} , ед. пл. : 10 ⁶		Компонент	Концентрация, % масс.		Структурная формула
		Малое озеро	Большое озеро		Малое озеро	Большое озеро	
60	29,59	8,26	6,97	Naphthalene, 1,5-dimethyl-	0,99	1,18	
61	29,80	2,63	1,26	Acenaphthene	0,32	0,21	
62	30,11	4,69	7,24	Naphthalene, 1,2-dimethyl-	0,56	1,23	
63	30,21	2,70	-	Naphthalene, 1,8-dimethyl-	0,32	-	
64	30,42	41,86	36,07	Acenaphthylene	5,02	6,12	
65	30,51	18,60	25,46	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-	2,23	4,32	

Продолжение таблицы 2.8

№ п/п	t _R , мин.	S _{пика} , ед. пл. : 10 ⁶		Компонент	Концентрация, % масс.		Структурная формула
		Малое озеро	Большое озеро		Малое озеро	Большое озеро	
66	31,52	8,97	6,17	Naphthalene, 2-ethenyl-	1,08	1,05	
67	31,68	3,82	-	1-Tridecene	0,46	-	
68	31,84	2,93	3,70	1,1'-Biphenyl, 2-methyl-	0,35	0,63	
69	31,91	5,92	2,46	1-Isopropenyl-naphthalene	0,71	0,42	
70	32,31	4,11	1,90	1,1'-Biphenyl, 4-methyl-	0,49	0,32	
71	32,44	11,00	6,35	Dibenzofuran	1,32	1,08	
72	32,61	8,45	-	1,1,4,5,6-Pentamethyl-2,3-dihydro-1H-indene	1,01	-	

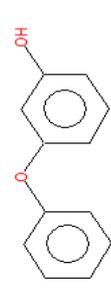
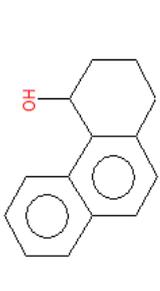
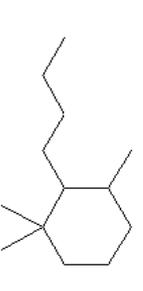
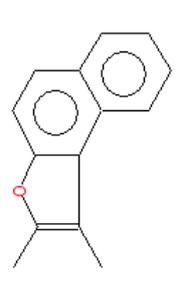
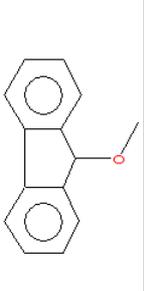
Продолжение таблицы 2.8

№ п/п	t _R , мин.	S _{пика} , ед. пл. : 10 ⁶		Компонент	Концентрация, % масс.		Структурная формула
		Малое озеро	Большое озеро		Малое озеро	Большое озеро	
73	32,73	-	1,06	Naphthalene, 1,6,7-trimethyl-	-	0,18	
74	32,85	6,69	6,12	5-tert-Butylpyrogallol	0,80	1,04	
75	33,35	3,40	2,87	Naphthalene, 2,3,6-trimethyl-	0,41	0,49	
76	33,42	1,33	1,87	Naphthalene, 1,4,6-trimethyl-	0,16	0,32	
77	33,84	15,42	14,96	1H-Phenylene	1,85	2,54	
78	34,39	19,67	16,73	Fluorene	2,36	2,84	
79	34,54	5,20	-	Naphthalene, 1,6,7-trimethyl-	0,62	-	
80	34,59	6,33	-	n-Pentadecanol	0,76	-	-

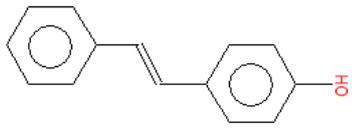
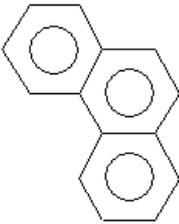
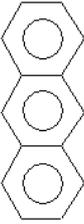
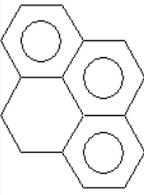
Продолжение таблицы 2.8

№ п/п	t _R , мин.	S _{пика} , ед. пл. : 10 ⁶		Компонент	Концентрация, % масс.		Структурная формула
		Малое озеро	Большое озеро		Малое озеро	Большое озеро	
81	34,80	6,72	-	Hexadecane	0,81	-	-
82	35,47- 35,55	8,72	3,20	9H-Xanthene	1,05	0,54	
83	35,84	10,00	4,16	Dibenzofuran, 4-methyl-	1,20	0,71	
84	36,14	5,14	-	6H-Dibenzo[b,d]-pyran	0,62	-	
85	37,55	12,10	-	9H-Fluorene, 4-methyl-	1,45	-	
86	37,76	13,66	20,66	(E)-2,6-Dimethoxy-4-(prop-1-en-1-yl)phenol	1,64	3,50	

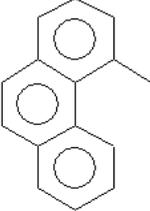
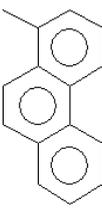
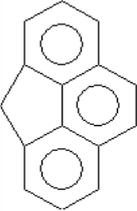
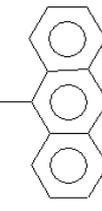
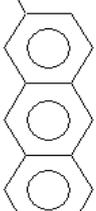
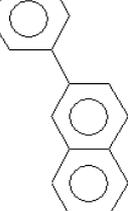
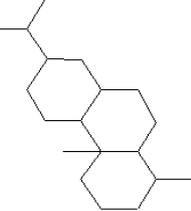
Продолжение таблицы 2.8

№ п/п	t _R , мин.	S _{пика} , ед. пл. : 10 ⁶		Компонент	Концентрация, % масс.		Структурная формула
		Малое озеро	Большое озеро		Малое озеро	Большое озеро	
87	37,84	-	1,96	Phenol, 3-phenoxy-	-	0,33	
88	38,08	7,10	1,66	1,2,3,4- Tetrahydrophenanthrene-4- ol-	0,85	0,28	
89	38,36	16,30	2,55	Cyclohexane, 2-butyl-1,1,3- trimethyl-	1,95	0,43	
90	38,54	3,89	2,92	Naphtho[2,1-b]furan, 1,2- dimethyl-	0,47	0,50	
91	38,67	12,85	6,95	9-Methoxyfluorene	1,54	1,18	

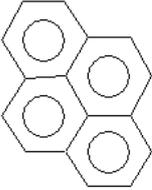
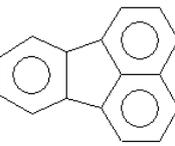
Продолжение таблицы 2.8

№ п/п	t _R , мин.	S _{пика} , ед. пл. : 10 ⁶		Компонент	Концентрация, % масс.		Структурная формула
		Малое озеро	Большое озеро		Малое озеро	Большое озеро	
92	39,04	5,25	6,63	Phenol, 4-(2-phenylethenyl)-, (E)-	0,63	1,12	
93	39,73	48,16	33,18	Phenanthrene	5,77	5,63	
94	39,97	21,49	10,10	Anthracene	2,58	1,71	
95	40,15	8,26	2,95	Octadecane	0,99	0,51	-
96	41,68- 41,78	3,51	2,38	Pyrene, 4,5-dihydro-	0,42	0,41	
97	42,48	3,96	3,37	1-Nonadecene	0,47	0,57	-

Продолжение таблицы 2.8

№ п/п	t _R , мин.	S _{пика} , ед. пл. : 10 ⁶		Компонент	Концентрация, % масс.		Структурная формула
		Малое озеро	Большое озеро		Малое озеро	Большое озеро	
98	42,63	13,85	6,47	Phenanthrene, 4-methyl-	1,66	1,10	
99	42,75	9,96	5,42	Phenanthrene, 1-methyl-	1,19	0,92	
100	43,15	9,14	4,03	4H- Cyclopenta[def]phenanthrene	1,10	0,68	
101	43,22	4,96	4,88	Anthracene, 9-methyl-	0,59	0,83	
102	43,34	9,13	5,02	Anthracene, 2-methyl-	1,09	0,85	
103	44,48	2,90	4,18	Naphthalene, 2-phenyl-	0,35	0,71	
104	44,71	9,83	-	18-Norabietane	1,18	-	

Продолжение таблицы 2.8

№ п/п	t _R , мин.	S _{пика} , ед. пл. : 10 ⁶		Компонент	Концентрация, % масс.		Структурная формула
		Малое озеро	Большое озеро		Малое озеро	Большое озеро	
105	45,00	7,04	-	Heneicosane	0,84	-	C ₂₁ H ₄₄
106	46,67	24,32	14,58	Pyrene	2,92	2,47	
107	48,19	21,04	13,96	Fluoranthene	2,52	2,37	
108	-	-	-	Water	2,91	2,19	H ₂ O

На основании таблицы 2.8, к группе ПАУ можно отнести следующие соединения:

- Нафталин (Naphthalene) – два конденсированных бензольных кольца;
- Аценаптен (Acenaphthene) – содержит два бензольных кольца и одну пятичленную циклическую группу;
- Аценаптилин (Acenaphthylene) – два конденсированных бензольных кольца с пятиточечным циклом;
- Бензофуран (Benzofuran) – хотя формально гетероциклическое (содержит кислород), оно часто обсуждается вместе с ПАУ;
- Дибензофуран (Dibenzofuran) – содержит три кольца: два бензольных и одно с кислородом;
- 1Н-Фенален (1H-Phenylene) – соединение из трех конденсированных бензольных колец;
- Флуорен (Fluorene) – два бензольных кольца и центральное пятичленное;
- Ксантен (9H-Xanthene) – три кольца, включая кислород;
- Дибензофуран, 4-метил- (Dibenzofuran, 4-methyl);
- 9Н-Флуорен, 4-метил- (9H-Fluorene, 4-methyl);
- Фенантрен (Phenanthrene) – три конденсированных бензольных кольца;
- Антрацен (Anthracene) – три конденсированных бензольных кольца в линейном строении;
- Пирен (Pyrene) – четыре конденсированных кольца;
- Флуорантен (Fluoranthene) – четыре кольца, одно из них пятичленное.

Выводы

1. Смоляные отходы, консолидированные на участке Чагодощенского стекольного завода и в русле реки Чагодощи, представляют собой ПАУ, имеют в своем составе 108 органических соединений, 14 из которых являются типичными соединениями ПАУ.

2. По степени токсичности и классу опасности смоляные отходы относятся к III классу опасности и являются источником негативного воздействия на компоненты экосистемы и биологические виды.

3. По итогам геофизического опробования территории участка и русла реки Чагодоци выявлено неравномерное распределение смоляных отходов в понижениях рельефа на участке и в русле реки, а также присутствие смоляных толщ за границами основных участков скопления смоляных отходов, что может указывать на способность отхода к слоевым миграциям.

4. На территории участка исследований отсутствуют факторы физического воздействия (электромагнитные излучения, акустическое загрязнение, гаммафон), но стоит отметить, что значения углеводородов C1-C10 находятся на верхней границе ПДК.

ГЛАВА 3. ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ ТЕХНОГЕННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СМОЛЯНЫХ ОТХОДОВ (ПОЛИАРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ)

3.1 Исследование горючести техногенных отходов в инсинераторе

В рамках экспериментального обоснования выбора метода ликвидации техногенных отходов (смоляных озер) проводился аналитический обзор установок термической деструкции (инсинераторов) углеводсодержащих техногенных отходов. В настоящей диссертационной работе рассматривались два варианта инсинераторов разных производителей схожей мощности в разном корпусном исполнении:

- ТДУ «Фактор-2000», компании ООО «НПО «Декантер» [131];
- HURIKAN 2000 R компании ООО «Эко-Спектрум» [132].

ТДУ «Фактор-2000» выполнена на базе стандартного морского контейнера или модульных рам, тем самым упрощается транспортировка, монтаж и обслуживание технологического оборудования. Технические характеристики ТДУ «Фактор-2000», представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические характеристики ТДУ Фактор-2000

№ п/п	Характеристика	Ед. измерения	Значения
ТДУ «Фактор-2000»			
1	Потребляемая мощность (не более)	кВт	55
2	Вес	кг	2 000
3	Габариты установки в транспортном положении: 1. Модуль сжигания 2. Модуль очистки газов*	мм	1 Контейнер 40 ft HC 12192x2438x2900 2 Контейнер 20 ft 6058x2438x2896

Продолжение таблицы 3.1

№ п/п	Характеристика	Ед. измерения	Значения
ТДУ «Фактор-2000»			
4	Вид топлива	–	Газ/дизель/мазут
5	Расход топлива на две горелки: - газ; - дизель; - мазут	м ³ /ч кг/ч кг/ч	40 – 130 30 – 100 30 – 130
6	Номинальное напряжение сети	В/Гц	400/50
7	Температура в камере сжигания	С ⁰	400-900
8	Температура в камере дожига	С ⁰	До 1200
9	Температурный диапазон эксплуатации	С ⁰	От -30 до +50
10	Максимальная проходная фракция	мм	До 300*
11	Режим работы установки	час	24
12	Производительность	кг/час	200 – 4000

Для переработки отходов, содержащих высокое количество тяжелых углеводородных фракций с повышенной теплотворной способностью, сопоставимой с характеристиками сырой нефти, производитель оборудования рекомендует применять дополнительный процесс смешивания подобных отходов с инертными материалами, такими как песок или другие нейтральные компоненты. Основная цель такого подхода заключается в снижении концентрации углеводородной фазы до уровня, который исключает перегрев рабочих элементов установки и обеспечивает стабильность технологического процесса. Высокая калорийность подобных материалов может вызывать избыточное тепловыделение, что грозит нарушением термической устойчивости системы и сокращением ресурса ключевых узлов оборудования.

Контроль и регулировка подачи отходов с высоким содержанием углеводородных соединений осуществляются оператором установки. Решение о допу-

стимом количестве смешиваемых материалов принимается на основе аналитических данных, предоставляемых системой автоматизированного управления, оснащенной модулями мониторинга температуры, давления и состава газовой фазы. Процесс увеличения доли углеводородной составляющей в общем составе отходов осуществляется поэтапно, начиная с минимальных значений, обычно находящихся в диапазоне 7–10 % от общего потока. Постепенное наращивание концентрации позволяет оператору оценить поведение системы в реальном времени, исключая риски возникновения аварийных ситуаций и обеспечивая оптимальные условия для работы термического оборудования.

Такая поэтапная стратегия подачи высококалорийных техногенных отходов способствует предотвращению перегрузки теплообменных блоков и системы сжигания, одновременно повышается КПД переработки без снижения безопасности работы установки.

На рисунке 3.1 представлена зависимость производительности ТДУ «Фактор-2000» от исходной влажности материала (отхода).

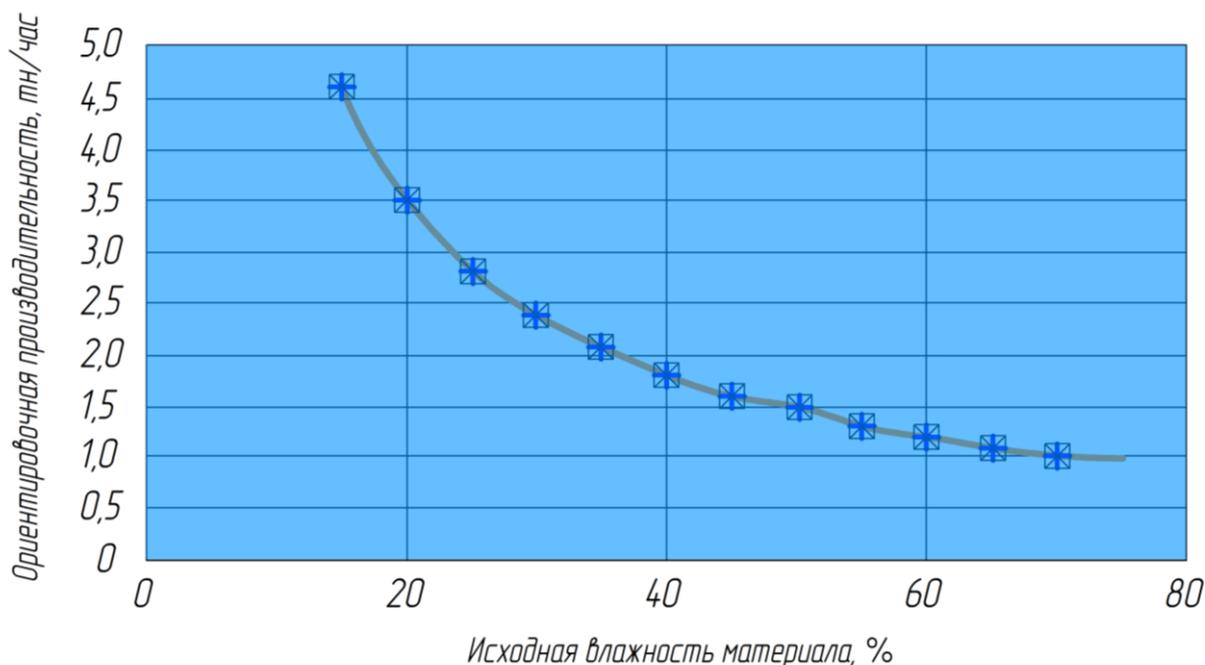


Рисунок 3.1 – Зависимость производительности от влажности материала (отхода)

Следовательно производительность ТДУ «Фактор-2000» (рисунки 3.2–3.3) напрямую зависит от исходной влажности материала (отхода), вследствие

чего требуется обязательное предварительное обезвоживание смоляных отходов до момента полного осушения, а также последующее просушивание в тепловой камере.



Рисунок 3.2 – Общий вид 1-й установки ТДУ «Фактор-2000»

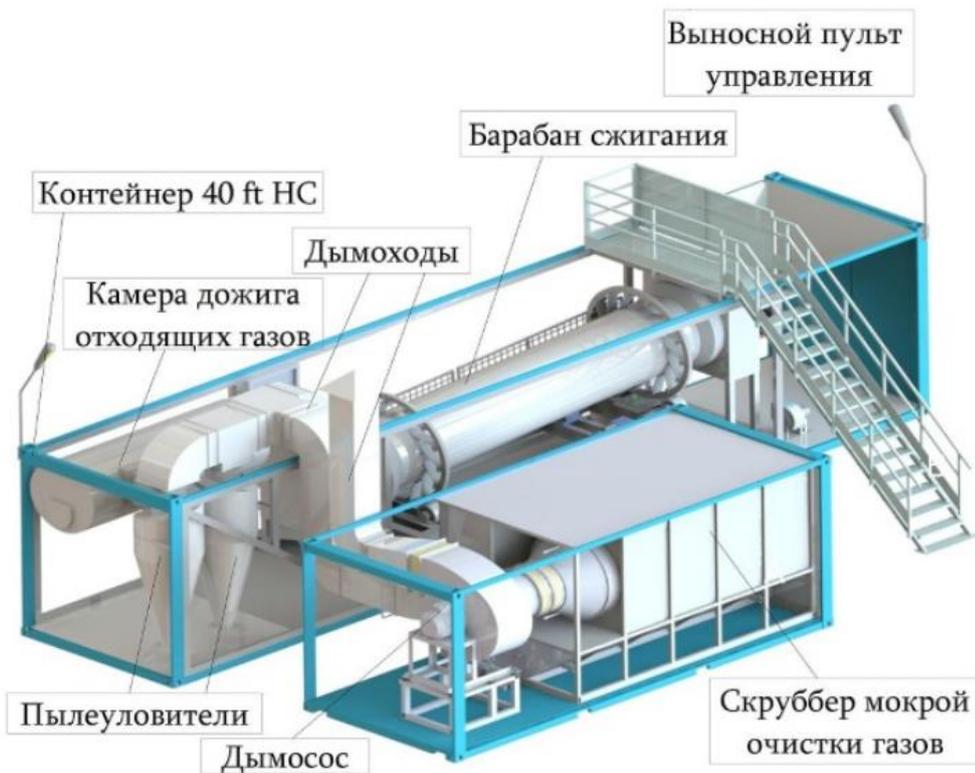


Рисунок 3.3 – Общий вид 2-й установки ТДУ «Фактор-2000»

При подготовке к экспериментальному сжиганию выбор стоял между термодеструкционной установкой HURIKAN, предложенной для эксперимента, и аналогом ТДУ «Фактор-2000». Ключевым преимуществом термодеструкционной установки HURIKAN являются её адаптивные возможности работы со смоляными отходами, не требующие этапов предварительного обезвоживания и последующего просушивания, что и обусловило выбор данной установки (рисунок 3.4) для проведения эксперимента.



Рисунок 3.4 – Общий вид установки HURIKAN 2000 R

В рамках проведённого исследования был осуществлен пробоотбор смоляных отходов. Основной целью эксперимента являлось изучение возможности утилизации и переработки данного вида отходов с использованием методов термической деструкции. В ходе полевых работ был отобран общий объём образцов массой 250 килограммов с трех смоляных озёр и прибрежной зоны очагового загрязнения. Пробы были упакованы в герметичные контейнеры (рису-

нок 3.5), что позволило сохранить исходные свойства материала при транспортировке.

После отбора пробы были направлены в г. Краснодар, где на специализированной экспериментальной установке малого объема (рисунок 3.6) проводились испытания по методам термической деструкции.



