АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»

На правах рукописи



Лабойко Роман Юрьевич

РАЦИОНАЛЬНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО МОНИТОРИНГУ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ С ГЛИНОЦЕМЕНТОБЕТОННОЙ ДИАФРАГМОЙ

Специальность: 2.1.6 – Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор технических наук,
главный научный сотрудник
С. В. Сольский

Санкт-Петербург

2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ, ОБЗОР И ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА ЗА ГРУНТОВЫМИ ПЛОТИНАМИ С ДИАФРАГМАМИ 15
1.1 Анализ специфики конструкций грунтовых плотин с различными противофильтрационными устройствами 15
1.2 Анализ нормативно-методической базы по организации натурных наблюдений на грунтовых плотинах с диафрагмами 25
1.3 Анализ средств КИА, используемых при контроле состояния грунтовых плотин 33
1.4 Обзор способов обработки результатов мониторинга за состоянием сооружений 38
1.5 Формулирование цели и задач диссертационного исследования 40
1.6 План исследования 41
1.7 Выводы по Главе 1 43
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ НИЖНЕ-БУРЕЙСКОЙ ГЭС 45
2.1 Конструктивные особенности и технология возведения грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС 45
2.2 Конечно-элементная дискретизация расчетных сечений и исходные данные 48
2.3 Методика и результаты расчета фильтрации через тело и основание грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС 50
2.4 Методика и результаты расчетных исследований НДС грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС 52
2.5 Методика и результаты расчетных исследований устойчивости грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС 55
2.5.1 Статическая устойчивость 55
2.5.2 Сейсмическая устойчивость 58
2.6 Сводная таблица прогнозных расчетных показателей 66
2.7 Выводы к главе 2 68
ГЛАВА 3 ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ С ГЦБД ИЗ БСС НИЖНЕ-БУРЕЙСКОЙ ГЭС ПО ДАННЫМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ 70
3.1 Анализ проектного и фактического составов, номенклатуры и объема КИА 70

3.1.1 Работоспособность КИА грунтовой плотины 70
3.1.2 Закладная КИА грунтовой плотины 71
3.1.3 Геодезическая КИА 73
3.2 Результаты и анализ натурных наблюдений за фильтрационным состоянием грунтовой плотины с ГЦБД Нижне-Бурейской ГЭС 74
3.3 Результаты и анализ натурных наблюдений за НДС грунтовой плотины с ГЦБД Нижне-Бурейской ГЭС 80
3.4 Сопоставление результатов натурных исследований с расчетными показателями 86
3.5 Выводы к главе 3 89
ГЛАВА 4 МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОРГАНИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН С ПФЭ В ВИДЕ ГЦБД ИЗ БСС 91
4.1 Практические рекомендации по формированию рационального принципа оснащения КИА и системы мониторинга за состоянием грунтовых плотин с ГЦБД из БСС 92
4.2 Алгоритм планирования состава и размещения КИА при проектировании и эксплуатации 99
4.3 Методика обработки и интерпретации результатов мониторинга состояния грунтовой плотины и ГЦБД 104
4.4 Выводы к главе 4 108
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМУ КОНТРОЛЮ СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН С ГЦБД ИЗ БСС 111
5.1 Перспективные методы комплексного контроля за состоянием ГЦБД из БСС 112
5.2 Характеристика проблем при монтаже КИА и организации мониторинга за состоянием грунтовой плотины с ГЦБД из БСС 115
5.3 Разработка технических решений по монтажу КИА в БСС и инструментальному контролю состояния ГЦБД из БСС 123
5.3.1 Разработка усовершенствованного способа монтажа дистанционной КИА в ГЦБД из БСС 123
5.3.2 Способ контроля деформаций в грунтовой плотине межсвайных швов ГЦБД из БСС 126
5.3.3 Способ контроля горизонтальных смещений и наклонов в грунтовой плотине ГЦБД из БСС 130
5.4 Выводы к главе 5 133
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 135
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 139

ПРИЛОЖЕНИЯ..... 164
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ГРАФИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ С ГЦБД ИЗ БСС 165
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПАТЕНТ РФ № 282267 «СПОСОБ МОНТАЖА ДИСТАНЦИОННОЙ КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ В БУРОСЕКУЩИЕСЯ СВАИ ГЛИНОЦЕМЕНТОБЕТОННОЙ ДИАФРАГМЫ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ» 186
ПРИЛОЖЕНИЕ В. ПАТЕНТ РФ № 2852768 «СПОСОБ КОНТРОЛЯ ДЕФОРМАЦИЙ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ НАИБОЛЬШИХ ЗНАЧЕНИЙ РАСКРЫТИЯ МЕЖСВАЙНЫХ ШВОВ ГЛИНОЦЕМЕНТОБЕТОННОЙ ДИАФРАГМЫ ИЗ БУРОСЕКУЩИХСЯ СВАЙ В ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЕ» 187
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. СПРАВКИ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ..... 188
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. СТО РУСГИДРО 01.01.153-2025 «МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО СОЗДАНИЮ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕСТНЫХ ПОЛИМИНЕРАЛЬНЫХ ГЛИН»..... 193

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследований

Обеспечение надёжности и безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений (ГТС) требует создания и развития эффективных систем мониторинга, позволяющих своевременно выявлять изменения технического состояния и принимать обоснованные управленческие решения. Среди таких сооружений особое место занимают грунтовые плотины с противофильтрационными элементами (ПФЭ) типа «стена в грунте», в том числе с глиноцементобетонной диафрагмой, выполняемой из буросекущихся свай (ГЦБД из БСС) [51, 52]. Технология БСС широко применяется в строительстве для укрепления оснований и фундаментов зданий и сооружений. В мировой и отечественной практике БСС успешно применялись не только на новом строительстве (Рогунская ГЭС, Нижне-Бурейская ГЭС, Белопорожские МГЭС), но и при реконструкции и ремонте ГТС для восстановления противофильтрационного контура сооружения (плотина Курейской ГЭС). Данная технология нашла свое применение в горнодобывающей промышленности (дамба ГОК «Удокан»), при устройстве ПФЭ перемычек (котлован Нижне-Бурейской ГЭС, сухой док ЦСКМС в Белокаменке) и др. Однако несмотря на перспективы применения в гидротехническом строительстве, при проектировании и организации мониторинга таких сооружений выявлен ряд нерешенных проблем, что объясняет повышенные требования как к строительству сооружения, так и к организации мониторинга при его эксплуатации, к составу и размещению контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), а также к технологиям сбора, обработки и интерпретации данных.

Действующая нормативно-методическая база в области мониторинга ГТС в значительной степени ориентирована на традиционные типы грунтовых плотин и ПФЭ. Вопросы, связанные со спецификой конструкций с ГЦБД из БСС, отражены фрагментарно и не обеспечивают в полной мере методическое сопровождение разработки и эксплуатации современных систем мониторинга. Например, ГОСТ Р

58719-2019 [20] определяет перечень и объем КИА для грунтовых плотин в целом, не разделяя по типам ПФЭ или геометрическим параметрам, а ГОСТ Р 57793-2025 [19] предусматривает перечень инструментальных наблюдений как за телом плотин, так и за ПФЭ.

Практика показывает, что выбор контролируемых параметров, конфигурации КИА, технологий сбора и обработки информации во многом осуществляется на основе инженерного опыта и локальных решений.

С развитием и внедрением в практику строительства грунтовых ГТС инновационных материалов и технологий, возникает необходимость в пересмотре и совершенствовании методов ведения мониторинга [52, 72, 50], так как традиционные методы и средства контроля не позволяют в полной мере отразить специфику их работы, оценить их состояние, эффективность действия, локализовать проблемные зоны и участки.

Анализ многолетней работы системы мониторинга на грунтовой плотине с ГЦБД из БСС Нижне-Бурейской ГЭС позволил систематизировать и обобщить специфику ее работы и выявить системные недостатки, не позволяющие в должной мере контролировать некоторые параметры работы ГЦБД из БСС.

В этих условиях разработка и обоснование технических и методических решений, обеспечивающих рациональную организацию мониторинга грунтовых плотин с ГЦБД из БСС, включая алгоритмы формирования состава наблюдений, архитектуру систем КИА, а также алгоритмы обработки и интерпретации получаемых данных с учётом имеющихся расчётных и натурных сведений о работе сооружения представляется актуальной.

Степень разработанности темы исследований

Глиноцементобетон как достаточно сложный композитный материал, позволяет проектировать ПФЭ с различными прочностными, деформационными и фильтрационными характеристиками в зависимости от входящих в состав компонентов.

Изучением напряженно-деформированного состояния (НДС) занимались ученые М.П. Саинов, А.С. Бестужева, Л.Н. Рассказов, А.В. Радзинский,

Ф.В. Котов, Г.В. Денисов и другие [7, 110, 98, 97, 90], деформационные и прочностные характеристики грунтовых плотин с ПФЭ из глиноцементобетона исследовали С.В. Сольский, А.С. Величко, М.Г Лопатина, Р.Н. Орищук, Э.С. Аргал, В.М. Королев, К.П. Кудрин, О.Е. Смирнов, Л.М. Дерюгин и другие [6, 22, 25, 32, 119].

Вопросам конструирования ПФЭ в виде «стена в грунте», в том числе из глиноцементобетона, посвящали свои работы Л.Н. Рассказов, Н.А. Анискин, В.В. Толстиков, В.Л. Мильцин, В.Н. Киселев, С.В. Сольский, Р.Н. Орищук, В.Г. Радченко, В.А. Пехтин, А.А. Каган, Н.Ф. Кривоногова, В.В. Борзунов, Н.А. Вульфович, Е.А. Кадушкина, И.Н. Смирнов, Б.Н. Юркевич, А.Ш. Мусаев, Л.М. Дерюгин, В.И. Федосеев и другие [55, 70, 67, 120, 92].

Отдельно самозалечивание конструктивных элементов грунтовых ГТС, в том числе с ПФЭ из ГЦБ освещали Р.Н. Орищук, О.Н. Котлов, М.Г. Лопатина, Н.Л. Орлова, С.Г. Гордиенко, Ю.Ю. Савельева, Е.Е. Легина, Л.А. Фролова, Н.Н. Иванов, Г.Х. Праведный, и другие [40, 29, 18, 17, 33].

Особенности методов мониторинга безопасности ГТС и предъявляемые к ним требования нормативных документов, в том числе в отношении грунтовых плотин, освещали в своих трудах такие авторы, как, Е.Н. Беллендир, О.Д. Рубин, В.С. Кузнецов, Е.А. Филиппова, А.А. Готлиф, В.С. Прокопович, А.С. Антонов, О.М. Финагенов, А.А. Каган, Н.Ф. Кривоногова, О.Д. Рубин, П.В. Кондратенко, А.В. Гинц, А.П. Деев, Е.З. Арифуллин и другие [63, 56, 101, 117, 34].

Комплексные экспериментальные и аналитические исследования, включая результаты трудов Р.Н. Орищука [73, 69], нашли отражение в коллективной монографии С.В. Сольского, Р.Н. Орищука, А.С. Величко «Применение глиноцементобетона в практике гидротехнического строительства» [120]. В части системы мониторинга авторами освещен вопрос контроля фильтрационного состояния грунтового сооружения с ПФЭ из ГЦБ.

Значительный вклад в развитие исследований о свойствах, возможностях применения в гидротехническом строительстве, конструировании ГТС с ГЦБ внесли специалисты следующих ведущих организаций отрасли: НИУ МГСУ, АО

«ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», АО «Ленгидропроект», ООО «СПИИ «Гидроспецпроект», АО «Институт Гидропроект» и другие.

Непосредственным возведением стен в грунте, в том числе в виде ГЦБД из БСС, на объектах гидротехнического и промышленного строительства занимались такие специализированные организации, как АО «ЧиркейГЭСстрой», ООО «ТКС», ООО «Техностройй», ООО «Эльбрусская горно-строительная компания», BAUER Spezialtiefbau GmbH (Германия), «Keller Group plc» (Великобритания), «Soletanche Bachy» (Франция) и другие.