а



б

Рисунок 3.5 – Пробоотбор на малом смоляном озере:

а – пробоотбор на малом смоляном озере; б – отобранные в формовку смоляные отходы

Основная задача эксперимента заключалась в проверке эффективности процесса разложения органической составляющей отходов, а также в анализе химического состава продуктов, получаемых в ходе термического воздействия, таких как газовые выбросы, жидкие углеродистые фракции и остаточные материалы (зольный остаток). Установка с тестовым объемом позволила моделиро-

вать процесс в контролируемых условиях, что крайне важно для оценки экологических рисков и энергетической целесообразности метода.

В ходе эксперимента (рисунки 3.7–3.11) температура термической деструкции варьировалась в диапазоне от 400 до 800 °С в зависимости от состава проб. Предварительные результаты показали, что смоляные отходы обладают высоким содержанием органических соединений, пригодных для переработки, и перспективой утилизации с минимальным остаточным воздействием на окружающую среду. Однако температурный режим и параметры скорости разложения требуют дальнейшей оптимизации. Анализ газообразных продуктов показал наличие углекислого газа, угарного газа, а также углеводородных соединений, свойственных процессу пиролиза или низкотемпературного горения. Зольный остаток, извлеченный после завершения термической деструкции, был направлен на дальнейший лабораторный анализ с целью оценки класса опасности зольного остатка и возможности его применения в качестве строительного материала.



Рисунок 3.6 – Пробы смоляных отходов на промышленной площадке сжигания



Рисунок 3.7 – Контрольное взвешивание объединённой пробы перед загрузкой в камеру сгорания



Рисунок 3.8 – Загрузка объединённой пробы в камеру сгорания



Рисунок 3.9 – Подготовка к контрольным замерам выбросов вредных веществ



Рисунок 3.10 – Замер исходящих выбросов вредных веществ во время сжигания, точка Т.1



Рисунок 3.11 – Зольный остаток

Выбор термодеструкционной установки для переработки смоляных отходов обосновывается множеством ключевых факторов, включающих как технические, так и экологические аспекты. Одним из наиболее значимых преимуществ технологии термической деструкции является высокий уровень экологической безопасности на всех этапах работы оборудования. Проведённые исследования уже позволили оценить общую эффективность подхода, а также выявить ключевые технические и экологические показатели, которые станут основой для масштабирования технологии на крупнотоннажные объёмы отходов.

Технические и экологические преимущества термической деструкции.

1. Низкий объём выбросов загрязняющих веществ.

Процесс термической деструкции смоляных отходов проходит при строго контролируемых температурах (обычно в диапазоне 800–1200 °С), что обеспечивает полное разложение органических компонентов и минимизирует образование токсичных продуктов. Применение современных систем фильтрации га-

зов и очистки выхлопных потоков снижает выброс в атмосферу таких соединений, как диоксины и фураны, которые являются характерными побочными продуктами при недостаточном контроле температуры. Итоговый объем выбросов при термической деструкции смоляных отходов приведен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты измерений промышленных выбросов при термической деструкции смоляных отходов на установке HURIKAN 150

Номер точки	Определяемый показатель	Результат с характеристикой погрешности	ПДК _{м.р./ср.сут} мг/м ³
Т.1	Оксид азота, мг/м ³	72,20±10,83	≤ 200
	Диоксид азота, мг/м ³	<0,15	≤ 200
	Сажа, мг/м ³	<1,0	0,15/0,05
	Диоксид серы, мг/м ³	204,61±30,7	≤ 50
	Оксид углерода, мг/м ³	8,13±1,22	≤ 50
	Предельные Углеводороды С12-С19, мг/м ³	0,9±0,07	≤ 10
	Взвешенные вещества, мг/м ³	0,412±0,001	≤ 10
	Кислород, %	38,56±5,78	-
	Фтороводород, мг/м ³	<0,01	≤ 1
	Хлороводород, мг/м ³	1,2±0,3	≤ 10
	Бенз(а)пирен, мг/м ³	<0,000001	≤ 0,000001
	Давление (разряжение), кПа	-0,008	-
	Температура, °С	327,8	-
	Скорость воздушного потока, м/с	3,0	-
	Влажность	70,6	-

2. Образование безопасного зольного остатка IV класса опасности.

Один из ключевых результатов термической деструкции заключается в значительном уменьшении массы отходов, остающихся после процесса. Остаток после термического разложения представляет собой инертные вещества с низким содержанием токсичных компонентов, классифицируемые как отходы IV класса опасности (таблица 3.3), что подтверждено проведенным биотестированием в соответствии с Приказом МПР РФ № 536 от 04.12.2014 «Критерии отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду» [76]. Методика исследования токсических воздействий на дафний (*Daphnia magna* Straus) основывается на оценке смертности и изменений в плодовитости этих организмов при контакте с токсическими веществами, присутствующими в водной среде, по сравнению с контрольными условиями, где токсические вещества отсутствуют.

Для оценки острого токсического действия используются растворы отдельных химических веществ и исследования проводятся в течение 96 часов. Основным критерием острого токсического воздействия является процент летальности, при котором гибель 50 % и более дафний за указанный период свидетельствует о наличии токсичных свойств (ЛК50 = концентрация, вызывающая гибель 50 % организмов). В контрольной группе уровень смертности не должен превышать 10 %.

В ходе краткосрочных экспериментов методика включает определение:

- средней летальной концентрации (ЛК50) веществ, вызывающих гибель 50 % и более тест-организмов;
- безвредной концентрации (БК), при которой уровень смертности среди дафний не превышает 10 %.

Кроме того, методика предполагает исследование хронического токсического действия веществ, где оценивается долгосрочное воздействие на плодовитость дафний. Это может включать анализ изменений в репродуктивных параметрах и выживаемости на протяжении более длительных периодов воздей-

ствия токсинов, что позволяет более полно оценить влияние загрязняющих веществ на экосистему водоёмов.

Таким образом, данная методика служит важным инструментом для экотоксикологической оценки качества водной среды и определения ее влияния на биоту, в частности на дафний как индикаторный вид.

Это означает, что данный зольный остаток может быть безопасно утилизирован или использован в других отраслях, например, в качестве материала для рекультивации или строительных добавок. По сравнению с самим исходным материалом (смоляными отходами, которые часто имеют III класс опасности) результат переработки обладает существенно меньшей экологической угрозой.

Таблица 3.3 – Результаты биотестирования

Тест-объект	НД на методику испытаний	Продолжительность, час	Кратность разведения	Острое токсическое воздействие
Daphnia magna Straus	ФР 1.39.20007.03222	96	1	Отсутствует
Scenedesmus quadricauda	ФР 1.39.2007.03223	72		

Сами по себе смоляные отходы необходимо рассматривать как перспективное топливо и источник ПАУ.

Смоляные отходы по своим физико-химическим свойствам являются высококалорийным материалом, что делает их потенциальным топливным ресурсом. Благодаря высокому содержанию углерода и ПАУ отходы можно рассматривать не только как проблему, но и как технологически ценное сырьё. Термодеструкция позволяет эффективно извлекать энергию из отходов, что делает процесс экологически и экономически выгодным. Кроме того, использование вторичных продуктов, образующихся в процессе (например, конденсированных углеводов), открывает новые перспективы для использования смоляных отходов в качестве техногенного месторождения, пригодного для извлечения сырья в химической промышленности.

На текущем этапе исследований проведён анализ общей эффективности термической деструкции смоляных отходов, включая технико-экономическую оценку, качество разложения органических соединений и параметры экологической безопасности. Полученные результаты подтверждают технологическую и экологическую целесообразность данного подхода.

Ключевые технические аспекты, выявленные на этапе работ:

– оптимальные температурные режимы обеспечивают полное разложение углеродных компонентов, предотвращая образование промежуточных токсичных веществ;

– требования к системе газоочистки и улавливания мелкодисперсных частиц для минимизации вредных выбросов;

– особенности работы с отходами различной степени влажности и разработки решений для экономически эффективного обезвоживания при необходимости переработки больших объёмов.

С экологической точки зрения технология показала себя как безопасная для работы с опасными отходами аналогичного класса, что важно для соответствия жёстким регулятивным нормам.

Результаты данного исследования могут быть положены в основу следующих направлений:

1. Подготовка рекомендаций по стандартизации процесса безопасной переработки смоляных отходов и отходов аналогичного состава.

2. Создание технологий, направленных на извлечение ценных углеводов из отходов, что позволит включить переработку таких материалов в циклическую экономику.

Можно сделать вывод, что использование термодеструкционной установки не только решает проблему безопасной утилизации опасных веществ, но и создаёт возможности для эффективного ресурсного использования отходов. Совокупный эффект заключается в снижении нагрузки на окружающую среду, сокращении объёмов захоронений опасных отходов и переломе парадигмы их восприятия – отходы из экологической угрозы превращаются в источник ценных вторичных материалов.

Термодеструкционная технология и пароплазменная обработка относятся к методам обезвреживания опасных отходов, таких как промышленные смолы, нефтяные шламы и органические загрязнители. Однако эти методы имеют ключевые различия в технологических процессах, эффективности и влиянии на экологию, от чего зависят их преимущества и недостатки:

- пароплазменная технология обеспечивает более полное разрушение устойчивых загрязнителей за счёт крайне высоких температур, тогда как термодеструкция может быть менее эффективной для сложных соединений;
- пароплазменные системы экологически безопаснее, так как оставляют меньше побочных токсичных продуктов;
- однако пароплазменная технология более энергоёмкая, дорогая в эксплуатации и требует сложного оборудования, что делает термодеструкцию более подходящим выбором для простых, сравнительно легкоразрушаемых отходов.

3.2 Плазменная газификация углеродсодержащих техногенных отходов

Теплообеспечение зоны газификации углеродсодержащих материалов традиционно реализуется за счёт экзотермических реакций окисления углерода, где в качестве окислителя может выступать атмосферный воздух или технический кислород. Газификаторы с кислородным дутьём обеспечивают генерацию синтез-газа повышенной теплотворной способности за счёт отсутствия в его составе оксидов азота (NO_x). Однако энергозатраты на криогенное разделение воздуха для получения чистого кислорода сопоставимы с энергетическими потребностями самого процесса газификации, что обуславливает экономическую целесообразность применения воздушного дутья или пароводяной смеси в качестве окислителя.

Экологические и энергетические аспекты газификации:

- экологическая безопасность – полная деструкция токсичных органических соединений до экологически нейтральных компонентов (CO_2 , H_2O , элементарный углерод);

– энергоэффективность – рекуперация энергетического потенциала отходов для последующего использования в энергогенерации или химическом синтезе.

Данная технология основана на подводе тепловой энергии в реакционную зону посредством плазмообразующих газов (воздух, O_2 , H_2 , H_2O , синтез-газ, инертные газы). Конструктивное исполнение плазмотронов варьируется в зависимости от типа используемого газа, что требует разработки специализированных технических решений.

Для задач, ориентированных на производство синтез-газа, применение воздушно-азотных смесей в качестве плазмообразующей среды технологически оправдано, чтобы:

- минимизировать объём газовой фазы за счёт низкого расхода воздуха и азота;
- получать синтез-газ, пригодный для использования в энергетических установках (двигатели внутреннего сгорания, котлы ТЭС).

Энергетическая сущность газификации состоит в том, что исходную калорийность отходов накапливают в оксиде углерода и водороде, т. е. аморфное вещество смоляных отходов переводится в газообразное состояние со значительным сохранением теплотворной способности. Экологическая сущность газификации заключается в том, что сложные органические соединения, опасные для окружающей среды, переводятся в простые и безопасные, уничтожаются целые биологические комплексы. В восстановительной атмосфере водорода и оксида углерода не образуются диоксины и оксиды азоты.

Благодаря относительно малому объёму синтез-газа по сравнению с объёмом продуктов полного сгорания отходов появляется возможность уменьшить габариты (и стоимость) очистных устройств в несколько раз [146].

Проектирование технологических процессов традиционно начинают с термодинамического моделирования, которое позволяет отсеять заведомо нерабочие решения и определить граничные условия для параметров системы. Такой подход помогает задать вектор для оптимизации, направленной на дости-

жение максимально возможной скорости тепломассопереноса и реакционной кинетики в конкретных эксплуатационных рамках.

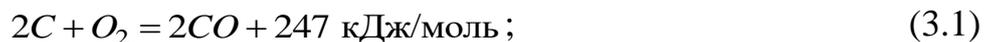
В основе термодинамического анализа лежит комбинированное применение фундаментальных законов – от первого начала, описывающего сохранение энергии, до второго, регулирующего энтропийные изменения. Для прогнозирования равновесного состава продуктов при высокотемпературной переработке тяжелых углеводородов (например, крекинге или газификации) широко используется метод химико-термодинамического моделирования. Он предполагает:

- составление стехиометрических уравнений для всех возможных реакций;
- расчёт изобарно-изотермического потенциала Гиббса (ΔG) системы;
- определение конфигурации с минимальным ΔG , соответствующей равновесному состоянию.

Этот алгоритм позволяет спрогнозировать выход целевых компонентов (водорода, метана) и оценить влияние температуры/давления на селективность процесса, что критично для масштабирования технологий от лабораторных установок до промышленных реакторов.

Поэтому для расчёта равновесных концентраций и других параметров системы были привлечены лишь две термодинамические функции индивидуальных веществ – это энтропия и полная энтальпия [146].

Основными уравнениями химических реакций при газификации смоляных отходов являются следующие уравнения:



$$K = \frac{[CO] + [H_2O]}{[CO_2] + [H_2]} = 2,5, \quad (3.4)$$

где K – константа равновесия.

Результаты моделирования показали, что наиболее подходящей системой для ликвидации смоляных отходов является система парового плазменного пи-

ролиза. Достоинства пароводяной электродуговой плазмы заключаются в следующем:

1. Состав плазмы. Пароводяная плазма состоит только из водорода и кислорода, оба компонента являются активными реагентами в окислительно-восстановительных реакциях.

2. Отсутствует азот в воздушной плазме, где его доля близка к 78 %.

3. Экстремально высокая температура. Температура плазменной струи способна разрушить любые органические и биологические материалы, гарантированно уничтожить самые токсичные яды, переплавить и испарить самые тугоплавкие неорганические соединения, значительно сократить объем отходов в целом.

4. Высокая энтальпия. Паровая плазма – ионизированное состояние водяного пара, характеризующееся высоким содержанием заряженных частиц (ионов и свободных электронов), что придаёт ей уникальные термодинамические свойства. Одной из ключевых характеристик паровой плазмы является её энтальпия – термодинамическая величина, отражающая количество энергии, содержащейся в веществе при заданной температуре и давлении, включая внутреннюю энергию и произведение давления на объем.

Для плазмы водяного пара энтальпия оказывается значительно выше (почти на порядок), чем у большинства других элементов и их газовых смесей, таких как азот (N_2), кислород (O_2) или их комбинации. Это связано с рядом фундаментальных причин:

– высокая теплота парообразования воды: при переведении воды в газообразное состояние требуется значительное количество энергии. Это определяет большой запас энергии, хранящийся в молекулах водяного пара ещё до их ионизации;

– химическая природа молекулы воды: для ионизации молекулы H_2O требуется существенное количество энергии из-за её прочных межатомных связей. Разрушение этих связей и преобразование воды в плазменное состояние сопровождается значительным изменением энтальпии;

– молекулярный состав продуктов диссоциации: в процессе нагрева водяного пара до плазменных температур его молекулы (H_2O) подвергаются диссоциации на более лёгкие компоненты – атомы водорода и кислорода. Учитывая, что водород является одним из легчайших элементов с высокой теплотой диссоциации, вклад продуктов диссоциации значительно увеличивает суммарную энтальпию плазмы.

Водород, который выделяется из воды, сам по себе обладает самой высокой энтальпией среди всех известных газов. Таким образом, по уровню энтальпии паровая плазма уступает лишь чисто водородной плазме, но превосходит азотные, кислородные и прочие газовые смеси.

Среди положительных факторов пароплазменной газификации можно отметить ряд нижеследующих характеристик:

1. Хорошие транспортные свойства водяного пара. При высокотемпературном паровом пиролизе по всему реакционному объёму устанавливается одинаковый температурный и концентрационный режим.

2. Процесс паровой плазменной газификации не чувствителен к влажности обрабатываемых отходов.

3. Взрывобезопасность. В отличие от водородной плазмы пароводяная плазма взрывобезопасна.

4. Доступное исходное сырьё. Исходным веществом служит обычная вода H_2O , отчего пароводяная плазма дешевле других видов плазмы.

5. Экологически безопасная эксплуатация. При взаимодействии с хлорсодержащими материалами пароводяная плазма практически не образует диоксины, которые являются одними из самых токсичных веществ [134]. Паровая плазма обеспечивает полное извлечение углерода из материала отходов (при температуре паровой конверсии более $900\text{ }^{\circ}C$ в системе отсутствует равновесный углерод), в то время как при всех процессах сжигания в твердом остатке присутствует до 30 % углерода.

Сравнительные характеристики возможных способов утилизации смоляных отходов представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Сравнительные характеристики возможных способов утилизации смоляных отходов

Плазменная газификация с использованием паровой плазмы	Плазменная газификация с использованием воздушной плазмы	Обычная газификация	Сжигание
Полное разрушение (2000 °С)	Полное разрушение (2000 °С)	90 % разрушение (800 °С)	70 % разрушение (650 °С)
Нет смол и фуранов	Нет смол и фуранов	Есть смолы и фураны	Много смол и фуранов
Нет золы	Нет золы	10 % золы	30 % золы
Любой вид отходов	Любой вид отходов	Кроме отдельных неорганических отходов	Кроме отдельных неорганических отходов
Не требуется сортировка отходов	Не требуется сортировка отходов	Требуется сортировка отходов	Требуется сортировка отходов
Любой объем отходов	Большой объем отходов	Малый объем отходов	Большой объем отходов
Очень малые выбросы дымовых газов	Очень малые выбросы дымовых газов	Средние выбросы дымовых газов	Значительные выбросы дымовых газов
Технология не чувствительна к влажности отходов	Технология не чувствительна к влажности отходов	Технология чувствительна к влажности отходов	Технология чувствительна к влажности отходов
Нет балластного азота, высокое качество получаемого синтез-газа	Нет балластного азота, высокое качество получаемого синтез-газа	—	—

Установка плазменной газификации оснащается высокоточным комплексом газоаналитического оборудования, обеспечивающим непрерывный мониторинг и контроль состава синтез-газа, концентрации вредных примесей и массовой концентрации твердых частиц (пыли) на ключевых этапах технологического процесса.

Первоначальный анализ состава синтез-газа осуществляется сразу после реактора плазмохимической паровой конверсии, где оцениваются концентрации основных газофазных соединений (H_2 , CO, CO_2 , CH_4 и других углеводородов) и побочных продуктов реакции. Это позволяет определить эффективность функциональных процессов плазмохимического преобразования и обеспечить их корректное управление.

На следующем технологическом этапе – после камеры плазменного дожигания и выдержки синтез-газа – измеряются параметры, характеризующие уровень доокисления остаточных продуктов органической природы и термическое разложение сложных соединений. Здесь газоаналитическая система фиксирует содержание остаточного кислорода (O_2), оксидов углерода (CO, CO_2), а также вредных компонентов, таких как диоксины, фураны или оксиды азота (NO_x), измерение оптической плотности пылегазовой среды и вычисление массовой концентрации взвешенных частиц (пыли), отображение измеренных концентраций и последующая передача информации о текущих значениях на цифровую систему управления установкой плазменной газификации. Особое внимание уделяется контролю концентраций потенциально токсичных соединений, что важно для предотвращения экологических рисков.

После прохождения системы очистки синтез-газа, включающей фильтрацию, скрубберы и/или адсорбционные модули, осуществляется контроль степени удаления примесей (серосодержащих соединений, хлороводорода, аммиака, сажи и других). На данном этапе газоаналитическое оборудование позволяет оценить эффективность процессов очистки и соответствие параметров синтез-газа требованиям безопасности и экологическим нормативам.

При наличии блока производства электрической и тепловой энергии (опционально) газоаналитическая система контролирует состав и параметры синтез-газа, поступающего в энергетические модули (например, газотурбинные или двигатели внутреннего сгорания), а также выходные продукты сгорания. Это включает анализ концентраций оксидов углерода, азота, серы и частиц золы после реакции, что обеспечивает контроль за корректностью процессов энергообразования и минимизацию выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Комплексный газоаналитический мониторинг на всех этапах функционирования установки позволяет оперативно вносить корректировки в технологический процесс, обеспечивая его стабильность, высокий КПД и экологическую безопасность.

Установка плазменной газификации оснащается современным комплектом газоаналитического оборудования, предназначенным для контроля состава синтез-газа, концентрации вредных веществ и массовой концентрации пыли в технологическом газе после реактора плазмохимической паровой конверсии, после камеры плазменного дожигания и выдержки синтез-газа, после системы очистки синтез-газа и после блока производства электрической и тепловой энергии (опционально).

Функции комплекта газоаналитического оборудования плазменной системы заключаются в следующем:

- отбор и транспортирование пробы из точек отбора (после реактора плазменной газификации, камеры плазменного дожигания и выдержки, системы очистки синтез-газа и блока производства электрической энергии) в шкаф с газоаналитическим оборудованием, расположенным в комнате управления;
- подготовка проб (охлаждение, фильтрация, удаление влаги, нормализация расхода); измерение концентраций CO , CO_2 , H_2 , O_2 , N_2 , NO_2 , NO , CH_4 ;
- измерение оптической плотности пылегазовой среды и вычисление массовой концентрации взвешенных частиц (пыли);

– отображение измеренных концентраций и последующая передача информации о текущих значениях на цифровую систему управления установкой плазменной газификации.