Анализ как зарубежного, так и отечественного опытов строительства и эксплуатации плотин с глиноцементобетонным противофильтрационным элементом показывает, что в настоящее время отсутствует нормативно-методическая база, регламентирующая контроль как фильтрационного режима, так и деформационных процессов, возникающих в ГЦБД из БСС [52]. Технология монтажа КИА в БСС на сегодняшней день не в полной мере апробирована и нуждается в доработке, что подтверждается опытом строительства грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС.

В связи с изложенным, изучение специфики работы грунтовой плотины с ГЦБД из БСС [69, 120], а также разработка комплексного решения по совершенствованию принципов мониторинга, включая инструментальный контроль состояния такой плотины представляется актуальной научной задачей.

Целью диссертационной работы является исследование работы высокой грунтовой плотины с ГЦБД из БСС в условиях эксплуатации, а также разработка и обоснование технических и методических решений, обеспечивающих рациональную организацию мониторинга и достоверную оценку технического состояния грунтовой плотины с ГЦБД из БСС на основе использования результатов натурных наблюдений и имеющихся расчётных данных.

Объектом исследования является система мониторинга технического состояния грунтовой плотины с ПФЭ в виде ГЦБД из БСС на примере плотины Нижне-Бурейской ГЭС.

Предметом исследования являются технические и методические решения по организации мониторинга грунтовых плотин с ГЦБД из БСС, включая принципы формирования структуры и состава КИА, алгоритмы сбора, обработки и интерпретации данных, а также использование имеющихся расчётных и натурных сведений о работе сооружения в рамках указанных алгоритмов.

Задачи исследований. Исходя из актуальности проблемы и поставленной цели решались следующие задачи:

1. Сбор, анализ, систематизация информации, посвященной существующим методам мониторинга грунтовых плотин, в том числе с ПФЭ. Обобщение отечественного и зарубежного опытов проектирования, строительства и эксплуатации грунтовых плотин с ГЦБД из БСС.
2. Анализ результатов расчетных исследований состояния грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС высотой 41,5 м с ГЦБД из БСС.
3. Анализ и сопоставление результатов натурных исследований, полученных в процессе эксплуатации грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС, с расчетными показателями.
4. Разработка методических подходов к организации мониторинга грунтовой плотины с ГЦБД из БСС, содержащих принципы обработки и интерпретации результатов мониторинга и использования совокупности расчетных и натурных данных при оценке технического состояния сооружения.
5. Разработка и обоснование подходов к оснащению КИА грунтовых плотин высотой более 40 м с ГЦБД из БСС, включающих технологию монтажа, размещения КИА и контроль деформаций ГЦБД из БСС.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые на основе ряда данных мониторинга за состоянием высокой грунтовой плотины с ГЦБД из БСС получена и интерпретирована картина формирования фильтрационного состояния и НДС грунтовой плотины в условиях эксплуатации, что позволило выявить недостатки существующих нормативных подходов к мониторингу таких сооружений и обосновать необходимость контроля деформационных процессов, влияющих на работоспособность ПФЭ.

2. Разработан и научно обоснован комплексный методический подход к организации мониторинга грунтовых плотин с ГЦБД из БСС, основанный на совместной интерпретации расчетных прогнозных показателей и натурных данных, включающий принципы выбора диагностических створов, требования к составу и размещению КИА и алгоритм обработки массива данных наблюдений.

3. Предложены и запатентованы новые технические решения по технологии монтажа, размещению КИА в БСС и контролю деформаций ГЦБД из БСС, обеспечивающие получение достоверных данных мониторинга.

Новизна работы подтверждается получением и анализом натурных данных о работе ГЦБД из БСС в составе высокой грунтовой плотины в условиях эксплуатации, ранее не представленных в отечественной практике, полученными патентами и использованием материалов разработок автора в части оснащения скважин КИА в отраслевом стандарте СТО РусГидро 01.01.153-2025.

Теоретическая значимость работы:

1. Проведен анализ существующей нормативно-методической документации по мониторингу грунтовых плотин с ГЦБД из БСС и опыта их мониторинга, на основании которого выявлены недостатки в организации мониторинга и технических решений в части оснащения КИА таких плотин.

2. Выполнен анализ данных мониторинга за состоянием конкретной грунтовой плотины с ГЦБД из БСС в процессе более чем пятилетней эксплуатации и сопоставление с расчетными значениями.

3. Выполнено обоснование принципов ведения мониторинга за состоянием грунтовой плотины с ГЦБД из БСС, включающего набор контролируемых параметров, порядок размещения створов и алгоритм интерпретации, основанный на совместном использовании расчетных и натурных данных.

Практическая значимость работы:

1. Результаты исследований использованы при составлении эксплуатационной документации для оценки технического состояния и обеспечения надежной эксплуатации грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС.

2. Авторские разработки в части оснащения скважин ПФЭ дистанционными датчиками КИА вошли в СТО РусГидро 01.01.153-2025 «Методические указания по созданию противофильтрационных элементов гидротехнических сооружений с использованием местных полиминеральных глин».

3. Разработана технология монтажа КИА в ГЦБД из БСС, в основе которой лежит принцип изоляции датчиков КИА от поступающей ГЦБД смеси, обеспечивающий проектное положение КИА в процессе монтажа и сохранность КИА при бетонировании скважины.

4. Разработан способ контроля деформаций в грунтовой плотине межсвайных швов ГЦБД из БСС, позволяющий обеспечить контроль целостности диафрагмы в наиболее подверженных деформациям участках и распространить область контроля на всю длину диафрагмы.

Методология и методы исследования. При работе над диссертацией применялся комплекс методов, включающий: сравнительный анализ нормативной и научно-технической литературы; статистическую обработку длительного ряда натурных наблюдений за состоянием грунтовой плотины с ГЦБД из БСС с оценкой напряженно-деформированного состояния и фильтрационного режима.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты комплексного исследования состояния грунтовой плотины с ГЦБД из БСС и сопоставление результатов расчетных и натурных исследований для оценки фильтрационного состояния и НДС плотины с ГЦБД из БСС.

2. Методические рекомендации по развитию и совершенствованию рационального принципа мониторинга за состоянием грунтовой плотины с ГЦБД из БСС, обеспечивающего повышение достоверности оценки технического состояния сооружения.

3. Новые технические решения по технологии монтажа и размещению КИА в ГЦБД из БСС, обеспечивающей получение достоверных данных о деформациях и раскрытии межсвайных швов, а также контролю деформаций ГЦБД из БСС.

Достоверность предлагаемых решений основана на использовании анализа данных мониторинга за состоянием грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС в строительный период и период штатной эксплуатации. Обоснованность данных, полученных в ходе мониторинга, базируется на использовании прошедших метрологическую аттестацию средств измерения, унификации подходов к проведению замеров и обработки массива полученных данных. Анализируемые в диссертации численные расчеты проводились с применением лицензированного программного продукта GeoStudio.

Личный вклад автора. Автор лично выполнял аналитический обзор, постановку цели и задач исследования. Осуществлял выезды на гидроузел Нижне-Бурейской ГЭС в период строительства для монтажа КИА в БСС и в период эксплуатации для сбора данных натурных наблюдений, выполнял их обработку и анализ при комплексном исследовании, формировал задачу по численному моделированию, определяя исходные данные, разрабатывал методический подход к организации мониторинга и технические решения по технологии монтажа и контролю деформаций в ГЦБД из БСС, оформив патенты на изобретения.

Внедрение результатов исследований

Автором непосредственно осуществлялся монтаж КИА в скважины ГЦБД из БСС, в рамках сопровождения строительно-монтажных работ на Нижне-Бурейской ГЭС, рекомендации по корректировке схем монтажа КИА учтены при оснащении грунтовой плотины КИА, а результаты исследований автора в части оснащений скважин КИА вошли в стандарт ПАО «РусГидро» СТО РусГидро 01.01.153-2025 «Методические указания по созданию противофильтрационных элементов гидротехнических сооружений с использованием местных полиминеральных глин».

Разработаны и запатентованы технические решения по монтажу КИА в ГЦБД из БСС, а также контролю деформаций в грунтовой плотине с ГЦБД, выполненной в виде БСС.

В дальнейшем представленные в работе результаты исследований могут быть востребованы как в проектных решениях, так и в ходе эксплуатации

различных грунтовых ГТС с ГЦБД из БСС, геотехнических массивов и оснований намывных ГТС с целью всестороннего мониторинга их состояния.

Апробация работы была выполнена путём публикации статей в научных журналах и в виде докладов на научных конференциях.

В числе мероприятий, где докладывались материалы работы:

− XV, XVI и XVII научно-техническая конференция «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии (АО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», СПб, 2023–2025 гг.);

− VIII Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства» (НИУ МГСУ, Москва, 2025 г.);

− юбилейная международная конференция, посвященная 110-летию создания гидротехнической лаборатории им. проф. В.Е. Тимонова (2017);

− IV и VI международная научно-практическая конференция «Гришанинские чтения – водные пути и русловые процессы, гидротехнические сооружения водных путей» (ФГБОУ «ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова», СПб, 2021, 2023 гг.);

− научно-практическая конференция «Проблемы строительства и гидравлики гидротехнических сооружений» (ФГБОУ «ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова», СПб, 2024 г.).

Публикации. Основные результаты диссертационного исследования отражены в 10 научных работах, 6 из которых в виде статей опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук. Также автором получено 2 патента на изобретения Российской Федерации.

Объём и структура диссертации. Структурно диссертация представлена введением, пятью главами, заключением, списком использованных источников и пятью приложениями. Объем работы составляет 163 страницы машинописного текста, включая 36 рисунков и 14 таблиц. Список литературы состоит из 176 источников, в том числе 38 иностранных источников.

Диссертационная работа выполнена в 2019–2026 гг. в отделе «Натурные исследования и техническая диагностика грунтовых гидротехнических сооружений» под руководством доктора технических наук С.В. Сольского.

Глава 1 Анализ, обзор и перспективы методов мониторинга за грунтовыми плотинами с диафрагмами

1.1 Анализ специфики конструкций грунтовых плотин с различными противофильтрационными устройствами

Грунтовые плотины как элемент напорного фронта гидроузлов занимают особое место в проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений (далее – ГТС). Противофильтрационные элементы (далее – ПФЭ) служат для уменьшения фильтрационных потерь через тело и основание плотины и повышения устойчивости ГТС. Эффективность ПФЭ грунтовой плотины (вне зависимости от его конструктивных особенностей или разновидности материала) заключается в обеспечении требуемой величины гашения напора и в поддержании данной величины неизменной на протяжении всего срока эксплуатации [15, 48].

Вместе с традиционными ПФЭ, такими как: зуб, понур, инъекционные завесы (в составе элементов подземного контура), ядро, экран, диафрагма (как элементов тела плотины), их комбинациями из водоупорных грунтов – в настоящее время особенно распространены диафрагмы, выполненные из множества различных материалов [48], например: каменная кладка, дерево, бетон и железобетон, геосинтетические материалы, металл, асфальтобетон, глиноцементобетон и др. Все эти материалы существенно различаются друг от друга по фильтрационным и деформационным характеристикам. Любой из указанных выше типов ПФЭ актуален в конкретных сооружениях и условиях (климатических и эксплуатационных), при обеспечении требований по безопасной и надёжной эксплуатации ГТС и технико-экономическом обосновании [48].

Применение бетонных диафрагм в грунтовых плотинах известно с конца XIX века [15, 105, 61]. Железобетонная диафрагма впервые была применена в плотине Yuba (Sevier Bridge) высотой 18 м в 1907 г. [15, 61], в 1913-1916 гг. была

наращена на 9 м по высоте, а в 1951 г. успешно выдержала землетрясение. В 1915 г. в Швеции за северным полярным кругом была возведена каменно-земляная плотина Porjus с бетонной диафрагмой и высотой 17,5 м [4, 59, 61], а в последующем и плотина Harsprenget, ставшая последней в Швеции плотиной с бетонной диафрагмой [59, 153, 94]. В другой части света в Австралии в первой половине XX века также были построены гидроузлы с грунтовыми плотинами с бетонными диафрагмами: в 1927 г. гидроузел Eildon, в 1928 г. гидроузел O'Shannassy [1, 94].