3.3 Обоснование выбора установки плазменной газификации

Установка плазменной газификации и уничтожения отходов «ПЛАЗА-РИУМ MGS» (рисунок 3.12) обладает рядом принципиальных преимуществ, которые определяют её выбор в процессе утилизации ПАУ и других видов опасных отходов. Среди ключевых характеристик, влияющих на эффективность и универсальность данной технологии, выделяются [130]:

– мобильная и модульная конструкция установки, обеспечивающая её оперативное развертывание и адаптацию под различные условия эксплуатации. Это позволяет использовать установку как в стационарных, так и в полевых условиях, минимизируя логистические затраты и потребность в специальной инфраструктуре для установки;

– простота в монтаже и эксплуатации, а также высокая степень безопасности. Обеспечиваются благодаря отсутствию прямого контакта оператора с обрабатываемыми отходами. Вся подача сырья и управление процессом осуществляются через полностью герметизированные системы, что исключает риск воздействия токсичных или канцерогенных соединений на персонал;

– отсутствие строгих требований к предварительной подготовке отходов, включая сортировку, сушку и измельчение. Это делает установку универсальной и позволяет перерабатывать широкий спектр отходов с различным физико-химическим составом;

– экологическая безопасность в процессе работы установки. Достигается благодаря отсутствию образования балластного азота, а также диоксидов азота (NO_2) и других оксидов азота (NO_x), что позволяет минимизировать экологическое воздействие;

– автоматизация всех стадий технологического процесса уничтожения отходов, включая управление плазменными процессами и мониторинг темпера-

турных, химических и физических параметров. Это снижает вероятность ошибок оператора, повышая точность и стабильность процессов утилизации;

– расширенные условия эксплуатации: установка адаптирована для работы в экстремальных климатических условиях, (диапазон от -60°C до $+50^{\circ}\text{C}$) и при высокой влажности. Возможность функционирования под открытым небом делает её подходящей для использования в отдалённых и климатически сложных регионах;

– высокая степень экологической эффективности установки, обеспечивающая разрушение 99,99 % перерабатываемых веществ, включая токсичные соединения (смолы, диоксины и фураны). Благодаря этим показателям достигается полное предотвращение выбросов опасных веществ в окружающую среду;

– производство чистого синтез-газа ($\text{CO} + \text{H}_2$) на выходе, который может быть использован в энергетике, промышленности или других технологических процессах. Высокое качество газа гарантируется наличием плазменной камеры дожигания и системы выдержки продукта, что позволяет устранить оставшиеся вредные компоненты;

– соответствие предельно допустимым выбросам (ПДВ) согласно действующим нормам ГОСТ и директивам Евросоюза. Это подтверждает экологическую безопасность установки при её работе в различных странах;

– возможность эксплуатации установки непосредственно в местах сбора, хранения или образования отходов. Это исключает необходимость транспортировки опасных материалов, снижая риски утечек или инцидентов в процессе логистики.

Плазменный реактор установки MGS является инновационной основой технологического процесса. Посредством автоматического контроля всех параметров в различных участках реактора и регулирования мощности плазмотронов достигается максимальная степень деструкции исходного сырья. Это включает полное разложение токсичных веществ, таких как ПАУ, с минимальным остаточным экологическим воздействием. Кроме того, наличие камеры плазменного крекинга и системы стабилизации синтез-газа гарантирует разрушение

сложных органических молекул, обеспечивая стабильность состава конечного продукта [130].

Технологическое оснащение включает герметичные шлюзовые механизмы подачи отходов, позволяющие дозировать количество и скорость загрузки твердых и жидких отходов. Аналитическая система, интегрированная в установку, обеспечивает постоянный мониторинг концентрации вредных веществ, состава синтез-газа, уровней пыли и иных загрязнений на всех стадиях технологического цикла, включая очистку, охлаждение, сжатие и подачу синтез-газа.

Энергоснабжение установки предусмотрено от внешних сетей электропитания (промышленная трехфазная сеть 380/400 В, 50/60 Гц) с возможностью работы по замкнутому циклу, при котором энергия, вырабатываемая из синтез-газа, используется для поддержания работы установки. Также предусмотрена система бесперебойного электропитания, обеспечивающая работу управления даже при потере внешнего источника питания.



Рисунок 3.12 – Мобильная установка плазменной газификации и уничтожения отходов «ПЛАЗАРИУМ MGS»

Таким образом, установка «ПЛАЗАРИУМ MGS» представляет собой высокоэффективную и экологически безопасную технологическую платформу для уничтожения ПАУ и других опасных отходов, демонстрируя универсальность, надежность и соответствие высоким мировым стандартам.

Взрывобезопасность и пожаробезопасность установки обеспечивается соблюдением норм и правил руководства, наличием взрывобезопасных клапанов

и автоматических систем подачи азота с возможностью ручного управления, постоянным контролем состава производимого синтез-газа, исключением образования взрывоопасных сред и выбором комплектующих во взрывобезопасном исполнении, непосредственно расположенных в потенциально опасных зонах. Также выбором конструкционных, уплотнительных и теплоизоляционных материалов, используемых для изготовления установки, исходя из условий их взрывопожаробезопасной работы при штатных и аварийных режимах работы.

3.4 Обоснование и выбор технологии и технических средств разработки смоляных озер как техногенных месторождений

Смоляное озеро вскрывается наклонной траншеей внешнего заложения с оставлением грунтового целика. Траншея располагается между смоляными озерами, направление с юга на север. Расположение траншеи обусловлено рельефом и технологией отработки отходов. Траншея проходится экскаватором HITACHI ZX330 с погрузкой в автосамосвалы КАМАЗ-65115-48 при тупиковой схеме подачи.

Глубина траншеи обусловлена мощностью слоя отходов. Глубина траншеи $H_t = 3$ м. Ширина основания траншеи рассчитывается по параметрам технологии ее проходки. Ширина траншеи при тупиковой схеме подачи автотранспорта определяется по формуле:

$$B_t = R_a + 0,5(L_a + B_a) + 2C \text{ м}, \quad (3.5)$$

где R_a – радиус разворота автосамосвала, м;

L_a – длина автосамосвала, м;

B_a – ширина автосамосвала, м;

C – зазор между автосамосвалом и бортом траншеи, м.

$$B_t = 10 + 0,5(7 + 2,6) + 2 \cdot 3 = 21 \text{ м}.$$

Длина траншеи определяется ее продольным уклоном при достижении глубины с использованием автомобильного транспорта ($i = 90 \text{ ‰}$).

Длина траншеи определяется по формуле:

$$L_t = \frac{1000H_t}{i} \text{ м.} \quad (3.6)$$

$$L_t = \frac{1000 \cdot 3}{90} = 34 \text{ м.}$$

Объем траншеи определяются по следующей формуле:

$$V_t = \frac{L_t H_t B_t}{2} + 2 \frac{H_t G_t L_t}{6} + \frac{H_t G_t B_t}{2} + \frac{G_t^2 H_t}{2} \text{ м}^3, \quad (3.7)$$

где $G_t = \frac{H_t}{\operatorname{tg} \alpha}$;

α – угол откоса борта траншеи, градусы.

При $\alpha = 60^\circ$ $G_t = \frac{3}{\operatorname{tg} 60} = 1,735$ м, получим, что

$$V_t = \frac{34 \cdot 3 \cdot 21}{2} + 2 \frac{3 \cdot 1,735 \cdot 34}{6} + \frac{3 \cdot 1,735 \cdot 21}{2} + 2 \frac{(1,735)^2 \cdot 3}{2} = 1187,65 \text{ м}^3.$$

Выемочно-погрузочные работы на смоляном озере. Годовой объем извлечения отходов определяется исходя из возможностей установки плазменного сжигания. Установка плазменного сжигания при полной загрузке может переработать 25 т отходов в сутки, т. е. в год 9125 т или 8295,5 м³ отходов.

В качестве выемочного оборудования предлагается использовать экскаватор НІТАСНІ ZX330 – обратная лопата с емкостью ковша 1,15 м³. Выбор оборудования обусловлен вязкостью отходов и небольшой высотой уступа ($h = 3$ м).

Экскавацию смоляных отходов предлагается производить в теплое время года (130 дней в году) в одну смену (8 часов – светлое время суток).

Горизонтом установки экскаватора является подошва смоляных отходов. Отходы обрабатываются боковым забоем с погрузкой в автосамосвалы на уровне стояния экскаватора. Схема подачи автосамосвала тупиковая.

Ширина заходки экскаватора определяется его радиусом копания (на уровне стоянки), и в данном случае составляет 1-1,5 R_c .

Учитывая, что $R_c = 10,89$ м, принимаем ширину заходки $B_z = 12$ м.

Ширина рабочей площадки складывается из ширины заходки (А), расстояния от нижней бровки уступа до транспортной полосы (С) и ширины транспортной полосы (Р).

Ширина рабочей площадки определяется по формуле:

$$B_{rp} = A + C + P \text{ м.} \quad (3.8)$$

$$B_{rp} = 12 + 1 + 5 + 18 \text{ м.}$$

Угол откоса уступа целесообразно принять равным 60° .

Расчет производительности экскаватора. Годовой объем извлечения смоляных отходов составляет $V = 8295,5 \text{ м}^3$. Емкость ковша экскаватора Hitachi ZX330: $E = 1,15 \text{ м}^3$. Продолжительность рабочего цикла экскаватора Hitachi ZX330: $t_c = 15 \text{ с}$. Число рабочих дней экскаватора в году: $N = 130$. Число рабочих смен в сутки $n = 1$. Продолжительность смены: $T = 8 \text{ ч}$. Коэффициент наполнения ковша: $k_n = 1,1$. Коэффициент разрыхления породы в ковше: $k_r = 1,1$. Коэффициент забоя, учитывающий влияние вспомогательных операций: $k_z = 0,85$. Коэффициент использования экскаватора во времени, зависящий от типа применяемого оборудования в смежных технологических процессах, организации производства и других факторов: $k_{ic} = 0,55$.

Расчет часовой технической производительности экскаватора Hitachi ZX330 осуществляется по формуле:

$$Q_t = \frac{3600Ek_nk_z}{t_ck_r} \text{ м}^3. \quad (3.9)$$

$$Q_t = \frac{3600 \cdot 1,15 \cdot 1,1 \cdot 0,85}{15 \cdot 1,1} = 234,6 \text{ м}^3.$$

Расчет сменной эксплуатационной производительности экскаватора Hitachi ZX330 осуществляется по формуле:

$$Q_{ism} = Q_t T k_{ic} \text{ м}^3. \quad (3.10)$$

$$Q_{ism} = 234,6 \cdot 8 \cdot 0,55 = 1032 \text{ м}^3.$$

Расчет годовой эксплуатационной производительности экскаватора Hitachi ZX330 осуществляется по формуле:

$$Q_{ig} = Q_{ism} N n \text{ м}^3. \quad (3.11)$$

$$Q_{ig} = 1032 \cdot 130 \cdot 1 = 134160 \text{ м}^3.$$

Количество экскаваторов для выполнения вскрышных и подготовительных работ определяется по формуле:

$$N_{ec} = \frac{V}{Q_{tg}}. \quad (3.12)$$

$$N_{ec} = \frac{8295,5}{134160} = 0,062.$$

Следовательно, для выполнения вскрышных и подготовительных работ достаточно одного экскаватора Hitachi ZX330.

Для выполаживания откосов уступов, планировки отработанных пространств смоляных озер и подъездных путей планируется к использованию бульдозер ЧТЗ Б10М.

Паспорт выемочно-погрузочных работ представлен на рисунке 3.13.

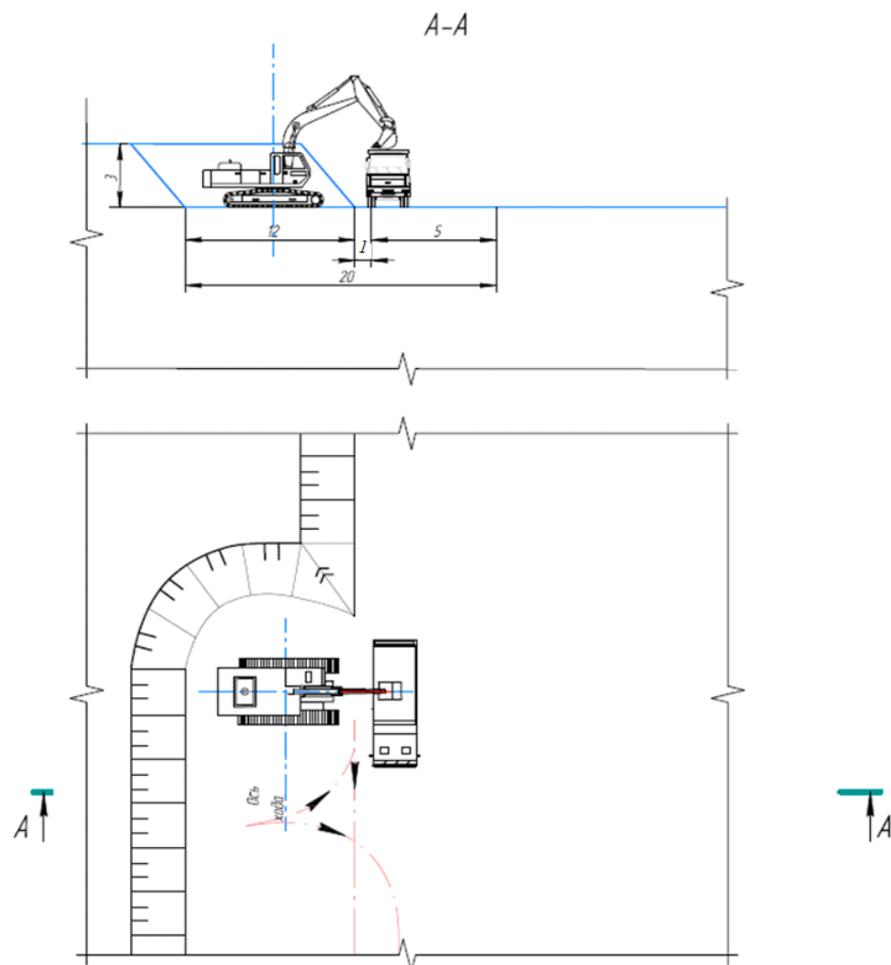


Рисунок 3.13 – Паспорт выемочно-погрузочных работ

Транспортирование смоляных отходов. Транспортирование отходов производится из забоя экскаватора до временного склада промышленной площадки на расстояние около 700 м. Алгоритм выбора автосамосвалов реализован следующим образом. Исходные данные: емкость ковша экскаватора Hitachi ZX330 $E = 1,15 \text{ м}^3$; коэффициент наполнения ковша $k_n = 1,1$; коэффициент разрыхления породы в ковше $k_r = 1,1$; коэффициент уплотнения отходов при погрузке в автосамосвал $k_u = 0,94$; плотность смоляных отходов $\gamma = 1,1 \text{ т/м}^3$; грузоподъемность самосвала $Q = 15 \text{ т}$; емкость кузова $V_k = 10 \text{ м}^3$.

Расчет массы отходов в ковше производится по формуле:

$$q_w = \frac{Ek_n\gamma}{k_r} \text{ т.} \quad (3.13)$$

$$q_w = \frac{1,15 \cdot 1,1 \cdot 1,1}{1,1} = 1,265 \text{ т.}$$

Расчет объема отходов в ковше производится по формуле:

$$v_w = Ek_n k_u \text{ м}^3. \quad (3.14)$$

$$v_w = 1,15 \cdot 1,1 \cdot 0,94 = 1,189 \text{ м}^3.$$

Число ковшей экскаватора, необходимое для загрузки кузова по грузоподъемности, определяется по формуле:

$$n_k^* = \frac{Q}{q_w}. \quad (3.15)$$

$$n_k^* = \frac{15}{1,265} = 11,858.$$

Выделяем целую часть параметра n_k^* и получаем $N_k^* = 11$.

Число ковшей экскаватора, необходимое для загрузки кузова по емкости, определяется по формуле:

$$n_k^{**} = \frac{V_k}{v_w}. \quad (3.16)$$

$$n_k^{**} = \frac{10}{1,189} = 8,41.$$

Выделяем целую часть параметра n_k^{**} и получаем $N_k^{**} = 8$.

Масса отходов в кузове автосамосвала определяется по формуле:

$$Q_w = N_k^{**} q_w \text{ т.} \quad (3.17)$$

$$Q_w = 8 \cdot 1,265 = 10,12 \text{ т.}$$

Объем отходов в кузове автосамосвала определяется по формуле:

$$V_w = N_k^{**} v_w \text{ м}^3. \quad (3.18)$$

$$V_w = 8 \cdot 1,189 = 9,512 \text{ м}^3.$$

Коэффициент использования грузоподъемности автосамосвала определяется по формуле:

$$K_z = \frac{Q_w}{Q}. \quad (3.19)$$

$$K_z = \frac{10,12}{15} = 0,675.$$

Коэффициент использования емкости кузова автосамосвала определяется по формуле:

$$K_E = \frac{V_w}{V_k}. \quad (3.20)$$

$$K_E = \frac{9,512}{10} = 0,951.$$

Расчет продолжительности транспортного цикла. Исходные данные: продолжительность рабочего цикла экскаватора Hitachi ZX330 $t_c = 15$ с; число ковшей экскаватора, необходимое для загрузки кузова по емкости, $N_k^{**} = 8$; продолжительность подъезда автосамосвала к месту погрузки $t_{pod} = 15$ с; продолжительность разгрузки автосамосвала $t_{rg} = 60$ с; продолжительность маневров, ожидания и задержек автосамосвала за рейс $t_m = 180$ с; количество перемен движения $n = 2$; длины участков пути с одинаковыми условиями движения с грузом $L_g = 0,6$ км; длины участков пути с одинаковыми условиями движения без груза $L_p = 0,6$ км; скорость движения автосамосвала с грузом $v_g = 20$ км/ч; скорость движения автосамосвала без груза $v_p = 10$ км/ч; время переключения

передач $t_{per} = 6$ с; коэффициент использования сменного времени на работе $k_i = 0,9$; часовая техническая производительность экскаватора Hitachi ZX330 $Q_t = 234,6$ м³.

Расчет продолжительности загрузки автосамосвала:

$$t_z = N_k^{**} t_c + t_{pod} \text{ с.} \quad (3.21)$$

$$t_z = 8 \cdot 15 + 15 = 135 \text{ с.}$$

Расчет продолжительности движения автосамосвала:

$$t_{dv} = 3600 \sum L_g / v_g + 3600 \sum L_p / v_p + t_{per} (n - 1) \text{ с.} \quad (3.22)$$

$$t_{dv} = 3600 \sum 0,6 / 20 + 3600 \sum 0,6 / 10 + 6(2 - 1) = 330 \text{ с.}$$

Расчет технической продолжительности транспортного цикла:

$$t_p = t_z + t_{rg} + t_m + t_{dv} \text{ с.} \quad (3.23)$$

$$t_p = 135 + 60 + 180 + 330 = 705 \text{ с.}$$

Расчет эксплуатационной производительности автосамосвала:

$$P_a = \frac{3600 V_w}{t_p} k_i \text{ м}^3/\text{ч.} \quad (3.24)$$

$$P_a = \frac{3600 \cdot 9,512 \cdot 0,9}{705} = 43,715 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Расчет количества автосамосвалов, необходимых для обслуживания экскаватора:

$$N_a = \frac{Q_t}{P_a} \text{ .} \quad (3.25)$$

$$N_a = \frac{234,6}{43,715} = 5,366.$$

Таким образом, достаточно 5 автосамосвалов для обслуживания экскаватора.

Выемка и транспортирование отходов из реки. Для очистки реки, учитывая состав отходов, их расположение и характеристики русла реки, выбираем экскаватор HITACHI ZX330, установлен на понтонах ПП33. Понтоны позволяют экскаватору передвигаться как по берегу, так и по воде. Плавающие экскаваторы

оснащены дополнительными понтонами и заколами для работы на открытой воде. Благодаря дополнительным понтонам и удлиненной стреле экскаватор амфибия может вести работы с открытой поверхности воды до глубины 9 м и с глубиной копания 12,5 м. Паспорт выемочно-погрузочных работ на реке Чагодоце представлен на рисунке 3.14.