Земляная плотина Southborough (Sudbury), эксплуатируемая в настоящее время, подтверждает надёжность принятых технических решений [61, 174].

Успешный опыт применения и эксплуатации грунтовых плотин с железобетонными ПФЭ, десятилетиями применялся на сооружениях по всему миру. Тем не менее, одной из серьезных проблем для них является трещинообразование в процессе эксплуатации, вследствие чего при проектировании требуется предусматривать сложные шарнирные соединения с основанием [61], при эксплуатации – трудозатратные и дорогостоящие ремонтно-восстановительные мероприятия.

Одним из первых упоминаний плотин с ПФЭ, выполненным из каменной кладки, является плотина Williamsburg, возведенная в 1865 г. [105, 175]. Заделка пустот при каменной кладке осуществлялась с использованием песчано-известкового раствора. Ошибки проектирования и несовершенство технологий при строительстве привели к фильтрационной эрозии и в конечном итоге обрушению низового откоса в 1874 г. [175]. В конце XIX – начале XX возведены еще несколько грунтовых плотин: Castlewood (разрушена в 1932 г.), Big Brook, гидроузлы Titicus и New Croton [58, 61, 175]. Анализ существующего опыта показал, что широкого применения ПФЭ из каменной или кирпичной кладки в гидротехническом строительстве не нашли ввиду трудоёмкости строительства, трещинообразования, способствующего снижению показателя водонепроницаемости конструкции. Одним из последних примеров является плотина Chang [165], построенная в 1963 г. и высотой 15 м.

Деревянные элементы в качестве ПФЭ в грунтовых плотинах использовалось как для строительства грунтовых плотин с деревянными экранами (например, Маткожненская, Широковская, Малоульбинская плотины [94]), так и для устройства диафрагм (Верхне-Кумахская плотина). К одним из преимуществ относятся сокращение сроков и стоимости строительства и доступность материала.

В связи с недолговечностью дерева как материала в условиях эксплуатации гидротехнических сооружений, со временем он был практически полностью вытеснен другими более совершенными материалами и в настоящее время ПФЭ из дерева практически не применяются [94].

В отечественной и зарубежной практике строительства грунтовых плотин применение ПФЭ из полиэтиленовых материалов ограничено отдельными примерами (в том числе из пластмасс, геомембран и других синтетических материалов). Наиболее крупным ГТС с ПФЭ в виде полиэтиленовой пленки, является плотина Атбашинской ГЭС в Киргизии [89]. Самая высокая грунтовая плотина Бовилл высотой 91 м с экраном из геомембраны эксплуатируется с 1996 г. в Албании [89, 53, 143]. В большинстве своем наиболее перспективной областью применения полимерных, геосинтетических материалов является ПФЭ дамб и ложа хвостохранилищ, напорных бассейнов, каналов [109, 138]. Так, например, в Казахстане при строительстве дамбы ложа золошлакоотвала Аксукской ГРЭС планируется устройство комбинированного ПФЭ из геомембраны на верховом откосе и «стены в грунте» из ГЦБ вдоль подножия ограждающей дамбы [137]. В свою очередь начальная эксплуатация напорного бассейна с экраном из геомембраны Зарагижской ГЭС сопровождалась повреждением экрана на участке сопряжения с суглинистым дном бассейна [65]. Таким образом, при создании напорного фронта с грунтовым сооружением, в первую очередь, сложность вызывает проектирование сопрягающих узлов и дальнейший ремонт потенциально опасных участков.

Вариант строительства плотин с ПФЭ в виде металлической диафрагмы рассматривается в большей степени в районах Крайнего Севера ввиду следующих

технологических преимуществ: простота технологии отсыпки плотины и возведения ПФЭ, упрощение требований к дорогостоящим обратным фильтрам и грунтам переходных слоев, отсутствие сезонности работ и в конечном итоге сокращение сроков строительства. При этом основными недостатками такого типа плотин остаются относительно высокая стоимость металла, коррозионный износ и отсутствие эффективных методов борьбы с ней (ремонтных мероприятий) в условиях эксплуатации [89]. Наиболее известными плотинами с применением металлических тонких стенок (диафрагм) являются плотины Серебрянской ГЭС-2 (64 м) [89], Угличской ГЭС (27 м), Рыбинской ГЭС (30 м) [116], плотина №1 Ижорского гидроузла и др., успешно эксплуатируемые в настоящее время.

Еще одним способом создания противофильтрационного контура в теле грунтовой плотины является метод возведения диафрагмы в виде «стена в грунте». Метод заключается в устройстве в массиве грунта в заданных границах материала с заданными характеристиками, отвечающими требованиям фильтрационной прочности и водопроницаемости. Заполнение материала выполняется механизировано траншейным (с помощью гидрофрезы) или скважинным (с помощью буровой установки) способами [122, 115,42].

Траншейные стены возводятся в два этапа. Первый заключается в разработке траншеи под защитой бентонитового раствора, предотвращающего обрушение стенок и поступлению в траншею воды. Второй – в заполнении траншеи водонепроницаемым материалом [73, 112]. Траншейным способом были возведены ПФЭ таких плотин, как Керхе (Иран) [160], Перибонка (Канада) [139], Арминоу (Кипр) [141] и др., а также выполнен ремонт плотины Фонтенель (США) [146, 140].

Диафрагма в виде «стены в грунте», возводимой скважинным способом, состоит из отдельных скважин двух очередей, частично пересекающихся друг с другом (опережающие и пересекающие скважины) [89]. Бурение опережающих скважин производится с использованием обсадных труб, предотвращающих обвал грунта. В последующем выполняется заполнение скважины водонепроницаемым материалом с одновременным извлечением обсадных труб. Далее выполняется

аналогичное бурение пересекающих скважин, образуя единую буросекущуюся стенку. Впервые диафрагма из БСС была выполнена в основании плотины Хэйлис (США) в 1940–1944 гг. [42, 135].

Геометрические параметры «стены в грунте», такие как глубина, длина траншей, диаметр и шаг скважин БСС, определяются при разработке проекта в зависимости от геологического строения основания, климатических условий эксплуатации, а также от действующих норм [103].

В качестве материала «стены в грунте» наибольшее применение в практике гидротехнического строительства нашли такие материалы, как асфальтобетон и глиноцементобетон.

Благодаря опыту эксплуатации ГТС, исследованиям автора, а также результатам исследований С.В. Сольского, Р.Н. Орищука, Л.М. Дерюгина, М.П. Саинова, Л.Н. Радзинского, А.В. Рассказова и других, можно заключить, что ПФЭ, возведенный методом «стена в грунте», характеризуется высокой степенью гашения фильтрационного потока, достаточной простотой технологии ее устройства, а при выполнении «стены в грунте» из глиноцементобетона, характеризуется и возможностью изменения физико-механических характеристик ее состава [103, 118, 171, 96,108].

Асфальтобетон – материал, состоящий из множества компонентов, получил широкое распространение в гидротехническом строительстве с середины XIX века. В состав асфальтобетонной смеси включается вяжущее вещество (как правило, битум) и заполнители. В качестве заполнителя выступает щебень, гравий (крупный заполнитель), песок (мелкий заполнитель). Соотношение пропорций подбирается таким образом, чтобы обеспечить максимальную плотность и прочность итогового ПФЭ. Благодаря наличию в составе битума и высокой плотности, асфальтобетон является практически водонепроницаемым материалом, и более того способным к самозалечиванию образовавшихся трещин [164].

Впервые асфальтобетон в качестве материала диафрагмы был применен на плотине Dhunn (высота 35 м) в 1962 году [168, 164]. В истории отечественной

гидротехники наиболее высокими плотинами с асфальтобетонной диафрагмой являются плотины Ирганайской ГЭС (101 м) [39], Гоцатлинской ГЭС (69 м) [164, 3], а также возведенная каменно-набросная плотина Богучанской ГЭС (77 м) [54, 158]. Опыт строительства в суровых климатических условиях на примере Богучанской ГЭС подтверждает важность соблюдения высоких требований по укладке асфальтобетона. Виброуплотнением и укаткой для уплотняемых асфальтобетонов и укладкой нормированного слоя для литого самоуплотняемого достигается высокая степень водонепроницаемости, трещиностойкости и долговечности такого ПФЭ.

Исследования НДС плотины с асфальтобетонной диафрагмой автора диссертации, М.П. Саинова, К.М. Воробьева, Г.В. Денисова, О.Ю. Давыдкина, S Feng и др. [24, 47, 148, 164] подтвердили надежность асфальтобетонных диафрагм в качестве противофильтрационного элемента в том числе и для плотин высотой более 100 м [148, 164] Однако наряду с преимуществами грунтовых плотин с асфальтобетонными диафрагмами, существует и ряд их недостатков, таких как проблема обеспечения надежности диафрагмы в условиях больших горизонтальных смещений. При этом асфальтобетонные диафрагмы по результатам расчетов не в полной мере обеспечивают сейсмостойкость плотины [164, 86]. А для каменных плотин высотой более 200 метров выполненные исследования М.П. Саинова вовсе свидетельствуют о нецелесообразности применения асфальтобетонных диафрагм по причине неремонтопригодности и больших смещениях низовой призмы, вызывающих нарушение устойчивости верховой призмы [105].

«Стена в грунте» из глины глубиной до 17,5 м впервые была успешно выполнена в ПФЭ перемычки котлована Нижне-Камской ГЭС в 1969–1970 гг. [91]. Несмотря на гашение напора до 70% и сокращение фильтрационного расхода около 80% [91], с начала XX века [152] уже набирала популярность грунтоцементная смесь для строительства дорог и в дальнейшем впервые применена в США с целью крепления верхового откоса грунтовой плотины [152,

67, 62]. В процентном соотношении цемент составлял от 7 до 14% от веса сухого грунта [152].

Конструкция ПФЭ типа «стена в грунте» из грунтоцементных смесей в гидротехническом строительстве широкую известность обретает с 60-х годов XX века [48, 57, 67]. К плотинам с ПФЭ из грунтоцемента [93, 67] можно отнести плотины Маникуаган-3 (Канада) [147], Колбун (Чили), Бромбах [162] и другие. В истории отечественного гидротехнического строительства впервые грунтоцементная смесь была предложена при проектировании Тельмамской ГЭС в конце 80-х годов [70, 72, 134]. В качестве ПФЭ основания каменно-набросной плотины наряду с цементационной завесой предлагалось устройство «стены в грунте» из малоизученного на тот момент глиноцементобетона.

Отдельное место в проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений занимает ПФЭ в виде «стена в грунте» из глиноцементобетона, в частности выполненной способом БСС. Метод «секущихся» свай в Российской Федерации был применен в 1999 г. для ремонта аварийного участка каменно-земляной плотины Курейской ГЭС [55, 133, 22,29]. Несколько позже, в 2001 г. аналогичное решение использовалось для ремонта верховой перемычки котлована ГТС Вилюйской ГЭС-3 (Светлинской ГЭС) [67, 134].

ПФЭ из глиноцементобетонных БСС, заглубленных в водоупор на глубину до 0,5 м, был устроен в аллювиальном основании насыпной гравийно-галечниковой плотины Гоцатлинской ГЭС (2006–2016 гг.) [24, 71,47]. В теле плотины – асфальтобетонная диафрагма [47].

В земляной плотине Рогунской ГЭС на р. Вахш (Таджикистан) противофильтрационное устройство верхового банкета плотины [73] 1 очереди также выполнялось из глиноцементобетонных БСС, но заглубленных в основание на 3 м с целью перекрытия путей фильтрации в основании и бортовых примыканиях банкета [120, 134, 73,69].

В дальнейшем ПФЭ в виде ГЦБД из БСС был выполнен в перемычке строительного котлована Нижне-Бурейской ГЭС (2010-2017 гг.) с заглублением в основание на 0,5 м [32].