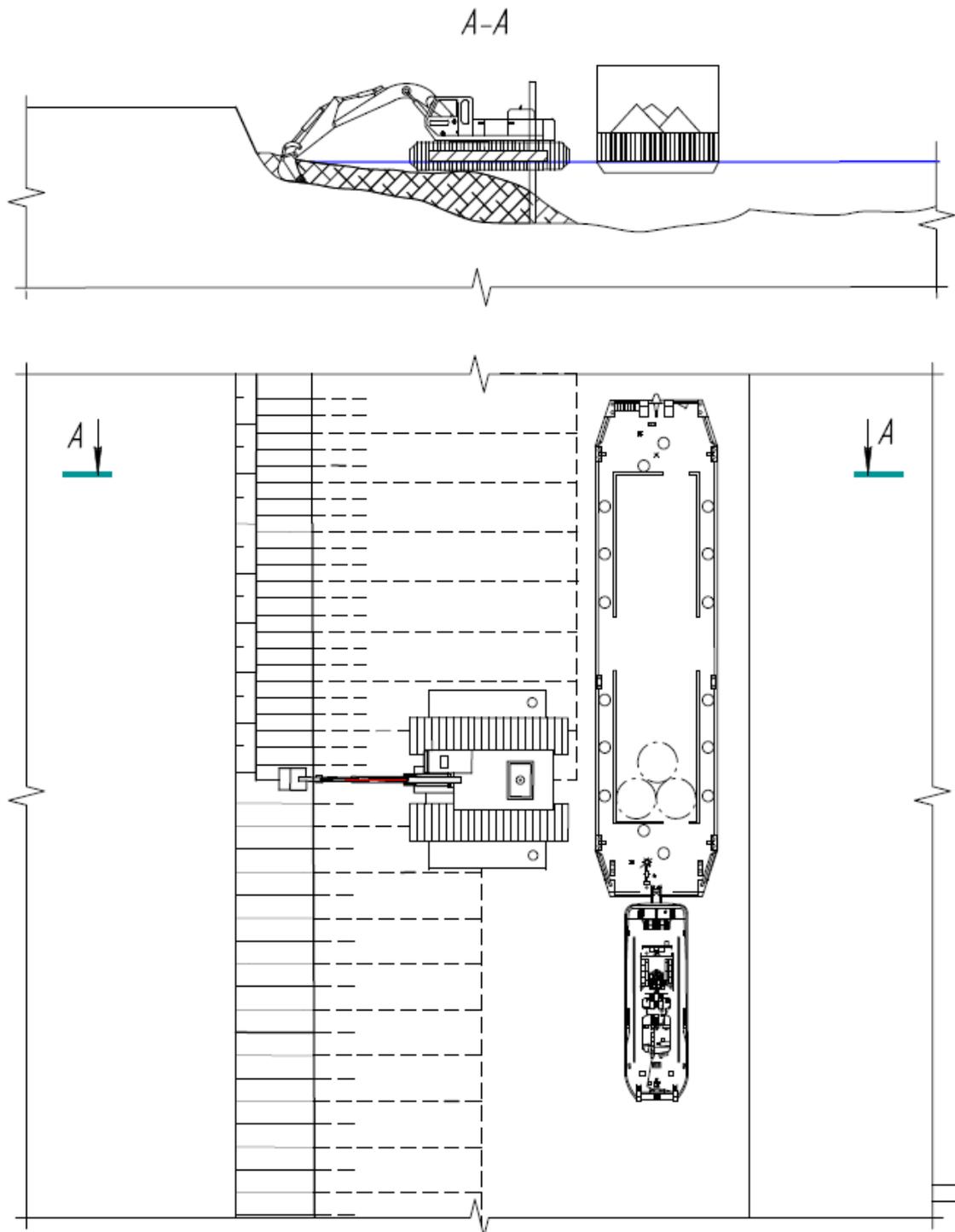


Рисунок 3.14 – Паспорт выемочно-погрузочных работ на реке Чагодоце

При необходимости подготовки отходов к экскавации ковш экскаватора заменяется на однозубый рыхлитель.

Погрузка отходов производится в баржу-площадку (Пр-60) грузоподъемностью 60 т. Транспортировка баржи осуществляется буксиром-толкачом (проект 092).

Физико-механические свойства загрязнителя (смоляные отходы) обусловили необходимость устройства заграждающих конструкций на водном объекте (рисунок 3.15).



Рисунок 3.15 – Заградительный бон

Применение заградительных бонов в данном случае обусловлено необходимостью обеспечения безопасности и предотвращения распространения загрязняющих веществ, которое может возникнуть ввиду образующейся слоевой миграции смоляных отходов в результате механического воздействия ковша экскаватора НІТАСНІ ZX330. При проведении работ такого типа механическое воздействие создает возмущение почвы и водной среды, что приводит к высвобождению загрязняющих веществ, представляющих угрозу экосистеме. Заградительные боны выполняют функцию физического барьера, предотвращая дальнейшее распространение смоляных отходов на водной поверхности и локализуя загрязнение в пределах зоны работ.

Работы проводятся в непосредственной близости от магистрального газопровода, принадлежащего АО «Газпром газораспределение Вологда», что накладывает строгую необходимость соблюдения требований Технического регламента «О безопасности сетей газораспределения и газопотребления», правил «Охраны газораспределительных сетей» № 878, утвержденных Постановлением Правительства РФ от 20.11.2000, а также СП 62.13330. Наличие объектов повышенной опасности, таких как магистральный газопровод, требует строгого соблюдения нормативов, исключения потенциальных аварийных ситуаций, а также минимизации технических и экологических рисков.

Заградительные боновые сооружения устанавливаются в специально выбранных местах ниже по течению от участка проведения работ по разработке смоляных отходов в русле реки. Конкретное расстояние от зоны выполнения работ до местоположения установки бонов определяется комплексом факторов, включающих скорость течения реки, рельеф береговой линии, а также гидрологические и геоморфологические параметры водного объекта. Точная оценка указанных характеристик обеспечивает высокую эффективность локализации загрязняющих веществ с минимальным воздействием на окружающую среду.

При выборе оптимального места для установки боновых заграждений были учтены и проанализированы перечисленные факторы, а также оценивалось обеспечения доступа к месту для специализированной техники и вспомогательного оборудования. Необходимость наличия ровной и устойчивой площадки обусловлена потребностью в размещении оборудования для сбора загрязненных масс, резервуаров временного хранения нефтепродуктов и оперативного выполнения работ. Правильная оценка размещения и логистической доступности площадки значительно увеличивает общую эффективность мероприятий по локализации и очистке нефтяных загрязнений.

Место расположения боновых заграждений определяется совокупностью следующих факторов, представленных на рисунке 3.16, среди которых главными являются:

- расстояние до временной площадки для хранения и последующей утилизации загрязняющих веществ, таких как смоляные отходы;
- минимальная скорость течения в данной зоне, что снижает вероятность прорыва или затопления заграждения, и наличие достаточной глубины для предотвращения значительного прогиба боновой линии;
- оптимальная защита от механического воздействия потоков воды или гидравлического напора.

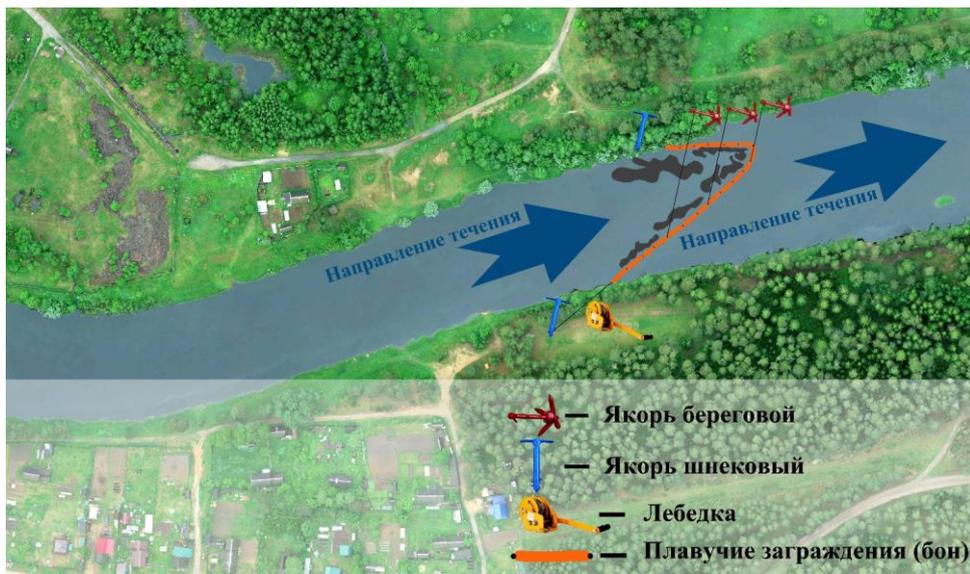


Рисунок 3.16 – Схема расположения заградительных бонов при отработке смоляных отходов в русле реки

Монтаж и фиксация боновых заграждений осуществляется с использованием специализированных вспомогательных устройств и технологий, обеспечивающих их стабильное положение и работоспособность в различных гидродинамических условиях. Основными компонентами монтажного оборудования являются:

- специальные якорные системы, обеспечивающие фиксацию бонов и предотвращающие смещение заграждений под воздействием течения или механических нагрузок;

– прочные канаты, лебедки и траловые устройства, которые необходимы для обеспечения монтажных операций и регулировки положения бонового заграждения;

– плавсредства, такие как моторные лодки, катера или баржи, необходимые для транспортировки и укладки бонов, а также для контроля их установки в сложных участках водоема.

Применение вышеуказанных вспомогательных средств позволяет не только точно установить боновые заграждения, но и минимизировать прогиб их дуги, что крайне важно для обеспечения равномерного и эффективного перекрытия водоема. Нежелательный прогиб, вызванный, например, сильным течением или неправильной фиксацией, может нарушить герметичность системы и снизить эффективность локализации загрязняющих элементов. Для предотвращения таких ситуаций вся конструкция предварительно проходит проверку на устойчивость к гидродинамическим нагрузкам с учетом местных условий.

Разгрузка пришвартованной баржи-площадки с опущенной аппарелью производится экскаватором HITACHI ZX330. Отходы из баржи-площадки перегружаются в автосамосвалы КАМАЗ-65115-48. Экскаватор HITACHI ZX330 на понтонах ПП33, баржа-площадка Пр-60 и буксир толкач работают в теплое время года (130 дней в году) в одну смену (светлое время суток).

Работы на промышленной площадке. На промышленной площадке организуется временный склад отходов, равный по объему годовой производительности установки плазменного сжигания (8295,5 м³).

Вблизи от склада располагается установка плазменного сжигания. Погрузка отходов в установку осуществляется электрическим фронтальным погрузчиком. Для круглосуточной работы установки предлагается использовать два погрузчика (один работает, другой заряжается).

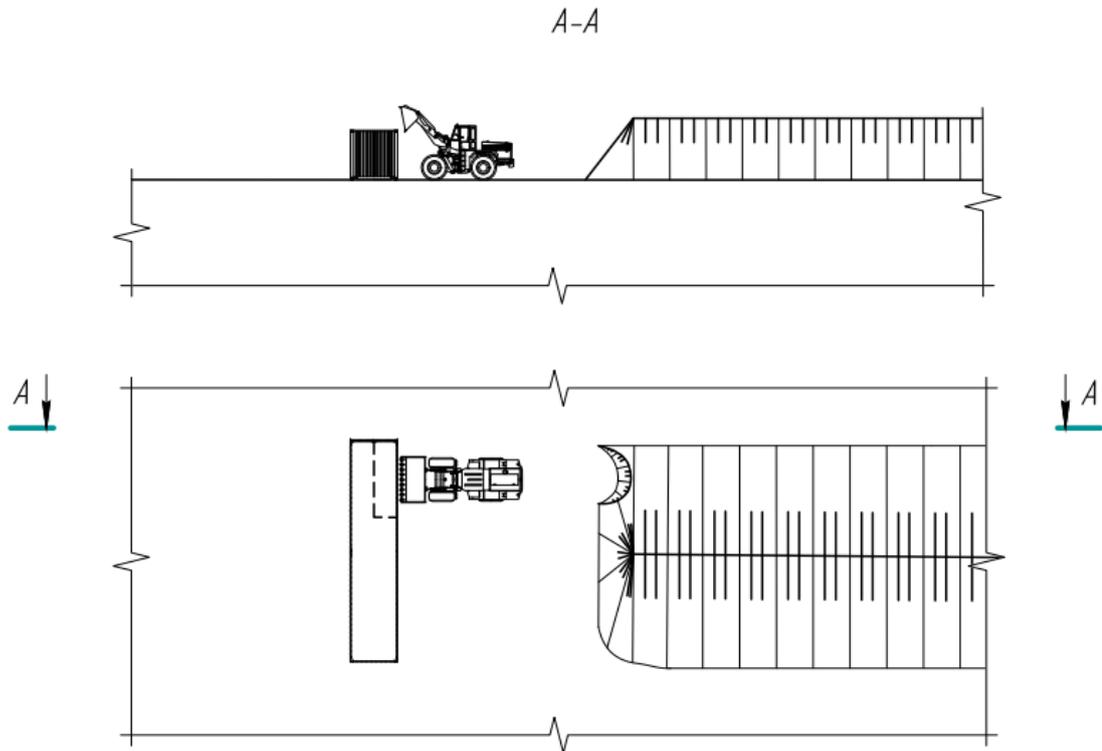


Рисунок 3.17 – Работы на промышленной площадке

Для рыхления отходов в зимнее время используется экскаватор HITACHI ZX330, оснащенный однозубым рыхлителем (рисунок 3.17).

Выводы

1. Анализ термодеструкционных установок показал, что производительность уменьшается с ростом влажности. На начальных этапах, при влажности до 20 %, производительность находится на уровне около 4,5–5 т/ч, но по мере увеличения влажности материала она плавно снижается. Наблюдается сильное снижение после превышения уровня влажности в 20 %. В диапазоне от 20 % до 40 % производительность падает примерно в два раза – с 4 т/ч до 2 т/ч, что указывает на значительное влияние влажности на эффективность работы установки. При высоких уровнях влажности, от 60 % до 80 % и выше, производительность становится минимальной. При влажности порядка 70 % производительность стабилизируется на уровне менее 1 т/ч, что свидетельствует о критиче-

ском снижении эффективности при обработке сильно увлажнённых материалов.

2. Выбор установки пароплазменной газификации обоснован отсутствием требований к исходной влажности материала и не сказывается на скорости ликвидации отхода данным способом в то время, как для других установок требуется предварительная подготовка отхода с предварительным обезвоживанием.

3. Ликвидация смоляных отходов методом пароплазменной газификации позволит значительно снизить выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ, что подтверждено проведенным экспериментом, на более упрощенном варианте термической деструкции.

4. Работы по отработке техногенного месторождения рационально проводить по типу открытых горных работ с разработкой одноковшовым экскаватором с погрузкой в автотранспорт и последующим перемещением техногенных отходов на промышленную площадку утилизации.

5. Зольный остаток от техногенных отходов является нетоксичным, относится к IV классу опасности и может быть использован для обратной засыпки.

6. Месторасположение промышленной площадки газификации техногенных отходов необходимо выбирать по результатам проведенных расчетов рассеивания и построения карт приземных концентраций.

ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ФАКТОРОВ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОМПОНЕНТЫ ЭКОСИСТЕМЫ В ПЕРИОД ОСОБОЕНИЯ ТЕХНОГЕННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАУ

4.1 Миграция токсичных компонентов в почве и подстилающих породах с поверхности, прилегающей к смоляным озерам

Вертикальная миграция загрязнителя в почву и далее в подстилающие породы удовлетворительно описывается одномерным уравнением конвективной диффузии с учетом кинетики сорбции загрязнителя твердой фазой почв и подстилающих пород. В данном случае целесообразно рассматривать полубесконечное пространство. Расчетная схема миграции токсичных компонентов в почву и подстилающие породы с поверхности смолы представлена на рисунке 4.1. Уравнение миграции загрязнителя имеет следующий вид:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + w \frac{\partial c}{\partial z} = D_s \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - Kc, \quad (4.1)$$

где $c(z, t)$ – концентрация загрязнителя в горных породах;

w – средняя скорость фильтрации почвенного раствора;

D_s – коэффициент диффузии загрязнителя;

K – константа скорости сорбции загрязнителя горными породами.

В силу многообразия условий формирования и трансформации смоляных озер поступление стоков на прилегающие территории происходит вследствие стекания обогащенных загрязнителями атмосферных осадков, растекания и инфильтрации стоков на горизонтальных участках рельефа. Степень опасности данного явления для здоровья населения определяется вероятностью поступления поллютантов непосредственно в организм человека или вовлечения их в трофические цепи.

Таким образом, для обеспечения безопасности населения, проживающего на территории п. Чагоды, и предотвращения деградации почв необходимо прогнозировать масштабы и интенсивность загрязнения окружающей среды ток-

сичными веществами. Загрязнение окружающей среды смоляными отходами включает вертикальную миграцию фильтрата с поверхности смолы в почву и подстилающие горные породы.

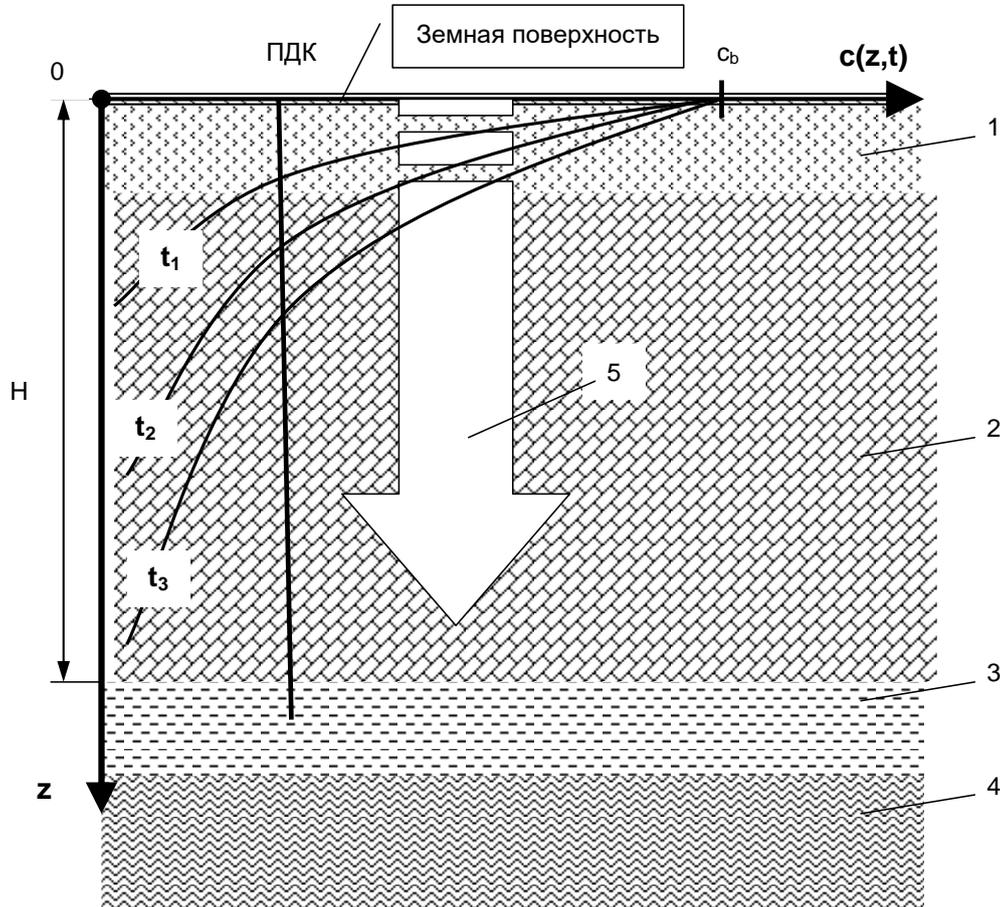


Рисунок 4.1 – Расчетная схема миграции загрязнителей с земной поверхностью, прилегающей к смоляным озерам, в почву и подстилающие породы:

- 1 – почвенный слой; 2 – подстилающие породы; 3 – водоносный горизонт;
4 – водонепроницаемые породы; 5 – фильтрационно-диффузионный поток загрязнителя

Начальное условие:

$$c(z,0) = c_0 = \text{const.} \quad (4.2)$$

Граничные условия:

$$c(0,t) = c_b = \text{const}, \quad \lim_{z \rightarrow \infty} c \neq \infty. \quad (4.3)$$

Используя преобразование Лапласа, уравнение (4.1) можно записать следующим образом:

$$\frac{d^2 c_L}{dx^2} - \frac{w}{D_s} \frac{dc_L}{dx} - \frac{(s+K)}{D_s} \left(c_L - \frac{c_0}{s+K} \right) = 0, \quad (4.4)$$

где c_L – изображение функции $c(z,t)$;

s – комплексный параметр.

Решение уравнения (4.4) для условий $c_L(0,s) = c_b/s$, $\lim_{z \rightarrow \infty} c_L \neq \infty$ имеет следующий вид:

$$c_L = \left(\frac{c_b}{s} - \frac{c_0}{s+K} \right) \exp \left[\left(\frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\alpha^2 + 4\beta} \right) z \right], \quad (4.5)$$

где $\alpha = w/D_s$; $\beta = (s+K)/D_s$.

Переходя к оригиналу выражения (4.5), получим,

$$\begin{aligned} c(z,t) = & c_0 \exp(-Kt) + 0,5 \exp(0,5\alpha z) \left\langle c_b \left[\exp(-\sqrt{AB}) \operatorname{erfc}(0,5\sqrt{A/t} - \sqrt{Bt}) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \exp(\sqrt{AB}) \operatorname{erfc}(0,5\sqrt{A/t} + \sqrt{Bt}) \right] - c_0 \exp(-At) \left\{ \exp \left[-\sqrt{A(B-K)} \right] \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \operatorname{erfc} \left[0,5\sqrt{A/t} - \sqrt{(B-K)t} \right] + \exp \left[\sqrt{A(B-K)} \right] \times \right. \right. \\ & \left. \left. \times \operatorname{erfc} \left[0,5\sqrt{A/t} + \sqrt{(B-K)t} \right] \right\} \right\rangle, \quad (4.6) \end{aligned}$$

где $A = z^2/D_s$; $B = 0,25D_s(w^2/D_s^2 + 4K/D_s)$.