На фоне успешного устройства ПФЭ перемычки котлована [67, 100, 32], в последующем проекте Нижне-Бурейского гидроузла было предусмотрено выполнить ПФЭ в виде ГЦБД из БСС на всю высоту грунтовой плотины высотой 41,5 м с заглублением в скальное основание на 1,0 м [68, 71]. В последующем такое техническое решение было использовано в качестве противофильтрационного элемента (ПФЭ) перемычки сухого дока Центр строительства крупнотоннажных морских сооружений в Белокаменке, дамбы хвостохранилища горно-металлургического комбината «Удокан» [5], а также в грунтовых плотинах напорного фронта Белопорожских МГЭС [68, 52, 46].

На сегодняшний день ГЦБД из БСС в качестве ПФЭ грунтовой плотины обладает рядом преимуществ перед другими видами ПФЭ [33]: высокие темпы возведения ПФЭ сразу после отсыпки плотины под воздействием гидростатического давления, возможность изменения физико-механических характеристик ГЦБ смеси индивидуально для условий эксплуатации плотины и выполнения укладки смеси в сваи в любое время года, в том числе при значительных отрицательных температурах, не требуя устройства тепляков. Более того, современные ГЦБ смеси как материал состоят из долговечных и экологически чистых материалов, а устройство БСС отличается достаточно высокой производительностью с возможностью выполнения до 45 м в сутки БСС диаметром 1,2 м одним станком [62].

Тем не менее, ГЦБД из БСС в качестве ПФЭ грунтовой плотины к настоящему времени не нашла широкого применения в практике отечественного строительства. Основным сдерживающим фактором массового распространения ПФЭ в виде ГЦБД из БСС является недостаточная изученность работы таких ПФЭ в условиях длительной штатной эксплуатации для высоких грунтовых плотин [48], а также отмечаемая [33] сложность обеспечения необходимой ширины контакта секущих свай (наиболее тонкий участок диафрагмы) по всей высоте ПФЭ. И как следствие, отсутствует ретроспективный анализ данных натурных наблюдений за многолетний период [48].

Учитывая нормативный срок эксплуатации ГТС в 50-100 лет [127], вопрос обеспечения надежной эксплуатации сооружений с ГЦБД из БСС остается одним из важнейших в области организации натурных наблюдений на ГТС.

Основные типы материала диафрагмы, используемых в качестве однородных ПФЭ грунтовых плотин [48], приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнительная таблица материалов ПФЭ грунтовых плотин

Тип диафрагмы	Наименование материала	Преимущества	Недостатки
Жесткие диафрагмы	1. Бетон / железобетон	− Сейсмостойкость; − Устойчивость при переливе через гребень.	− Малое восприятие высоких смещений, трещинообразование, дороговизна; − Возможность нарушения сплошности; − Увеличение срока строительства.
	2. Каменная или кирпичная кладка		
	3. Дерево	− Дешевизна; − Использование местных материалов.	Недолговечность при эксплуатации в зоне переменного уровня воды
Нежесткие диафрагмы	4. Пластмасса / полиэтилен	− Водонепроницаемость материала; − Высокая химическая стойкость материала.	Сложность проектирования сопрягающих узлов и ремонт потенциально опасных участков
	5. Металл	− Простота технологии возведения; − Отсутствие сезонности работ; − Сокращение сроков строительства.	− Малая ремонтопригодность; − Коррозионный износ ПФЭ.
	6. Асфальтобетон	− Гибкость материала; − Строительство в суровых климатических условиях; − Дешевизна материала	Сложность ремонта
	7. «Стена в грунте» из глиноцементобетона, выполненная способом: 7.1. Захватки / Панели 7.2. Буросекущиеся сваи	− Высокий темп строительства, в том числе в условиях низких температур и под воздействием напора на сооружение; − Возможность возведения в проницаемых основаниях; − Эффективное решение при ремонтных работах; – Сокращение сроков производства работ; − Высокая ремонтопригодность; − Высокая степень гашения напора; − Управляемость физико-механических характеристик путем подбора компонентов состава смеси.	− Сравнительно высокая стоимость компонентов, входящих в состав смеси; − Недостаточная изученность работы ПФЭ в условиях эксплуатации для плотин выше 15 м.

В результате анализа конструкций грунтовых плотин с однородными ПФЭ можно сделать следующие выводы:

1. Как в отечественной, так и в зарубежной практике гидротехнического строительства существует постоянная тенденция совершенствования строительных материалов и инженерных решений.

2. Одним из наиболее совершенных ПФЭ для грунтовых плотин служит технология «стена в грунте», не лишенная, однако, недостатков, но эффективно перекрывающая фильтрационные потоки как в теле плотины, так и в ее основании.

3. Проведенный сравнительный анализ (таблица 1.1) демонстрирует, что технология «стена в грунте» в виде ГЦБД из БСС обладает комплексом преимуществ перед традиционными ПФЭ, такими как темпы возведения, надежность их работы в разных климатических условиях, управляемость деформационно-прочностными характеристиками ГЦБ как материала ПФЭ, высокая ремонтопригодность. Это свидетельствует о перспективном применении ГЦБ в качестве одного из лидирующих материалов при проектировании конструкции грунтовой плотины. При этом сдерживание темпов возведения грунтовых плотин с ГЦБД из БСС обусловлено недостаточной изученностью их работы в условиях длительной эксплуатации, что и определяет актуальность настоящего исследования.

1.2 Анализ нормативно-методической базы по организации натурных наблюдений на грунтовых плотинах с диафрагмами

В нормативно-методической документации, выпущенной в Российской Федерации и посвященной натурным наблюдениям (мониторингу) за состоянием грунтовых плотин, отсутствуют единые регламентированные требования к организации наблюдений и размещению КИА на грунтовой плотине в зависимости от типа ПФЭ [52, 46].

Стоит отметить, что в действовавших до 2008 года «Правилах организации и проведения натурных наблюдений и исследований на плотинах из грунтовых материалов» (РД 153-34.2-21.546-2003) в диафрагмах из железобетона или металла рекомендовалось в процессе строительства устанавливать преобразователи линейных деформаций типа ПЛДС или ПЛДСН для определения напряжений в материале.

Постоянная разработка новых строительных материалов и совершенствование технологий их применения рождает необходимость в пересмотре методов контроля за их состоянием.