В частном случае, когда $c_0 = 0$, зависимость (4.6) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} c(z,t) = & 0,5c_b \exp(0,5\alpha z) \left[\exp(-f_1 z) \operatorname{erfc}(0,5z/\sqrt{D_s t} - \sqrt{Bt}) + \right. \\ & \left. + \exp(f_1 z) \operatorname{erfc}(0,5z/\sqrt{D_s t} + \sqrt{Bt}) \right] + \exp(\sqrt{AB}) \operatorname{erfc}(0,5\sqrt{A/t} + \sqrt{Bt}), \quad (4.7) \end{aligned}$$

где $f_1 = 0,5\sqrt{w^2/D_s^2 + 4K/D_s}$.

Вычислительные эксперименты проведены с использованием зависимости (4.6). Результаты вычислительного эксперимента представлены на рисунке 4.2.

Миграция токсичных компонентов жидких стоков с поверхности, примыкающей к смоляным озерам, может приводить к загрязнению почвы и подстилающих пород. Вычислительные эксперименты показали, что нестационарный вертикальный профиль концентрации имеет волнообразный характер с точкой максимума, обусловленной в данный момент времени в конкретной точке рассматриваемого пространства равенством скоростей процессов конвективно-диффузионного переноса и сорбции. Результаты численного моделирования показали, что особый практический интерес представляет стационарный вертикальный профиль загрязнителя, так как при этом устанавливается максимальное распределение загрязнителя.

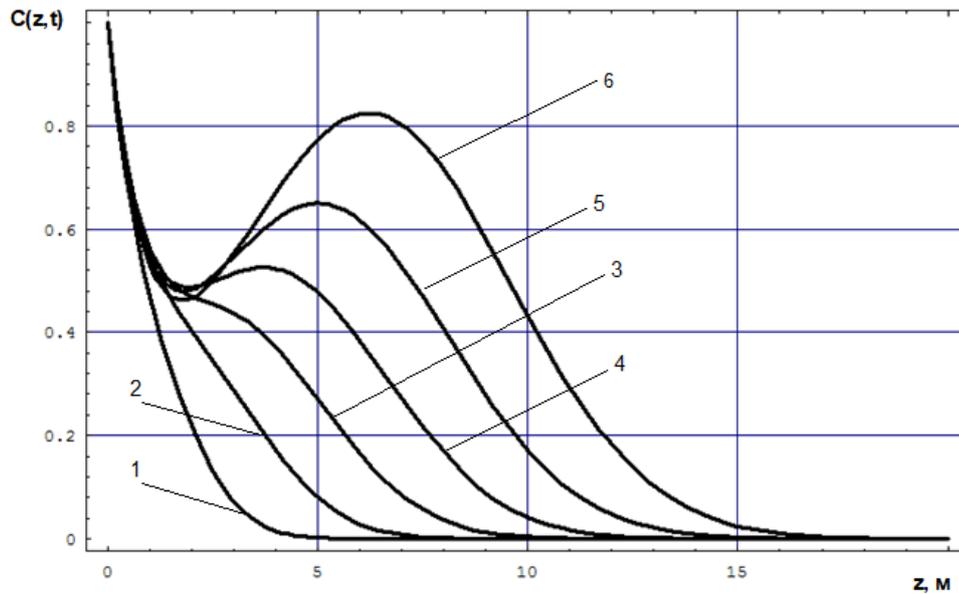


Рисунок 4.2 – Нестационарный вертикальный профиль концентрации загрязнителей, поступающих с земной поверхности, прилегающей к смоляным озерам: $C(z,t) = c(z,t)/c_b$; 1 – $t = 1$ сут; 2 – $t = 2$ сут;

3 – $t = 3$ сут; 4 – $t = 4$ сут; 5 – $t = 5$ сут; 6 – $t = 6$ сут

Стационарное вертикальное распределение загрязнителя описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$D_s \frac{d^2 c}{dz^2} - w \frac{dc}{dz} - Kc = 0, \quad (4.8)$$

Решение уравнения (4.8) для условий: $c(0) = c_b = \text{const}$; $\lim_{z \rightarrow \infty} c \neq \infty$; имеет следующий вид:

$$c(z) = c_b \exp \left\{ \left[\frac{w}{2D_s} - \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{w}{D_s} \right)^2 + \frac{4K}{D_s}} \right] z \right\}. \quad (4.9)$$

Вертикальный профиль концентрации загрязнителей, заданный зависимостью (4.9), представлен на рисунке 4.6 при различных значениях скорости фильтрации загрязненной воды, коэффициенте диффузии $10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ и константе скорости сорбции 10^{-6} 1/с .

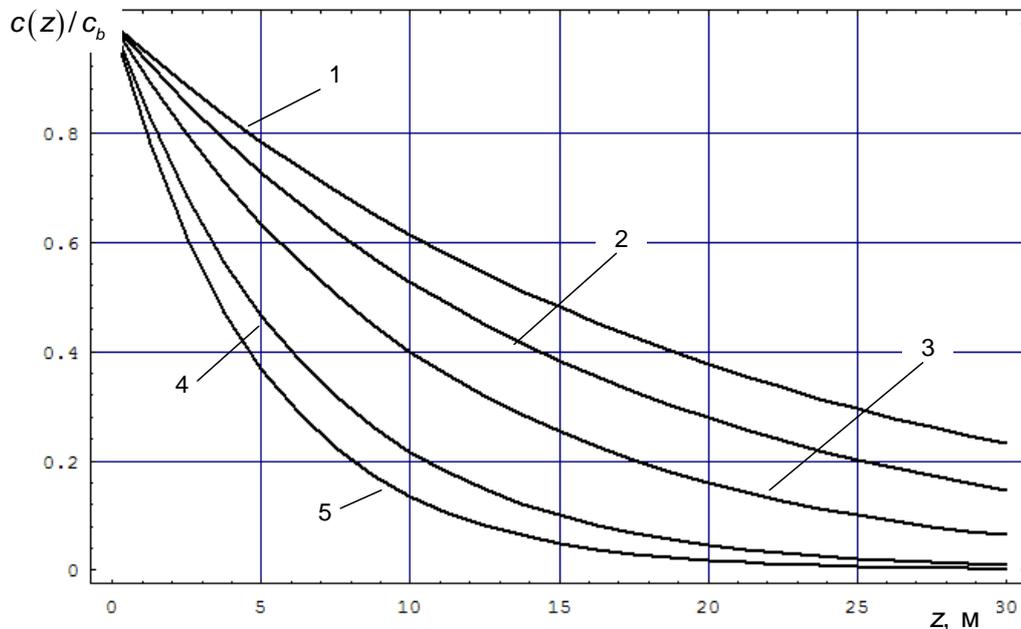


Рисунок 4.3 – Стационарный вертикальный профиль концентрации загрязнителей, поступающих с земной поверхности, прилегающей к смоляным озерам, при скорости фильтрации w , м/с: 1 - $2 \cdot 10^{-5}$; 2 - $1,5 \cdot 10^{-5}$; 3 - 10^{-5} ; 4 - $0,5 \cdot 10^{-5}$; 5 - $0,3 \cdot 10^{-5}$

Глубина проникновения фронта загрязнителя, для которого выполняется следующее условие: $c(h_{кр}) = \text{ПДК}$, где $h_{кр}$ – предельно допустимая глубина проникновения загрязнителя по санитарно-гигиеническому фактору; ПДК –

предельно допустимая концентрация загрязнителя в почвах и подстилающих горных породах, определяется из алгебраического уравнения:

$$\text{ПДК} = c_b \exp \left\{ \left[\frac{w}{2D_s} - \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{w}{D_s} \right)^2 + \frac{4K}{D_s}} \right] h_{кр} \right\}. \quad (4.10)$$

Решение уравнения имеет вид:

$$h_{кр} = 2 \left[\frac{w}{D_s} - \sqrt{\left(\frac{w}{D_s} \right)^2 + \frac{4K}{D_s}} \right]^{-1} \ln \left(\frac{\text{ПДК}}{c_b} \right). \quad (4.11)$$

Предварительные результаты, полученные для загрязнителей, источником которых является поверхность смоляных отходов, показывают, что критическая глубина проникновения фронта загрязнителя составляет 10 ... 15 м, то есть практически невозможно проникновение загрязнителей в подземные воды при концентрациях, превышающих ПДК.

Рассматривая всю территорию исследуемого участка, следует отметить, что миграция загрязнителей возможна только непосредственно вблизи смоляных озер и загрязненной прибрежной части. Следовательно, площадь, на которой целесообразно проводить геолого-геодезические и инженерно-экологические изыскания, ограничивается территориями вблизи смоляных озер и загрязненной прибрежной части. При этом бурение скважин должно осуществляться на глубину не более 15 м.

4.2 Моделирование геомеханического воздействия на геологическую среду при освоении техногенного месторождения ПАУ

В процессе отработки большого и лесного смоляных озер образовался земляной вал, представленный на рисунке 4.4, что обусловило необходимость применения ограждающих конструкций (по типу «стена в грунте»).

В настоящем разделе приведены результаты расчетно-вычислительного эксперимента методом конечных элементов (далее – КЭ), выполненных в программном комплексе Ansys.

В настоящее время композитные шпунты активно используются в геомеханике благодаря своей прочности, устойчивости к коррозии и способности адаптироваться к различным грунтовым условиям. Они используются для укрепления склонов, береговых линий, фундаментов зданий, а также для создания заградительных конструкций.



Рисунок 4.4 – Профили геофизического опробывания рассматриваемого земляного вала

Исследования показывают, что композитные шпунты обладают высокой прочностью и устойчивостью к деформациям под воздействием нагрузок, что позволяет им эффективно укреплять грунты и предотвращать оползни и обвалы. Они также хорошо себя зарекомендовали в условиях высокой влажности и агрессивной среды, такой как соленая вода и кислотные почвы.

Использование композитных шпунтов в геомеханике способствует повышению долговечности и надежности геотехнических конструкций, а также снижению затрат на их эксплуатацию. Таким образом, эти материалы могут быть использованы в различных областях геотехники, таких как строительство дорог, железных дорог, аэропортов, а также для укрепления береговых линий и берегоукрепительных сооружений.

Моделирование напряженно-деформированного состояния земляного вала. Учитывая вероятность разрушения земляного вала в процессе выполнения гидроочистных работ в русле реки Чагоды, был проведен расчетно-вычислительный эксперимент методом конечных элементов (далее – МКЭ) выполненный в программном комплексе Ansys.



Рисунок 4.5 – План участка работ с участком исследуемого земляного вала (плотины)

Согласно схеме планировочной организации земельного участка (рисунок 4.5), в специальном программном обеспечении (Ansys) была создана трехмерная модель рассматриваемой плотины. На первом этапе рассматривается плотина без шпунтов. Плотина представлена в виде 2 слоев (рисунок 4.6). Верхний слой 4 м является непосредственно плотиной, с одной стороны испы-

тывающей гидростатическое давление со стороны реки, с другой стороны – смоляных отходов. Нижний слой – слой грунта 6 м. При расчетах напряжений и деформаций грунта были приняты следующие допущения:

- между верхним и нижним слоями грунта принимается коэффициент внутреннего трения 0,5;
- между боковыми слоями грунта и грунтом участка рассматриваемой плотины принимается коэффициент внутреннего трения 0,5;
- со стороны реки на плотину действует гидростатическое давление воды;
- со стороны смоляных отходов на плотину действует гидростатическое давление смолы.

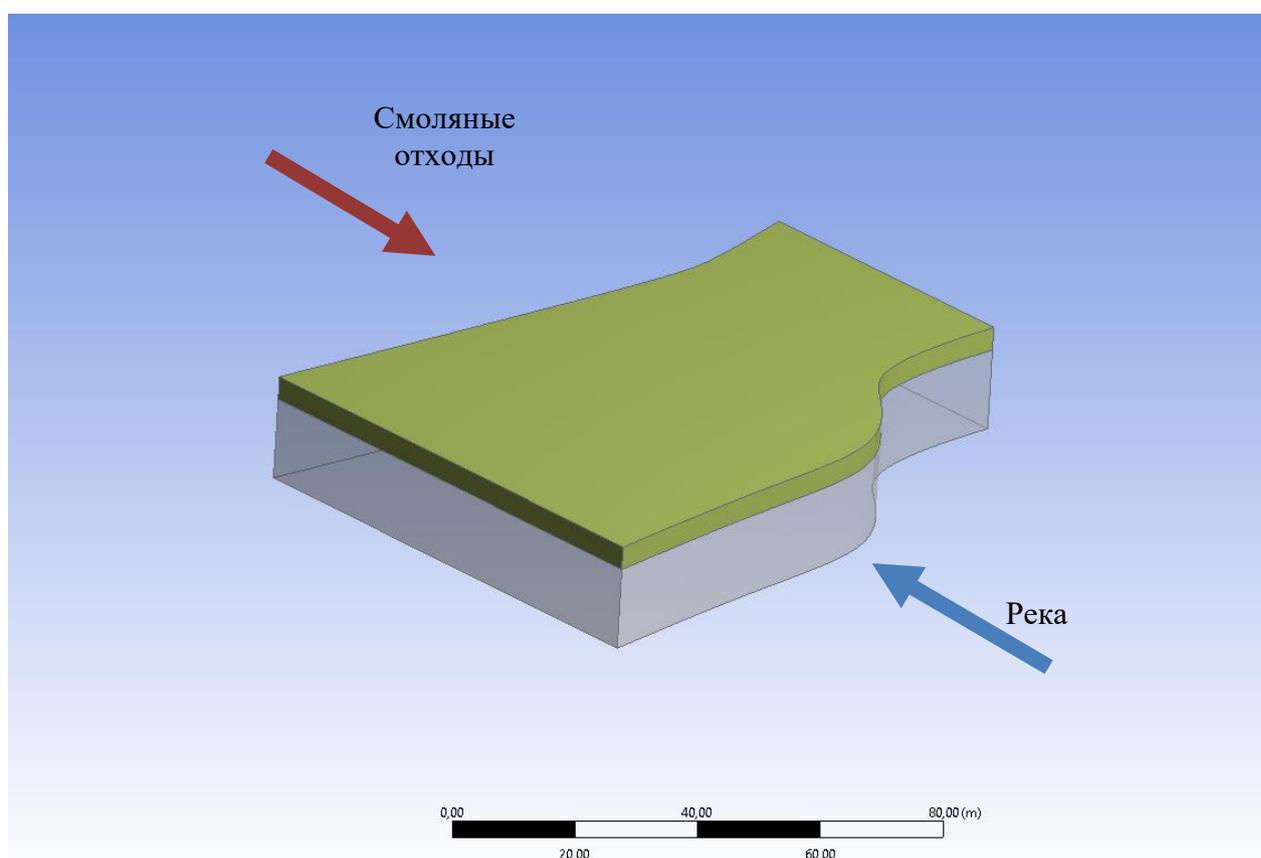


Рисунок 4.6 – Трехмерная модель земляного вала (плотины)

Расчет напряжений в грунте и деформаций был проведён МКЭ. Для расчета была построена сетка (рисунок 4.7).

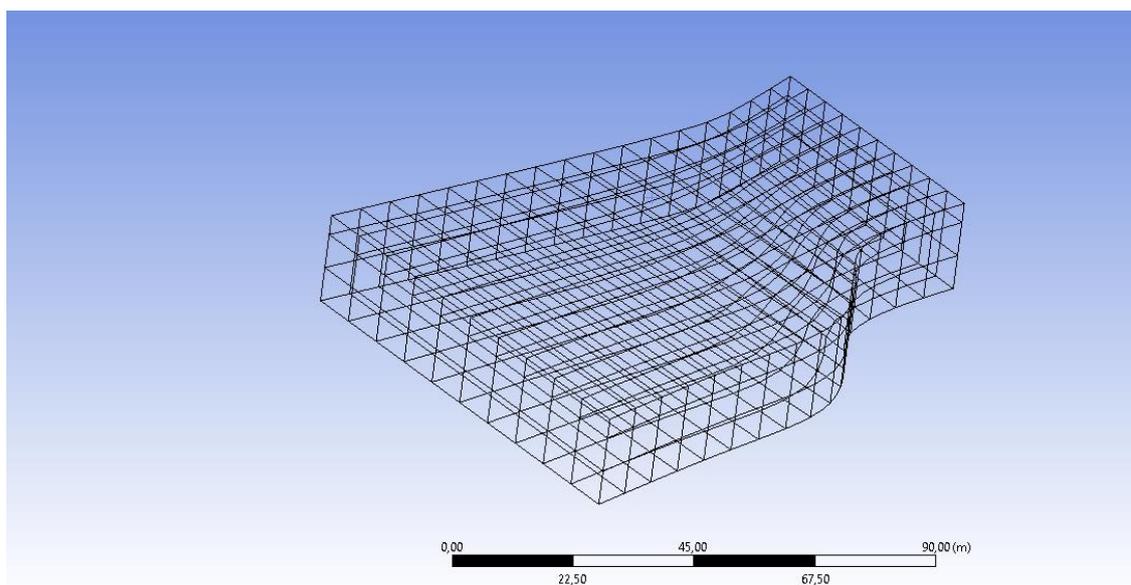


Рисунок 4.7 – Трехмерная модель земляного вала с построенной сеткой методом КЭ

Физико-механические свойства слоев (таблица 4.1) задавались в соответствии с результатами выполненных полевых и лабораторных исследований грунтов и смоляных отходов, выполненных в ТулГУ.

Геологическая среда рассматриваемого земляного вала на глубину до 6 м представлена двумя инженерно-геологическими элементами (далее – ИГЭ).

Верхний слой (ИГЭ-1) сложен голоценовыми песками (*aIV*) средней крупности желтовато-коричневого цвета с модулем крупности 2,38, высокой водопроницаемостью (коэффициент фильтрации 9,4 м/сут) и умеренной пористостью (36,8 %). Грунт не содержит глинистых комков, обладает углом естественного откоса 36° , а низкое содержание пылевато-глинистых частиц (1,35 %) исключает морозное пучение.

Ниже залегают озерно-ледниковые суглинки (ИГЭ-2) бурого цвета, тяжелые, пылеватые, полутвердые, с включением мергеля (15 %) и камней диаметром 1–2 см. Грунт характеризуется высокой природной влажностью (26 %), пластичностью (число пластичности 10,9 %) и сильной пучинистостью (7–10 %). Низкий коэффициент фильтрации (0,091 м/сут) и повышенная плотность

(1,91 г/см³) указывают на слабую водопроницаемость и устойчивость к деформациям в естественном состоянии, однако при водонасыщении его показатель текучести возрастает до 0,81, что требует учета при планировании работ.

Таблица 4.1 – Физико-механические характеристики инженерно-геологических элементов

Параметр	ИГЭ-1 (Пески голоценового горизонта)	ИГЭ-2 (Суглинки озерно- ледниковых отложений)
Классификация	Песок средней крупности (по ГОСТ 25100-2011)	Суглинок тяжелый пылеватый (ГОСТ 25100-2011)
Гранулометрический состав	Модуль крупности: 2,38 (средний); Содержание пылеватоглинистых частиц: 1,35%	Содержание мергеля: 15%; Камни диаметром 1–2 см
Физические свойства		
Объемная масса, кг/м ³	1624	1910 (природная влажность)
Плотность частиц, г/см ³	2,57	2,67
Плотность грунта (природная), г/см ³	1,62	1,91
Плотность сухого грунта, г/см ³	1,45	1,51
Пористость, %	36,8	Коэффициент пористости: 0,77 (низкая)

Продолжение таблицы 4.1

Параметр	ИГЭ-1 (Пески голоценового горизонта)	ИГЭ-2 (Суглинки озерно- ледниковых отложений)
Влажность, %	6	Природная: 26,0; на границе текучести: 30,7; на границе раскатывания: 19,8
Механические свойства		
Угол естественного откоса, °	36	25
Коэффициент фильтрации, м/сут	9,4 (высокий)	0,091 (низкий)
Показатель текучести, д.е.	Не применимо (песок)	0,57 (природный); 0,81 (при водонасыщении)
Условное сопротивление, кПа	150–300* (СП 22.13330)	150–200* (СП 22.13330 для суглинков)
Прочие характеристики		
Степень морозной пучинистости	Непучинистый (со- держание пылевато- глинистых частиц < 3%)	Сильнопучинистый ($7,0 \leq$ $\epsilon_{fn} \leq 10,0\%$)
Коэффициент размягчения	–	0,75
Категория по трудности разработки	II (песок)	III (суглинок тяжелый)

Как видно из расчетов выше, минимальные деформации составляют 0,014 м, максимальные – 0,135 м (рисунок 4.8).

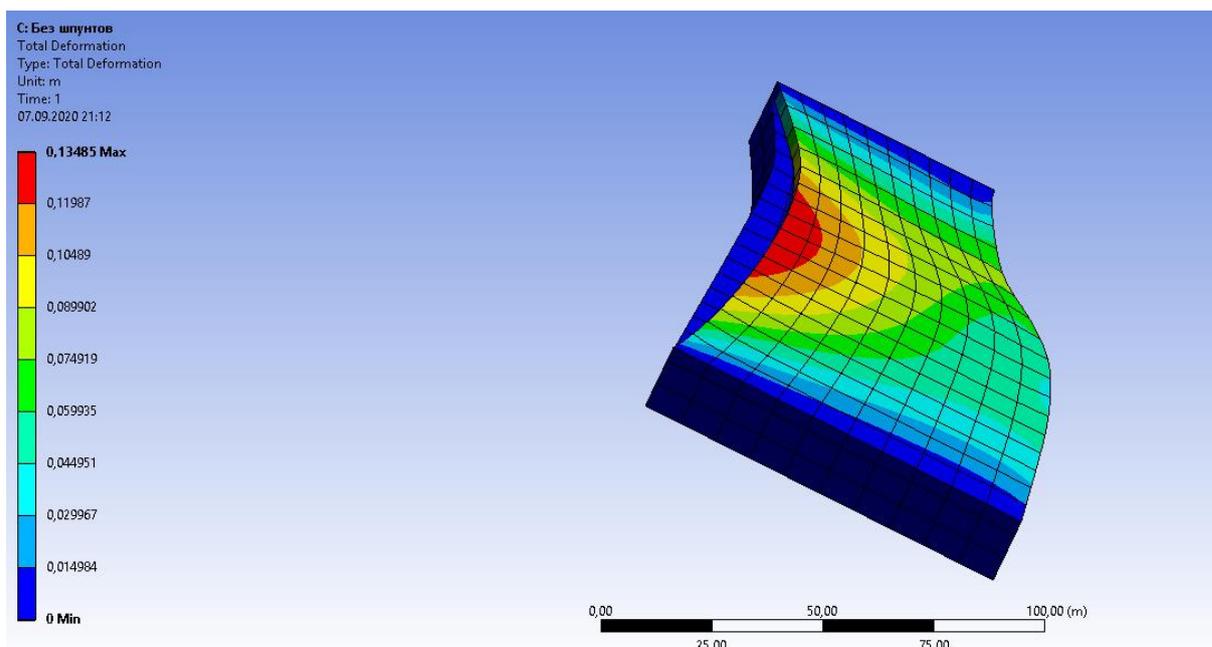


Рисунок 4.8 – Геомеханическая модель деформации грунта, рассчитанная методом КЭ

Механические характеристики шпунтов представлены в таблицах 4.2 – 4.3. В рамках диссертационной работы проводилось расчетное сравнение применения композитного шпунта ШК-200УМ и ПВХ-шпунта.

Таблица 4.2 – Геометрические характеристики сечений

Профиль	Площадь сечения, см	Масса кг/м. п	Момент инерции относительно геометрического центра сечения, см ⁴		Упругий момент сопротивления сечения, см ³		Радиус инерции, см	
			I _x	I _y	W _x	W _y	r _x	r _y
ШК-200	58,57	12,60	3875,72	8844,08	365,29	401,46	8,13	12,29
ШК-200УМ (погонный)	145,36	31,28	9353,72	118316,67	804,27	2337,35	8,02	28,53

Таблица 4.3 – Механические характеристики стеклопластика профиля ШК-200УМ

Наименование характеристики	Обозначение	Единицы измерения	Значение
Предел прочности при продольном растяжении	R	МПа	1200
Предел прочности при поперечном растяжении	R	МПа	250
Модуль деформации при продольном растяжении	E	МПа	62 000*
Модуль деформации при поперечном растяжении	E	МПа	13 000
Ударная вязкость поперек волокон	-	кДж/м ²	280
Ударная вязкость поперек волокон (при - 50°С)		кДж/м ²	294

Перед выполнением расчета напряжений в грунте и деформаций, осуществляемого методом конечных элементов, на участке проводились предварительные геодезические работы, а также была разработана план-схема шпунтования участка, связанная с гидроочистными мероприятиями и земляными работами.

Геодезические работы включали в себя следующие основные этапы и задачи:

1. Топографическая съемка участка: для получения актуальной информации о рельефе местности, состоянии уже существующих объектов и рудиментарных ландшафтных характеристик. Это позволило зафиксировать все необходимые координаты и высотные отметки, которые в дальнейшем использовались для построения математической модели участка.

2. Геодезическая разбивка осей объектов и проектных контуров: в ходе этих работ определили расположение будущих шпунтовых ограждений, зоны проведения земляных работ и территорий, подверженных влиянию строительных и гидротехнических мероприятий.

3. Контроль выполненных измерений.

После завершения геодезических мероприятий на основе полученных данных была разработана натурная план-схема шпунтования участка (рисунок 4.9), которая включала следующие элементы:

- размещение шпунтовых ограждений с учетом объемов гидроочистных и земляных работ;
- определение зон воздействия на окружающие грунтовые массивы;
- общие инженерные требования к установке шпунта, определенные проектом;
- координация мест пересечения шпунтовых ограждений с другими инженерными элементами, включая коммуникации, дренажные системы и рабочие зоны.

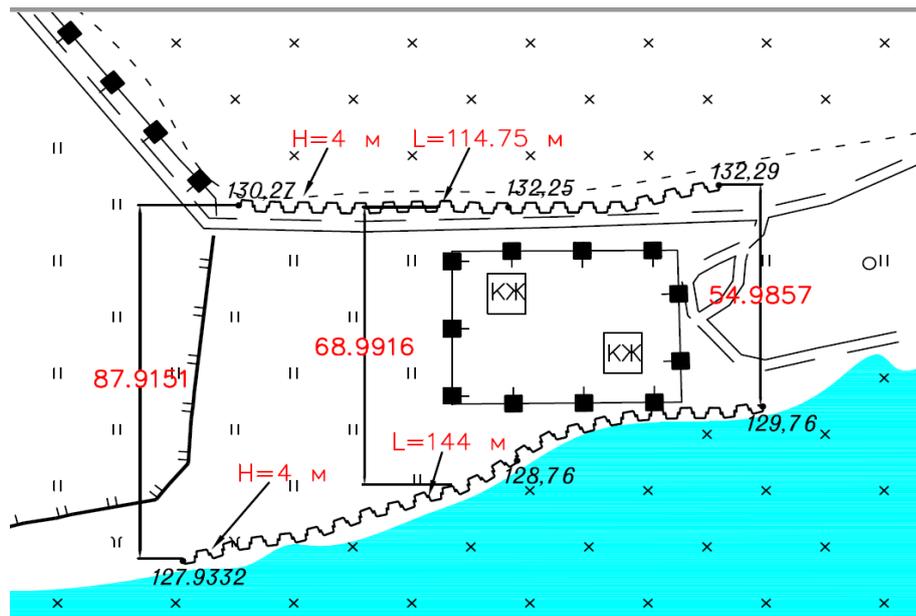


Рисунок 4.9 – План-схема шпунтования земляного вала

Полученные на стадии геодезических изысканий данные легли в основу создания численной модели грунта для проведения расчетов МКЭ. В ходе разработки модели учитывались топографические особенности участка, данные о стратиграфии грунта, его физико-механические свойства, а также параметры рабочего воздействия шпунтовой конструкции.

Для расчета была построена сетка (рисунок 4.10), в соответствии с план-схемой шпунтования земляного вала (рисунок 4.9).

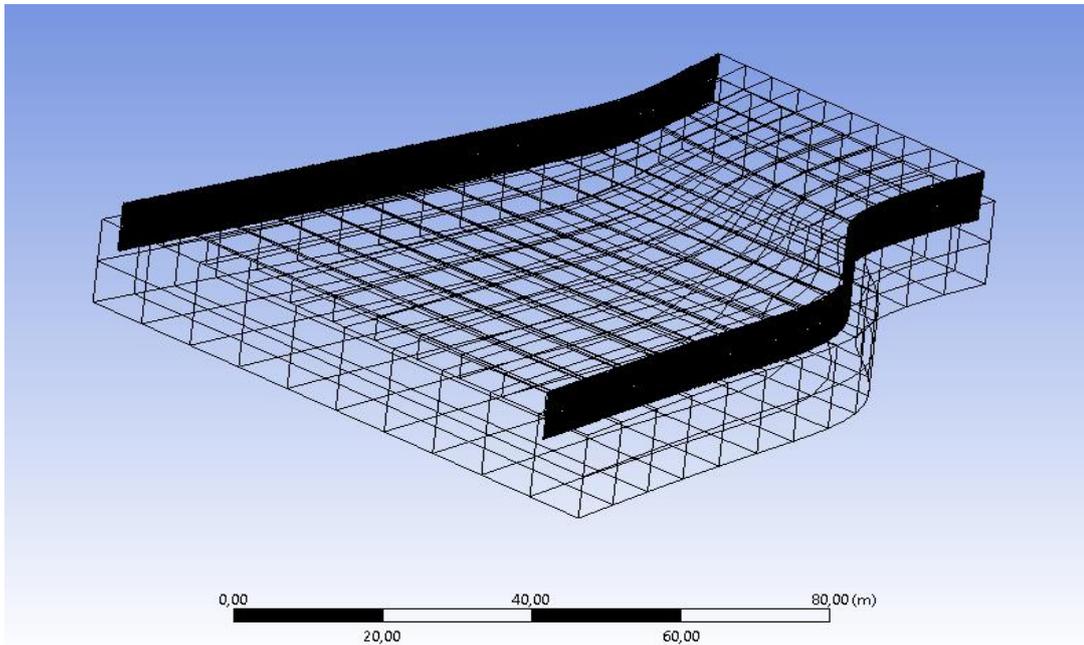


Рисунок 4.10 – Трехмерная модель плотины со шпунтами с построенной сеткой для расчета методом КЭ

Результаты вычислительного эксперимента представлены на рисунках 4.11 – 4.12.

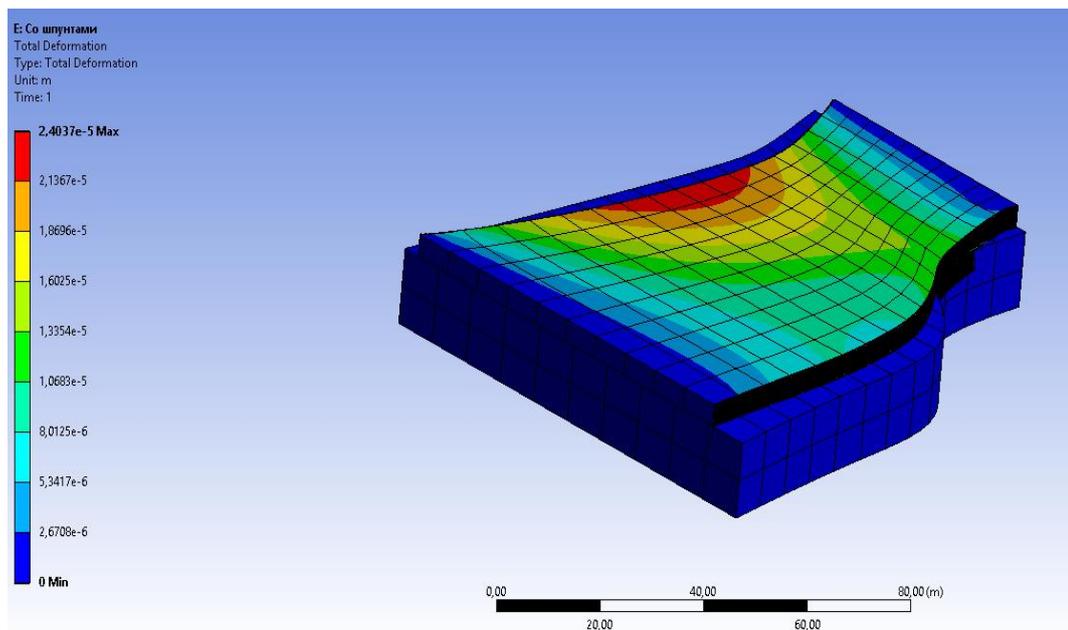


Рисунок 4.11 – Деформации грунта, рассчитанные МКЭ, при использовании ПВХ-шпунтов

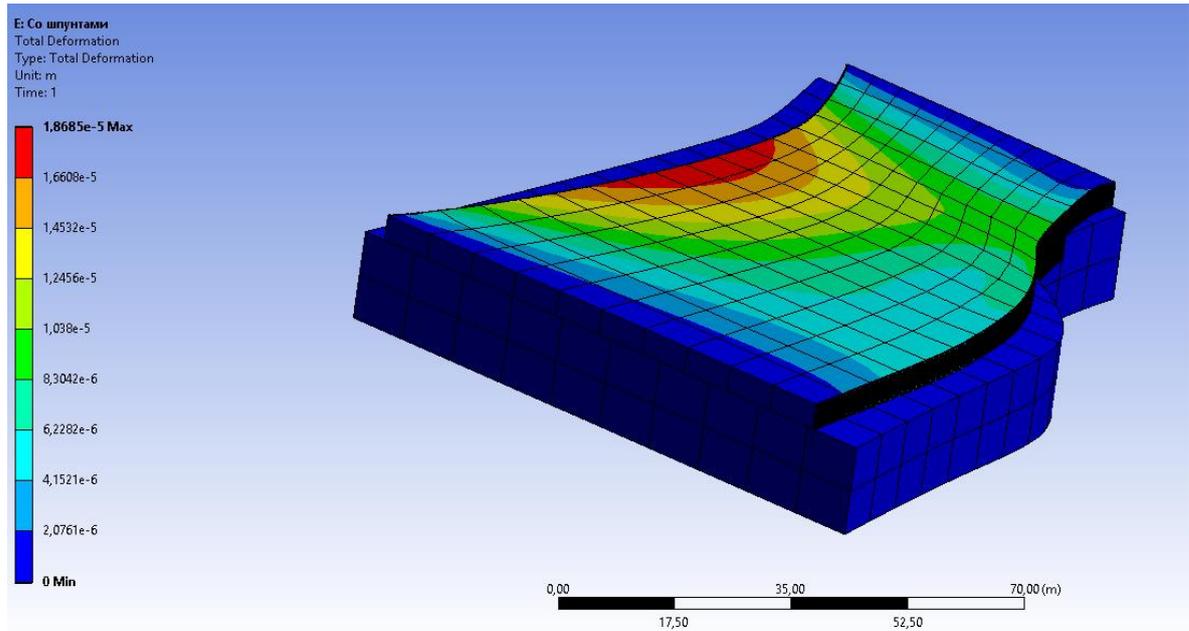


Рисунок 4.12 – Деформации грунта, рассчитанные МКЭ, при использовании шпунтов из стеклопластика ШК-20УМ

Как видно из расчетов, проведенных в расчетно-аналитическом комплексе Ansys, при использовании шпунтов ШК-200УМ минимальные деформации грунта составляют $2,07 \times 10^{-6}$ м, максимальные – $1,87 \times 10^{-5}$ м.

Расчетное обоснование подтверждает, что при использовании композитного шпунта ШК-200 УМ и ПВХ-шпунта наблюдается минимальная разница в деформационных характеристиках грунта, что позволяет рассматривать оба варианта как равноценные с точки зрения обеспечения надежности и устойчивости конструкции. Подробный анализ физико-механических свойств материалов показал, что оба типа шпунта эффективно выполняют задачу по укреплению грунтового массива и предотвращению деформация береговой линии. Разница в прочностных характеристиках и эксплуатационных свойствах между композитным шпунтом и ПВХ-шпунтом является несущественной, что позволяет принимать решение о выборе материала на основании его стоимости.

Учитывая высокую стоимость композитного шпунта относительно ПВХ, рекомендовано использование ПВХ-шпунта, что обусловлено его более высокой ценовой рентабельностью. При этом данный выбор не снижает надежности

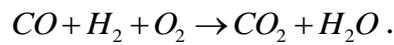
конструкции и обеспечивает надлежащую защиту рассматриваемого земляного вала.

Таким образом, рекомендация в пользу ПВХ-шпунта подтверждается как технико-экономическими выкладками, так и результатами проведенных физико-механических расчетов.

4.3 Расчет выбросов в атмосферу от установки плазменного пиролиза при переработке ПАУ

Расчетная производительность установки плазменной газификации составляет 25 т/сут или 1042 кг/ч, следовательно, объем производства синтез-газа (V_{CF}) будет равен $5002 \text{ м}^3/\text{ч} \approx 1,4 \text{ м}^3/\text{с}$.

Реакция горения синтез-газа, состоящего из оксида углерода и водорода, имеет вид:



Следовательно, выбросы от установки плазменной газификации смоляных отходов будут представлены диоксидом углерода и парами воды. Плотность парогазовой смеси (ρ_{CM}) определяют по формуле:

$$\begin{aligned} \rho_{CM} &= \frac{M_{OY} + M_B}{V_{CF}} = \rho_{OY} + \rho_B = \frac{10^{-3}}{RT} (M_{rOY} p_{OY} + M_{rB} p_B) = \frac{10^{-3}}{RT} [M_{rOY} p_A - (M_{rOY} - M_{rB}) p_B] = \\ &= \frac{10^{-3} p_A}{RT} [M_{rOY} - 0,5(M_{rOY} - M_{rB})] \text{ кг/м}^3, \end{aligned} \quad (4.12)$$

где M_{OY} , M_B – масса оксида углерода и водорода соответственно, кг; ρ_{OY} ,

ρ_B – парциальная плотность оксида углерода и водорода соответственно, кг/м³;

M_{rOY} , M_{rB} – относительная молекулярная масса оксида углерода и водорода соответственно ($M_{rOY} = 12 + 16 = 28$; $M_{rB} = 2$); p_{OY} ,

p_B – парциальное давление оксида углерода и водорода соответственно, Па;

p_A – атмосферное давление, Па ($p_A = 101\,325 \text{ Па}$);

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К) ($R = 8,314 \text{ Дж/(моль} \times \text{град)}$);

T – абсолютная температура, К.

$$\rho_{CM} = \frac{10^{-3} p_A}{RT} [M_{rOY} - 0,5(M_{rOY} - M_{rB})] = \frac{10^{-3} \cdot 101\,325}{8,314 \cdot 273} [28 - 0,5(28 - 2)] = 0,67 \text{ кг/м}^3.$$

Общая масса выброса парогазовой смеси (M_{CF}) составит:

$$M_{CF} = V_{CF} \rho_{CM} = 1,4 \cdot 0,67 = 0,94 \text{ кг/с}.$$

Уравнение химической реакции показывает, что масса образующегося диоксида углерода составит 71 % от общей массы продукта реакции. Поэтому выброс диоксида углерода (M_{DY}) определяется по формуле:

$$M_{DY} = 0,71 M_{CF} = 0,71 \cdot 0,94 = 0,67 \text{ кг/с} = 670 \text{ г/с}.$$

Следовательно, при работе установки плазменной газификации смоляных отходов в приземный слой атмосферы будут поступать только диоксид углерода (углекислый газ) и водяной пар. Данные газы не являются токсичными загрязнителями и их ПДК для атмосферы не регламентируются.

4.4 Определение последствий негативного воздействия на водно-биологическую среду

При освоении техногенного месторождения ПАУ предполагается проведение следующих работ:

- вскрытие и подготовка смоляных озер к выемочным работам;
- выемочно-погрузочные работы на смоляном озере;
- транспортирование смоляных отходов;
- выемка и транспортирование отходов из реки;
- работы на промышленной площадке.

Негативное воздействие на водные биологические ресурсы при реализации проекта будет складываться из следующих компонентов:

- нарушение мест обитания организмов зообентоса в результате нарушения заливаемой поймы реки, а также вывод из биопродукционного потенциала пойменного участка реки при отработке смоляных отходов;

- нарушение мест обитания организмов зообентоса в результате извлечения смоляных отходов из прибрежной части реки;
- гибель организмов зоопланктона при извлечении смоляных отходов из прибрежной части реки.

В период производства работ для хозяйственно-бытовых и технических нужд участок обеспечивается привозной водой из местных источников.

Гибели кормовых организмов от взмучивания воды не предвидится, т. к. работы будут вестись в прибрежной части реки.

4.4.1 Расчет ущерба, наносимого водным биоресурсам при освоении техногенного месторождения ПАУ

Для оценки воздействия планируемых работ на водные биоресурсы реки Чагодоши и среду обитания рыбохозяйственного водотока использованы следующие нормативные методики:

- ст. III «Расчет размера вреда водным биоресурсам от осуществления планируемой хозяйственной и иной деятельности, влияющей на состояние водных биоресурсов и среды их обитания»;
- «Методика исчисления размера вреда, причиненного водным биологическим ресурсам», утвержденная приказом Федерального агентства по рыболовству от 25.11.2011 № 1166 (далее – Методика).

Биомасса зообентоса и зоопланктона, коэффициенты, характеризующие биопродукционные процессы в р. Чагодоше приведены в таблице 4.4.

Результаты расчета повышающего коэффициента, учитывающего длительность негативного воздействия, представлены в таблице 4.5.

В соответствии с формулой 51 Методики, определение повышающего коэффициента, учитывающего длительность негативного воздействия, осуществлялось по формуле:

$$\Theta = T + \sum_i K_{Bi}, \quad (4.13)$$

где Θ – повышающий коэффициент, учитывающий длительность негативного воздействия, в долях единицы;

T – показатель длительности негативного воздействия, в течение которого невозможно или не происходит восстановление водных биоресурсов и их кормовой базы, в результате нарушения условий обитания и воспроизводства водных биоресурсов (определяется в долях года, принятого за единицу, как отношение сут/365);

$\sum_i K_{Bi}$ – коэффициент длительности восстановления теряемых водных биоресурсов, определяемый как $\sum_i K_{Bi} = 0,5i$, в равных долях года (сут/365).

Таблица 4.4 – Коэффициенты, характеризующие биопродукционные процессы в р. Чагодоце

Кормовые организмы	Зообентос	Зоопланктон
Коэффициент перевода биомассы кормовых организмов в их продукцию (P/B)	3,3	10,2
K_E – коэффициент эффективности использования пищи	5	10
Показатель использования кормовой базы рыбами (K_3)	30	50
Биомасса, г/м ³	13,47	0,48

Таблица 4.5 – Результаты расчета повышающего коэффициента, учитывающего длительность негативного воздействия

Вид работ	Сроки производства работ, сут	Срок эксплуатации объекта	Θ
Механическое повреждение русла и поймы	260	-	1,42
Отторжение участка поймы	-	5 лет	5,71
Деструкция дна водотока	-	5 лет	5,71

При этом длительность восстановления (i лет) с момента прекращения негативного воздействия для планктонных кормовых организмов составляет 1 год, для бентосных кормовых организмов – 3 года, для рыб и донных беспозвоночных с многолетним жизненным циклом, которые добываются (вылавливаются) в целях рыболовства, – средний возраст достижения ими промысловых размеров.

В соответствии с формулой 50 Методики, определение потерь водных биоресурсов от гибели бентоса осуществлялось по формуле:

$$N = BSK_E d \Theta \cdot 10^{-3} \left(1 + \frac{P}{B} \right) \left(\frac{K_3}{100} \right), \quad (4.14)$$

где N – потери (размер вреда) водных биоресурсов, кг;

B – средняя многолетняя для данного сезона года величина общей биомассы кормовых организмов бентоса, г/м²;

P/B – коэффициент перевода биомассы кормовых организмов в продукцию кормовых организмов (продукционный коэффициент);

S – площадь зоны воздействия, где прогнозируется гибель кормовых организмов бентоса, м²;

K_E – коэффициент эффективности использования пищи на рост (доля потребленной пищи, используемая организмом на формирование массы своего тела);

K_3 – средний для данной экосистемы (района) и сезона года коэффициент (доля) использования кормовой базы рыбами-бентофагами, используемыми в целях рыболовства, %;

d – степень воздействия, или доля количества гибнущих организмов от общего их количества, в данном случае отношение величины теряемой биомассы к величине исходной биомассы (в долях единицы);

Θ – величина повышающего коэффициента, учитывающего длительность негативного воздействия намечаемой деятельности и время восстановления (до исходной численности, биомассы) теряемых водных биоресурсов, доли единицы.

В соответствии с формулой 47 Методики, определение потерь водных биоресурсов от гибели зоопланктона осуществлялось по формуле:

$$N = BWK_E d \cdot 10^{-3} \left(1 + \frac{P}{B} \right) \left(\frac{K_3}{100} \right), \quad (4.15)$$

где N – потери (размер вреда) водных биоресурсов, т;

B – средняя многолетняя для данного сезона (сезонов, года) величина общей биомассы кормовых планктонных организмов, г/м³;

P/B – коэффициент для перевода биомассы кормовых организмов в продукцию кормовых организмов (продукционный коэффициент);

W – объем воды в зоне воздействия, в котором прогнозируется гибель кормовых планктонных организмов, м³;

K_E – коэффициент эффективности использования пищи на рост (доля потребленной пищи, используемая организмом на формирование массы своего тела);

K_3 – средний для данной экосистемы (района) и сезона (года) коэффициент (доля) использования кормовой базы, %;

d – степень воздействия, или доля количества гибнущих организмов от общего их количества, в данном случае отношение величины теряемой биомассы к величине исходной биомассы, в долях единицы.

Показатель использования кормовой базы (K_E) является обратной величиной кормового коэффициента (K_1), то есть $K_E = 1/K_1$ или определяется как произведение коэффициентов использования кормовой базы рыбами и усвояемости пищи.

Результаты расчета ущерба вследствие гибели зообентоса приведены в таблице 4.6.

Общий ущерб от гибели зообентоса составит:

$$398,402 + 259,261 + 69,055 + 1900,945 = 2627,663 \text{ кг}$$

Следовательно, ущерб вследствие гибели зообентоса составит 2627,663 кг в натуральном выражении.

Результаты расчета ущерба вследствие гибели зоопланктона в объемах забираемой воды представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.6 – Результаты расчета ущерба вследствие гибели зообентоса

Вид работ	B , г/м ²	P/B	S , м ²	K_E	K_3 , %	d	Θ	N , кг
Механическое повреждение русла (на период удаления смоляных отходов)	13,47	4,3	6440	0,2	0,3	1	1,42	398,402
Деструкция дна водотока при удалении смоляных отходов	13,47	4,3	1060	0,2	0,3	1	5,71	259,261
Механическое повреждение заливаемой поймы (на период строительства)	13,47	4,3	4465	0,2	0,3	0,25	1,42	69,055
Вывод из биопродукционного потенциала заливаемой поймы (на время удаления смоляных отходов)	13,47	4,3	37675	0,2	0,3	0,25	5,71	1900,945

Таблица 4.7 – Результаты расчета ущерба вследствие гибели зоопланктона в объемах забираемой воды

Вид работ	B , г/м ³	$1+P/B$	W , м ³	K_E	K_3 , %	d	N , кг
Забор воды	0,48	11,2	3340,0	0,1	0,5	1	8,978

Ущерб вследствие гибели зоопланктона в объемах забираемой воды составит 8,978 кг в натуральном выражении.

Таким образом, общий ущерб в натуральном выражении составит:

$$N = 2627,663 + 8,978 = 2636,641 \text{ кг.}$$

Таким образом, суммарная величина ущерба водным биологическим ресурсам в натуральном выражении составит 2636,641 кг \approx 2,64 т.

4.4.2 Рекомендации по восстановлению нарушенного состояния водных биоресурсов

В соответствии с п. 56 Методики, восстановительные мероприятия осуществляются посредством искусственного воспроизводства водных биоресурсов для восстановления нарушенного состояния их запасов, рыбохозяйственной мелиорации водных объектов для восстановления нарушенного состояния мест размножения, зимовки, нагула, путей миграции водных биоресурсов, акклиматизации (реакклиматизации) водных биоресурсов для восстановления угнетенных в результате осуществления хозяйственной и иной деятельности запасов отдельных видов водных биоресурсов или создания новых, расширения или модернизации существующих производственных мощностей, обеспечивающих выполнение таких мероприятий (п. 56 Методики).

В соответствии с п. 57 Методики, в случае невозможности проведения восстановительных мероприятий посредством искусственного воспроизводства отдельных видов водных биоресурсов, состояние запасов которых нарушено, искусственное воспроизводство планируется в отношении других более перспективных для искусственного воспроизводства либо добычи (вылова) видов водных биоресурсов с последующим выпуском искусственно воспроизводимых личинок и/или молоди водных биоресурсов в водный объект рыбохозяйственного значения в количестве, эквивалентном в промысловом возврате теряемым водным биоресурсам.

В качестве компенсационного мероприятия для восстановления нарушенного состояния водных биологических ресурсов предлагается осуществление искусственного воспроизводства личинок пеляди с последующим выпуском в р. Чагодошу.

Результаты расчета ущерба вследствие гибели зообентоса приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты расчета ущерба вследствие гибели зообентоса

Вид работ	B , г/м ²	P/B	S , м ²	K_E	K_3 , %	d	Θ	N , кг
Механическое повреждение русла (на период удаления смоляных отходов)	13,47	4,3	6440	0,2	0,3	1	1,42	398,402
Деструкция дна водотока при удалении смоляных отходов	13,47	4,3	1060	0,2	0,3	1	5,71	259,261
Механическое повреждение заливаемой поймы (на период строительства)	13,47	4,3	4465	0,2	0,3	0,25	1,42	69,055
Вывод из биопродукционного потенциала заливаемой поймы (на время удаления смоляных отходов)	13,47	4,3	37675	0,2	0,3	0,25	5,71	1900,945

Результаты расчета ущерба вследствие гибели зоопланктона в объемах забираемой воды представлены в таблице 4.9.

Для компенсаций потерь рыбного хозяйства, составляющих 2,64 т, необходимо осуществить выпуск $14,5 \cdot 10^5$ экз. личинок пеляди или $11,4 \cdot 10^5$ экз. личинок щуки.

Таблица 4.9 – Результаты расчета ущерба вследствие гибели зоопланктона в объемах забираемой воды

Вид работ	B , г/м ³	$1+P/B$	W , м ³	K_E	K_3 , %	d	N , кг
Забор воды	0,48	11,2	3340,0	0,1	0,5	1	8,978

Для компенсаций потерь рыбного хозяйства, составляющих 2,64 т, необходимо осуществить выпуск $14,5 \cdot 10^5$ экз. личинок пеляди или $11,4 \cdot 10^5$ экз. личинок щуки.

Для определения ориентировочной величины удельных эксплуатационных затрат на 1 тонну промыслового возврата использовали установленную стоимость 1 личинки:

1) сиговых пород рыб на 2017 год для предъявления за возмещение ущерба водным биологическим ресурсам в размере 2,12 руб., утвержденной ГУП «Чернышевский рыбоводный завод» от 11.01.2017;

2) щуки на 2018 год для предъявления за возмещение ущерба водным биологическим ресурсам в размере 2,00 руб., утвержденной приказом ФГБУ «Главрыбвод» от 26.12.2017 № 273.

Для компенсаций потерь рыбного хозяйства, составляющих 2,64 т, необходимо осуществить выпуск $14,5 \cdot 10^5$ экз. личинок пеляди или $11,4 \cdot 10^5$ экз. личинок щуки. Следовательно, ориентировочная величина удельных эксплуатационных затрат на 1 тонну промыслового возврата составляет 3074000 руб., на восстановление сиговых пород рыб и 2280000 руб. на восстановление популяции щуки. Исходя из этой величины, рассчитываем величину эксплуатационных затрат на воспроизводство личинок, необходимой для компенсации ущерба рыбному хозяйству Вологодской области как $3074000 + 2280000 = 5354000$ руб.

Итого 5 миллионов триста пятьдесят четыре тысячи рублей.

Данная величина затрат на проведение восстановительных мероприятий, согласно п. 55 Методики, является ориентировочной и уточняется субъектом намечаемой деятельности в рамках договорных отношений с подрядными организациями, выполняющими такие мероприятия.

Выводы

1. В силу многообразия условий формирования и трансформации смоляных озер поступление стоков на прилегающие территории происходит вследствие стекания обогащенных загрязнителями атмосферных осадков, растекания и инфильтрации стоков на горизонтальных участках рельефа. При этом имеет место вертикальная диффузионная миграция загрязнителей.

2. Вертикальная миграция загрязнителя в почву и далее в подстилающие породы удовлетворительно описывается одномерным уравнением конвективной диффузии с учетом кинетики сорбции загрязнителя твердой фазой почв и подстилающих пород.

3. Миграция загрязнителей возможна только непосредственно вблизи смоляных озер и загрязненной прибрежной части.

4. Площадь, на которой целесообразно проводить геолого-геодезические и инженерно-экологические изыскания, ограничивается территориями вблизи смоляных озер и загрязненной прибрежной части. При этом бурение скважин должно осуществляться на глубину не более 15 м.

5. Предварительные результаты, полученные для загрязнителей, источником которых являются смоляные отходы Чагодощенского стекольного завода, показывают, что критическая глубина проникновения фронта загрязнителя составляет 10...15 м.

6. Проникновение загрязнителей в подземные воды при концентрациях, превышающих ПДК, практически невозможно.

7. Результаты выполненных расчетов показали, что при использовании шпунтов ШК-200УМ минимальные деформации грунта составляют $2,07 \times 10^{-6}$ м, максимальные – $1,87 \times 10^{-5}$ м.

8. Выполненные расчеты показали, что композитный шпунт ШК-200 УМ и ПВХ-шпунт обладают схожими деформационными характеристиками, что делает их равноценными с точки зрения надежности и устойчивости конструкции в рамках исследуемого объекта. Оба типа шпунта эффективно укрепляют грунтовый массив и предотвращают деформацию береговой линии.

9. Геодезическое и геологическое опробование, проведенное на участке исследований, позволяет получить данные для разработки трехмерной натурной модели в расчетно-аналитическом комплексе Ansys, что является эффективным инструментом при проектировании, строительстве и эксплуатации объектов с геомеханическим воздействием.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате теоретических и экспериментальных исследований были уточнены закономерности формирования длительного загрязнения ландшафтов смоляными отходами и их миграции в притоки реки Волги при добыче и переработке стекольных песков, что имеет важное значение для разработки технических средств рекультивации загрязненных территорий.

Основные научные и практические результаты, выводы и рекомендации заключаются в следующем:

1. Смоляные отходы, образовавшиеся при газификации угля и торфа и консолидированные на участке Чагодощенского стекольного завода и в русле реки Чагодощи имеют в своем составе 108 органических соединений, 14 из которых являются типичными соединениями ПАУ. По степени токсичности и классу опасности смоляные отходы относятся к III классу опасности и являются источником негативного воздействия на компоненты экосистемы и биологические виды.

2. По итогам геофизического опробования территории участка и русла реки Чагодощи, выявлено неравномерное распределение смоляных отходов в понижениях рельефа на участке и русле реки, а также присутствие смоляных толщ за границами основных участков скопления смоляных отходов, что может указывать на способность отхода к слоевым миграциям.

3. Вертикальная миграция загрязнителя в почву и далее в подстилающие породы удовлетворительно описывается одномерным уравнением конвективной диффузии с учетом кинетики сорбции загрязнителя твердой фазой почв и подстилающих пород. При этом миграция загрязнителей возможна только непосредственно вблизи смоляных озер и загрязненной прибрежной части. Предварительные результаты, полученные для загрязнителей, источником которых являются смоляные отходы Чагодощенского стекольного за-

вода, показывают, что критическая глубина проникновения фронта загрязнителя составляет 10–15 м.

4. Анализ термодеструкционных установок показал, что производительность уменьшается с ростом влажности. На начальных этапах, при влажности до 20 %, производительность находится на уровне около 4,5–5 т/ч, но по мере увеличения влажности материала она плавно снижается. Наблюдается сильное снижение после превышения уровня влажности в 20 %. В диапазоне от 20 % до 40 % производительность падает примерно в два раза – с 4 т/ч до 2 т/ч, что указывает на значительное влияние влажности на эффективность работы установки. При высоких уровнях влажности, от 60 % до 80 % и выше, производительность становится минимальной.

5. Ликвидация смоляных отходов методом пароплазменной газификации позволит значительно снизить выбросы в атмосферный воздух загрязняющих веществ, что подтверждено проведенным экспериментом на более упрощенном варианте термической деструкции. Зольный остаток от техногенных отходов является нетоксичным, относится к IV классу опасности и может быть использован для обратной засыпки. Деятельность по отработке техногенного месторождения ПАУ рационально вести по типу открытых горных работ.

6. Применение пароводяной электродуговой плазмы для переработки отходов характеризуется не только высокой технологической эффективностью, но и значительными экологическими и экономическими преимуществами. Основа преимуществ этой технологии – уникальный состав плазмы, состоящей только из активных реагентов водорода и кислорода, а также ее уникальные физико-химические свойства, включая экстраординарно высокую температуру, большую энтальпию и высокие транспортные характеристики водяного пара.

7. Отсутствие балластных компонентов, таких как азот, позволяет паровой плазме достигать высокой теплотворной способности процессного

синтез-газа ($CO + H_2$), исключая образование азотсодержащих соединений, в частности оксидов азота (NO_x), и других трудно удаляемых токсичных газов, таких как свободный хлор, соединения серы и фосфора. Благодаря этому процесс минимизирует загрязнение окружающей среды вредными выбросами. Дополнительно пароводяная плазма сводит к минимуму образование диоксинов при обработке хлорсодержащих отходов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов, В. А. Исследование воздушно-плазменной газификации биомассы по обращенной схеме: 01.04.13: дис. ... канд. техн. наук. Институт электрофизики и электроэнергетики РАН. – СПб., 2011.
2. Семенов, Д. Ф. Геология Вологодской области: монография / Д. Ф. Семенов, Д. А. Трошичев. – Вологда: ВГПУ, 2014. – 122 с. ISBN 978-5-905713-51-4.
3. Геология СССР. Том II. Архангельская, Вологодская области и КОМИ АССР / ред. изд. 3. Д. Соломатина и И. С. Власов. – М., 1963. – 1105 с.
4. Геологическое строение и полезные ископаемые Вологодской области: учеб. пособие для учителей географии, студентов и краеведов / А. Л. Буслович, В. И. Гаркуша, Н. Д. Авдошенко, Л. Б. Галкина. – Вологда, 2001. – 190 с.
5. Авдошенко Н. Д. Геологическая история и геологическое строение Вологодской области: учеб. пособие / Н. Д. Авдошенко, А. И. Труфанов; Вологод. гос. пед. ин-т. – Вологда: ВГПИ, 1989. – 70 с.
6. Александрова, А. Н. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:1 000 000. Объяснительная записка к листу 0-36 (Ленинград) / А. Н. Александрова, Е. А. Петрова. – М.: Госгеолтехиздат, 1957.
7. Александрова, А. Н. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200 000, серия Тихвинско-Онежская, лист 0-36-У (Пикалево) / А. Н. Александрова, В. Ф. Корнильева, Е. А. Петрова. – М., 1979.
8. Палеогеографические особенности и абсолютный возраст максимальной стадии валдайского оледенения в районе Кубенского озера / Х. А. Арсланов, В. Г. Ауслендер, Л. И. Громова [и др.] // Докл. АН СССР, геология, т. 195. № 6. 1970.
9. Арсланов, Х. А. Радиоуглеродная хронология верхнего плейстоцена европейской части СССР (ледниковая и перигляциальная зоны) // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода / Х. А. Арсланов // Наука. – 1975. – № 43.

10. Архангельский, А. М. О границе валдайского оледенения на Русской равнине / А. М. Архангельский // Изв. ВГО, т. 88, вып. 3. – Л., 1956.
11. Валова, Т. В. Гравиметрическая карта СССР масштаба 1:200 000, лист 0-36-У1 / Т. В. Валова. – М., 1971.
12. Новые данные о развитии валдайского оледенения и его краевых зон / М. Е. Вигдорчик, В. Г. Ауслендер, О. М. Знаменская [и др.] // В кн.: Краевые образования материковых оледенений. М.: Наука, 1972.
13. Марков, К. К. Положение границы ледникового покрова в европейской части СССР в последнюю (Валдайскую) ледниковую эпоху / К. К. Марков // Пробл. физич. географ. – Вып. 9. – М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1940.
14. Альшинецкий, В. С. Отчет о доразведке и переоценке запасов известняков Марьино-Лещутинского месторождения на известь и известняковую муку для Чагодощенского известкового завода / В. С. Альшинецкий. – 1982. – № 24.
15. Березина, И. А. Отчет о результатах поисково-разведочных работ на кирпичные глины, проведенных Белозерской партией в Белозерском районе Вологодской области в 1963 и 1965 гг. / И. А. Березина. – 1968. – № 20363.
16. Березина, И. А. Отчет о результатах поисковых работ на металлургические доломиты, проведенных в Чагодощенском и Вытегорском районах Вологодской области в 1962–1963 гг., и предварительной разведки Новинкинского месторождения доломитов / И. А. Березина. – 1974. – № 18733.
17. Березина, И. А. Отчет о результатах поисково-разведочных работ на карбонатное сырье для известкования кислых почв, проведенных Белозерской партией в Вашкинском и Белозерском районах Вологодской области в 1963–1964 гг. / И. А. Березина. – 1954. – № 19579.
18. Отчет о результатах поисков месторождений гравийно-песчаного материала для нужд дорожного строительства на территории Бабушкинского, Белозерского, Вашкинского, Велико-Устюгского, Кадуйского, Нюксеницкого,

Тотемского, Усть-Кубенского, Харовского и Череповецкого районов Вологодской области за 1975–1979 гг. / Э. Н. Варфоломеева, В. И. Гаркуша [и др.]. – 1979. – № 23485.

19. Дорогова, В. Б. Формальдегид в окружающей среде и его влияние на организм (обзор) / В. Б. Дорогова, Н. А. Тараненко, О. А. Рычагова // *Acta biomedica scientifica*. – 2010. – Т. 71. – № 1. – С. 32–35.

20. Долматова, Л. А. Летучие фенолы в объектах экосистемы р. Барнаулка / Л. А. Долматова, Л. С. Егорова, М. А. Михайленко // *Известия АлтГУ*. – 2004. – № 3. – С. 10–14.

21. Яковлева, Е. В. Полициклические ароматические углеводороды в системе «почва–растение»: дис. ... канд. биол. наук. – МГУ им. М. В. Ломоносова. – Москва, 2009.

22. Содержание и состав полициклических ароматических углеводородов в гранулоденсимметрических фракциях почв парков Москвы / М. Б. Когут, Э. Шульц, А. Ю. Галактионов, Н. А. Титова // *Почвоведение*. – 2006. – № 10. – С. 1182–1189.

23. Холодняков, Г. А. Малоотходная открытая разработка полезных ископаемых с помощью гидравлических экскаваторов / Г. А. Холодняков, Е. В. Логинов, Ву Дык Туан // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2017. – № 1. – С. 357–363.

24. Фомин, С. И. Обоснование технологических решений при организации отработки рудных карьеров / С. И. Фомин // *Записки Горного института*. – 2016. – Т. 221. – С. 64–650. DOI: 10.18454/spmi.2016.5.644.

25. Анистратов, К. Ю. Анализ рынка карьерных экскаваторов и самосвалов в РФ и странах СНГ / К. Ю. Анистратов // *Горная промышленность*. – 2012. – № 2. – С. 16–19.

26. Анистратов, К. Ю. Сравнительный анализ эффективности использования канатных и гидравлических экскаваторов / К. Ю. Анистратов, С. В. Лукичев, А. Б. Исайченков // *Горный журнал*. – 2020. – № 12. – С. 74–78.

27. Анистратов, К. Ю. Проект стратегического развития УЗТМ-КАРТ-ЭКС «Освоение серийного производства карьерных гидравлических экскаваторов» / К. Ю. Анистратов, А. М. Козубский, В. О. Фурин // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XV Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург, 2017. – С. 37 – 40.

28. Лапшин, Н. С. Анализ технологических схем переработки песчано-гравийной смеси / Н. С. Лапшин // Новая наука как результат инновационного развития общества: сборник статей Международной научно-практической конференции. Ч. 5. – Уфа, 2017. – С. 173 –175.

29. Лапшин, Н. С. Принципы построения технологических схем переработки песчано-гравийных смеси на притрассовых карьерах с малой производительностью / Н. С. Лапшин, С. И. Фомин // Наука и бизнес: пути развития. – 2019. – № 102. – С. 97–101.

30. Fomin, S. I. Improving the reliability of opencast system for complex structure ore deposits / S. I. Fomin, V. V. Ivanov // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 9. – № 13. – P. 36–43.

31. Иванов, В. В. Обоснование параметров технологической схемы разработки обводненных месторождений строительного песка / В. В. Иванов, Д. О. Дзюрич // Записки Горного института. – 2022. – Т. 253. – С. 33–40. DOI: 10.31897/PMI.2022.3.

32. Логинов, Е. В. Управление параметрами карьера в целях повышения эффективности использования гидравлических экскаваторов типа обратная лопат / Е. В. Логинов, Т. А. Тюленева // Уголь. – 2022. – № 12. – С. 6–10. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-12-6-10.

33. Boom energy recuperation system and control strategy for hydraulic hybrid excavators / T. Jung, H. Raduenz, P. Krus, V. De Negri, J. Lee // Automation in Construction. – 2022. – Vol. 135. – Article 104046. DOI: 10.1016/j.autcon. 2021. 104046.

34. Vedrova, D. A. Methods to improve the waste rock dumping efficiency and reclamation under the north condition / D. A. Vedrova, S. P. Reshetnyak // IOP Conference Series. Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 539. – № 1. – Article 012037. DOI: 10.1088/1755-1315/539/1/012037.

35. Побегайло, П. А. Износ элементов карьерных экскаваторов: анализ современного состояния проблемы / П. А. Побегайло, Д. Ю. Крицкий, Т. Р. Гиль-маншина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 2. – С. 64–74. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-64-74.

36. Kholmskiy, A. V. Arrangements for increase the efficiency of mining operations on the deep ore mines / A. V. Kholmskiy, D. V. Sidorov // Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues. CRC Press. – 2019. – P. 71–74. DOI: 10.1201/9781003017226-10.

37. Yuasa, T. An optimal design methodology for the trajectory of hydraulic excavators based on genetic algorithm / T. Yuasa, M. Ishikawa // Journal of Robotics and Mechatronics. – 2021. – Vol. 33. – P. 1248–1254. DOI: 10.20965/jrm.2021.p1248.

38. Стрельников, А. В. Опыт применения обратных гидравлических лопат на разрезах ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» / А. В. Стрельников, М. А. Тюленев // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2011. – № 2(85). – С. 8–12.

39. Об определении параметров забойных блоков при ведении горных работ обратными гидравлическими лопатами / О. И. Литвин, Я. О. Литвин, М. А. Тюленев, С. О. Марков // Горная промышленность. – 2021. – № 6. – С. 76–81. DOI: 10.30686/1609-9192-2021-6-76-81.

40. Холодняков, Г. А. Определение высоты добычного забоя при разработке хвостохранилищ гидравлическим экскаватором типа обратная лопата / Г. А. Холодняков, К. Р. Аргимбаев, С. П. Решетняк // Записки Горного института. – 2012. – Т. 195. – С. 138–141.

41. Лигоцкий, Д. Н. Минимальная мощность пластов, разрабатываемых селективно с помощью гидравлических экскаваторов типа, обратная лопата / Д. Н. Лигоцкий // Записки Горного института. – 2013. – Т. 205. – С. 44–46.
42. Технология опережающей выемки наклонных и крутых угольных пластов обратными гидравлическими лопатами / А. В. Кацубин, А. А. Хорешок, М. А. Тюленев, С. О. Марков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 11. – С. 27–36. DOI: 10.26730/1999-4125-2021-3-104-112.
43. Loginov, E. Averaging the operating stripping ratio for sinking mining systems based on mathematical simulation / E. Loginov, D. Ligotsky, K. Argimbaev // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1614. – № 1. – Article 012050. DOI: 10.1088/1742-6596/1614/1/012050.
44. Исследование структурных, физико-технических и механических параметров техногенных породных массивов / С. О. Марков, М. А. Тюленев, Е. В. Мурко, О. И. Литвин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № S49. – С. 525–534. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-49-525-534.
45. Оценка прочности массива горных пород при разработке месторождений открытым способом / А. А. Павлович, В. А. Коршунов, А. А. Бажуков, Н. Я. Мельников // Записки Горного института. – 2019. – Т. 239. – С. 502–509. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.502.
46. Dynamic analysis of working device of excavator under limit digging force / X. Wang, H. Sun, M. Feng, Z. Ren, J. Liu // Journal of the Institution of Engineers. – 2021. – Vol. 102. – № 5. – P. 1137–1144. DOI: 10.1007/s40032-021-00725-4.
47. Drebenstedt, C. Korkinsk Brown coal open pit as a case study of endogenous fires / C. Drebenstedt, K. R. Argimbaev // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. – 2021. – Vol. 34. – № 1. – P. 292–304.
48. Li, Y. Multi-objective optimization and simulation of novel working mechanism for face-shovel excavator / Li Y., Mu X., Fan R. // International Journal

of Intelligent Robotics and Applications. – 2021. – Vol. 5. – № 1. – P. 1–9. DOI: 10.1007/s41315-020-00160-1.

49. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ (с изм. от 03.08.2018 г.).

50. Земельный кодекс Российской Федерации от 25 октября 2001 г. № 136-ФЗ (с изм. от 03.08.2018).

51. Водный кодекс Российской Федерации от 3 июня 2006 г. № 74-ФЗ (с изм. от 03.08. 2018).

52. Лесной кодекс Российской Федерации от 4 декабря 2006 г. № 200-ФЗ (с изм. от 03.08.2018).

53. Гражданский кодекс Российской Федерации. Часть первая от 30 ноября 1994 г. № 51-ФЗ (с изм. от 03.08. 2018).

54. Налоговый кодекс Российской Федерации. Часть первая от 31 июля 1998 г. № 146-ФЗ и часть вторая от 5 августа 2000 г. № 117-ФЗ (с изм. от 03.08.2018).

55. Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (с изм. от 29.07.2018).

56. Федеральный закон от 30 марта 1999 г. № 52-ФЗ «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» (с изм. от 03.08.2018).

57. Федеральный закон от 4 мая 1999 г. № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» (с изм. от 29.07.2018).

58. Федеральный закон от 24 июня 1998 г. № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» (с изм. от 29.07.2018).

59. Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (с изм. от 29.07.2017).

60. Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (с изм. от 02.07.2013).

61. Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 69-ФЗ «О пожарной безопасности» (с изм. от 29.07.2018).

62. Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (с изм. от 03.08.2018).

63. Федеральный закон от 4 мая 2011 г. № 99-ФЗ «О лицензировании отдельных видов деятельности» (с изм. от 03.08.2018).

64. Федеральный закон от 24 апреля 1995 г. № 52-ФЗ «О животном мире» (с изм. от 03.08.2018).

65. Закон РФ от 21 февраля 1992 г. № 2395-1 «О недрах» (с изм. от 03.08.2018).

66. Постановление Правительства РФ от 13 сентября 2016 г. № 913 «О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах» (с изм. от 29.06.2018).

67. Постановление Правительства РФ от 25 апреля 2012 г. № 390 «О противопожарном режиме» (с изменениями на 30 декабря 2017 г.).

68. Постановлени Правительства РФ от 21 мая 2007 г. № 304 «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (с изм. от 4 июня 2017 г.).

69. Постановление Правительства РФ от 6 февраля 2002 г. № 83 «О проведении регулярных проверок транспортных и иных передвижных средств на соответствие техническим нормативам выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух» (с изменениями на 5 декабря 2011 г.).

70. Постановление Правительства РФ от 3 октября 2015 г. № 1062 «О лицензировании деятельности по сбору, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению отходов I – IV классов опасности».

71. Постановление Правительства РФ от 16.02.2008 г. № 87 «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию» (с изменениями на 2 мая 2018 г.).

72. Приказ Госкомэкологии РФ от 16 мая 2000 г. № 372 «Об утверждении Положения об оценке воздействия намечаемой хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду в Российской Федерации».

73. Приказ Минприроды РФ и Роскомзема от 22 декабря 1995 г. № 525/67 «Об утверждении Основных положений о рекультивации земель, снятии, сохранении и рациональном использовании плодородного слоя почвы».

74. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 4 марта 2016 г. № 66 «О Порядке проведения собственниками объектов размещения отходов, а также лицами, во владении или в пользовании которых находятся объекты размещения отходов, мониторинга состояния и загрязнения окружающей среды на территориях объектов размещения отходов и в пределах их воздействия на окружающую среду».

75. Приказ Министерства природных ресурсов РФ от 30 сентября 2011 г. № 792 «Дополнения в федеральный классификационный каталог отходов».

76. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 4 декабря 2014 г. № 536 «Об утверждении Критериев отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду».

77. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25 ноября 2016 г. № 495 «Об утверждении Требований к регистрации объектов в государственном реестре опасных производственных объектов и ведению государственного реестра опасных производственных объектов» (с изм. от 9 апреля 2018 г.).

78. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

79. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 22.05.2017 № 242 «Об утверждении Федерального классификационного каталога отходов» (с изменениями на 28.11.2017).

80. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 06.06.2017 № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе».

81. ГН 2.1.6.3492-17 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ от 22 декабря 2017 г.) (с изм. от 31.05.2018).

82. ГН 2.1.7.2511-09 «Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве» (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 18.05.2009 № 32).

83. ГН 2.1.7.2041-06 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 19 января 2006 г.) (с изм. от 26 июня 2017 г.).

84. ГН 2.1.5.1315-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования» (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 30.04.2003 № 78).

85. ГН 2.1.5.2280-07 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования». Дополнения и изменения № 1 к ГН 2.1.5.1315-03 (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 28.09.2007 № 75).

86. СанПиН 2.1.7.1322-03 «Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 30 апреля 2003 г.).

87. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 25 сентября 2007 № 74) (с изм. от 25.04.2014).

88. СанПиН 2.1.6.1032-01 «Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 17 мая 2001 г.).

89. СанПиН 2.1.4.1110-02 «Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения» (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 14 марта 2002 г. № 10).

90. СанПиН 2.1.5.980-00 «Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 22 июня 2000 г.).

91. СанПиН 2.1.7.1287-03 «Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы» (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 16 апреля 2003 г.) (с изм. от 25.04.2007).

92. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009» (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 7 июля 2009 г. № 47).

93. СанПиН 2.2.1/2.1.1.984-00 — санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов».

94. СНиП 21-01-97* «Пожарная безопасность зданий и сооружений» (приняты Постановлением Минстроя РФ от 13 февраля 1997 г. № 18-7) (в редакции от 19 июля 2002 г.).

95. СНиП 22-01-95 «Геофизика опасных природных воздействий» (утв. Постановлением Минстроя России от 27 ноября 1995 г. № 18-100).

96. СНиП 23-03-2003 «Защита от шума» (утв. Постановлением Госстроя России от 30 июня 2003 г. № 136).

97. СП 2.2.1.1312-03 «Гигиенические требования к проектированию вновь строящихся и реконструируемых промышленных предприятий» (утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 22 апреля 2003 г.) (с изм. от 17.05.2010).

98. СП 51.13330.2011 «Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03- 2003» (утв. Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 28 декабря 2010 г. № 825)

99. СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ – 99/2010)» (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 26 апреля 2010 г. № 40), (с изм. от 16 сентября 2013 г.).

100. СП 2.1.5.1059-01 «Гигиенические требования к охране подземных вод от загрязнения» (утв. Постановлением Главного государственного санитарного врача РФ 25 июля 2001 г.).

101. СП 11-102-97 «Инженерно-экологические изыскания для строительства» (утв. письмом Госстроя России от 10.07.97 № 9-1-1/69).

102. СП 131.13330.2012 «Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*» (утв. Приказом Минрегион России от 30 июня 2012 г. № 275).

103. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки» (утв. Постановлением Госкомсанэпиднадзора России от 31 октября 1996 № 36).

104. ГОСТ 12.1.003-83 (СТ СЭВ 1930-79) «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности» (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 6 июня 1983 г. № 2473) (с Изменением № 1 от 19 декабря 1988 г.).

105. ГОСТ 17.4.3.04-85 «Охрана природы. Почвы. Общие требования к контролю и охране от загрязнения» (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 17 декабря 1985 г. № 4046).

106. ГОСТ 30772-2001 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Термины и определения» (утв. Постановлением Госстандарта РФ от 28 декабря 2001 г. № 607-ст).

107. ГОСТ 12.2.003-91 «ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности» (утв. Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 6 июня 1991 г. № 807).

108. ГОСТ 17.2.3.01-86 «Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов» (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 10 ноября 1987 г. № 3395).

109. ГОСТ 17.1.3.06-82 «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к охране подземных вод» (утв. Постановлением Госстандарта СССР от 25.03.1982 г. № 1244).

110. ГОСТ Р 22.0.06-95 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники природных чрезвычайных ситуаций. Поражающие факторы. Номенклатура параметров поражающих воздействий» (утв. Постановлением Госстандарта России от 20 июня 1995 г. № 308).

111. ГОСТ 23337-2014 «Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий» (утв. Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации от 30.09.14).

112. Временные правила охраны окружающей среды от отходов производства и потребления (утв. письмом Минприроды РФ от 21 июля 1994 г. № 01-15/29-2115).

113. Паспорт Национального проекта «Экология».

114. Паспорт Федерального проекта «Чистая страна».

115. Паспорт Федерального проекта «Оздоровление Волги».

116. Платформа международных статистических данных [Электронный ресурс] // URL: <https://www.statista.com/statistics/276629/global-co2-emissions/>.

117. Платформа Министерства здравоохранения и социальных служб США [Электронный ресурс] // URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.gov/38250394/>.

118. Научно-популярный журнал Мир Байкала [Электронный ресурс] // URL: <https://world-of-baikal.ru/index.php/zhurnal-mir-bajkala/ekologiya/711-fenolnoe-belmo>.

119. Официальный сайт ОПЕС Annual Statistical Bulletin [Электронный ресурс] // URL: <http://publications.opec.org/asb>.

120. Научная электронная библиотека открытого доступа. Технология получения и переработки синтез-газа // П. Е. Матковский, И. В. Седов, В. И. Савченко, Р. С. Яруллин [Электронный ресурс] // URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-polucheniya-i-pererabotki-sintez-gaza/viewer>.

121. Kosov, V.F. Biomass into the synthesis gas / V. F. Kosov, V. A. Lavrenov, V. M. Zaitchenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – Vol. 653. – Conf. 1. – 012031 [Электронный ресурс] // URL: https://www.researchgate.net/publication/283818356_Simulation_of_a_process_for_the_two-stage_thermal_conversion_of_biomass_into_the_synthesis_gas.

122. Официальный новостной сайт Аргументы и факты Вологда [Электронный ресурс] // URL: <https://vologda.aif.ru/society/1220733>.

123. Экология производства // Научно-практический [Электронный ресурс] // URL: <https://www.ecoindustry.ru/news/view/4572.html>.

124. Вологодский новостной портал NEWSVO [Электронный ресурс] // URL: <https://newsvo.ru/news/82007>.

125. Официальный сайт Законодательного собрания Вологодской области [Электронный ресурс] // URL: <https://vologdazso.ru/events/106524/>.

126. Рувина, Л. Г. Анализ экологической обстановки в районе поселка Чагода Вологодской области [Текст] / Л. Г. Рувина, Э. Ф. Вайнштейн, А. В. Белый // Экология промышленного производства. – 2004. – № 4. – С. 2–7.

2004, rus. – RUMARS-ekpp04_000_004_0002_1. – Научно-техническая библиотека Уфимского государственного авиационного технического университета. – № 4. – С. 2–7.

127. Blaszczyk, E. Polycyclic aromatic hydrocarbons and PAH-related DNA adducts / E. Blaszczyk, D. Mielzynska-Svach // J. Appl. Genetics. – 2017. – Vol. 58. – № 3. – P. 321–330. [Электронный ресурс] // URL: [phttps://pub.ed.ncbi.nlm.nih.gov/27943120/](https://pub.ed.ncbi.nlm.nih.gov/27943120/).

128. International Programme on Chemical Safety (IPCS): "Environmental Health Criteria for Ethylbenzene" [Электронный ресурс] // URL: <https://inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc186.htm>.

129. Зайцева, Н. В. Нарушения белкового состава крови человека в условиях воздействия ароматических углеводородов / Н. В. Зайцева, М. А. Землянова, А. В. Тарантин // Экология человека 2013.07. Федеральный научный центр медико-профилактических технологий управления рисками здоровью населения, г. Пермь. 2013 г. [Электронный ресурс] // URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/narusheniya-belkovogo-sostava-krovi-cheloveka-v-usloviyah-vozdeystviya-aromaticheskih-uglevodorodov/viewer>.

130. Официальный сайт производителя PLAZARIUM [Электронный ресурс] // URL: <https://www.plazarium.com/ru/technology/steam-plasma/plasma-ecological-indices/>.

131. Официальный сайт производителя ООО «НПО «Декантер» [Электронный ресурс] // URL: http://www.dekanter.ru/detail.php?id=53&show_menu=0.

132. Официальный сайт производителя ООО «Эко-Спектрум» [Электронный ресурс] // URL: <https://ecospectrum.ru/insineratory/3/hurikan-2000-r/>.

133. Официальный сайт Гарант.ру информационно-правовой портал [Электронный ресурс] // URL: <https://base.garant.ru/70436464/>.

134. Официальный сайт РОСПОТРЕБНАДЗОР по Пермскому краю «Центр гигиены и эпидемиологии в Пермском крае» [Электронный ресурс] //

URL: <https://www.59fbuz.ru/press-center/news/dioksiny-i-ikh-vozddeystvie-na-zdorove-lyudey/>.

135. Сайт «ЭтоМесто» база исторических спутниковых снимков [Электронный ресурс] // URL: http://www.etomesto.ru/map-buryatiya_sputnik-1966/.

136. Спутниковая карта google. снимков [Электронный ресурс] // URL: https://www.google.ru/maps/@54.2582511,37.6231892,42593m/data=!3m1!1e3?hl=ru&entry=tту&g_ep=EgoyMDI1MDIyNi4xIKXMDS0ASAFQAw%3D%3D

137. Спутниковая карта Яндекс [Электронный ресурс] // URL: <https://yandex.ru/maps/225/russia/spunik/?ll=99.505405%2C61.698653&z=3>

138. Официальный сайт газеты Gazeta-N1(Улан-Удэ) [Электронный ресурс] // URL: <https://gazeta-n1.ru/news/32380/>.

139. Химический состав отходов шламонакопителя «Черная дыра» нижегородской области / В. В. Олискевич, В. П. Севостьянов, П. Г. Никоноров, Л. И. Руцкая [Электронный ресурс]] // URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/himicheskiy-sostav-othodov-shlamonakopitelya-chernaya-dyra-nizhegorodskoy-oblasti>.

140. Химический состав отходов шламонакопителя «Черная дыра» Нижегородской области / В. В. Олискевич., В. П. Севостьянов, П. Г. Никоноров, Л. И. Руцкая // Научно-исследовательский институт технологий неорганической, органической химии и биотехнологии [Электронный ресурс]] // URL: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=tecaqn>.

141. Официальный сайт администрации России [Электронный ресурс] // URL: <http://www.kremlin.ru/events/state-council/11519>.

142. Диффузия токсичных компонентов жидких стоков с поверхности смоляных озер в подстилающие породы / Н. М. Качурин, Г. Г. Лускин, Ю. Н. Грязнов, Д. А. Амбарцумов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2023. – № 3. – С. 550–562.

143. Логинов, Е.В. Исследование параметров технологических схем разработки месторождений песчано-гравийных смесей обратными гидравлическими лопатами / Е. В. Логинов, В. В. Вольф // Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия, Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – С. 71–84.

144. Колпашников, Г. А. Бурение инженерно-геологических скважин на строительной площадке и их опробование: пособие для студентов специальности 1-51 02 01-04 «Разработка месторождений полезных ископаемых (буровые работы)» / Г. А. Колпашников. – Минск: БНТУ, 2018. – 54 с. ISBN 978-985-550-456-7.

145. Постановление Правительства РФ от 16 августа 2013 г. № 712 «О порядке проведения паспортизации отходов I – IV классов опасности».

146. Радько, С. И. Разработка и исследование электротехнологического оборудования для переработки техногенных отходов с использованием пароводяного плазмотрона: дис... канд. техн. наук. – 2014. – 124 с.