Большой вклад в разработку методических рекомендаций по организации и ведению натурных наблюдений на грунтовых плотинах был внесен АО »ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» [76, 77,78]. В.Н. Жиленковым, О.Г. Марголиной и Л.Е. Каныгиным основной уклон был сделан на фильтрационный и температурный режимы [76]. В рекомендациях В.С. Кузнецова [77] подробно описан принцип ведения визуальных наблюдений за состоянием грунтовых плотин. В [130, 78] под руководством А.Г. Василевского в перечне основных контролируемых показателей состояния грунтовых плотин наряду с деформациями, фильтрационными характеристиками, температурным режимом с 2001 г. упоминается напряжение в упорных призмах и ПФЭ плотин I и II классов. В разработанном стандарте [130] основное внимание уделено требованиям по организации и проведению регулярных наблюдений, их разновидностям и периодичности.

С внедрением в отечественную практику глиноцементобетона в качестве ПФЭ грунтовых плотин, возникла необходимость в актуализации нормативной базы по организации натурных наблюдений на грунтовых плотинах.

Разработанный в 2017 г. и актуализированный в 2023 г стандарт [131] впервые осветил способы мониторинга за состоянием грунтовой плотины с ГЦБД из БСС. С учетом разработанных патентов [79, 80, 81] были предложены четыре способа контроля фильтрационной прочности ПФЭ [50]:

- определение расхода профильтровавшейся воды;

− определение температуры окружающей среды;

− определение электрического сопротивления геофизическим методом (наведенное поле);

− определение скорости прохождения сейсмической волны геофизическим методом.

На сегодняшний день основной документацией, регламентирующей порядок и состав мониторинга на грунтовых плотинах, являются:

1. СП 39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов» [126]. В 2019 г. с учетом имеющегося ряда данных натурных наблюдений и выполненных лабораторных исследований приказом Минстроя России от 24.01.2019 г. N 41/пр были внесены дополнения, касающиеся ПФЭ в виде ГЦБД из БСС [48, 50]. Изменения относились непосредственно к подбору состава глиноцементобетонной смеси, работам по возведению БСС, а также контроля состояния ГЦБД из БСС. При этом предусматриваемая система мониторинга грунтовой плотины охватывала лишь контроль фильтрационного состояния и полностью соответствовала предложениям, ранее изложенным в СТО ВНИИГ 04.12.04-2.2023 [131].

2. СТО 70238424.27.140.035-2009 «Мониторинг и оценка технического состояния гидротехнических сооружений в процессе эксплуатации. Нормы и требования» [130]. Стандарт регламентирует правила размещения КИА в ГТС и в грунтовой плотине в частности, требования по организации и составу натурных наблюдений в системе мониторинга [46]. Однако стандарт не устанавливает специальные требования к составу, размещению и назначению КИА для плотин с ГЦБД из БСС, что создает методический пробел в части контроля деформационных процессов диафрагмы.

3. ГОСТ Р 57793-2025 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Гидравлические и гидроаккумулирующие электростанции. Гидротехнические сооружения. Мониторинг и оценка технического состояния в процессе эксплуатации. Основные положения» [19]. Актуализированный в 2025 г. ГОСТ в число инструментальных наблюдений

включает контроль эффективности работы ПФЭ, НДС сооружения, противофильтрационных устройств и основания, а также необратимых раскрытий швов. При этом отсутствуют специальные требования к такому виду ПФЭ как ГЦБД из БСС.

Методы контроля ПФЭ в виде ГЦБД из БСС, учтенные в действующей нормативной базе [126, 130, 131], направлены на определение мест протечек в ПФЭ и количества профильтровавшейся через него воды [48, 50]. Общие сведения по мониторингу грунтовых плотин нормативной базы приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Отечественная нормативно-методическая документация, посвященная мониторингу безопасности грунтовых плотин

Год	Разработчик	Авторы	Документ	Основные контролируемые параметры	Содержание
2000	ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», утвержден РАО «ЕЭС России»	д.т.н. В.Н. Жиленков, О.Г. Марголина Л.Е. Каныгин (ОАО «НИИЭС»)	П 71-2000»Рекомендации по диагностическому контролю фильтрационного режима грунтовых плотин» [76]	− фильтрационный режим; − температурный режим фильтрационного потока.	Даны рекомендации по размещению измерительных створов в грунтовой плотине. Описаны технические особенности наблюдений за фильтрационным и температурным режимами.
2000	ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», утвержден РАО «ЕЭС России»	к.т.н. В.С. Кузнецов	П 72-2000 «Рекомендации по проведению визуальных наблюдений и обследований на грунтовых плотинах» [77]	− трещинообразование; − просадки грунта; − пучение грунта; − устойчивость откосов; − фильтрационные водопроявления.	Методическое пособие охватывает комплекс визуальных натурных наблюдений на грунтовых плотинах, их обработки и интерпретации, а также методов контроля.
2001	ОАО «ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева» , утвержден РАО «ЕЭС России»	к.т.н. А.Г. Василевский д.т.н. Д.Д. Сапегин, д.т.н. В.Б. Судаков, к.т.н. В.Н. Дурчева, к.т.н. В.С. Кузнецов, к.т.н. А.М. Швайнштейн, А.Б. Векслер, А.В. Караваев, Н.В. Шубина	П 92-2001 «Рекомендации по обследованию гидротехнических сооружений с целью оценки их безопасности» [78]	− напряжение в грунте и ПФЭ; − деформации в теле плотины; − давление грунта в ядре; − фильтрационные градиенты; − трещинообразование; − температурный режим.	Описаны особенности комиссионных обследований ГТС по обеспечению их безопасной эксплуатации. Приведен перечень рекомендуемых контролируемых показателей состояния плотины. Методы и средства контроля в документе не рассматриваются.
2009	НП	Р.М. Хазиахметов,	СТО	− напряжение в ПФЭ и	Стандарт устанавливает

Год	Разработчик	Авторы	Документ	Основные контролируемые параметры	Содержание
	«Гидроэнергетика России», ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», утвержден НП «ИНВЭЛ»	к.т.н. В.С. Серков, к.т.н. Е.Н. Беллендир, к.т.н. А.Г. Василевский, к.т.н. В.С. Кузнецов	70238424.27.140.035-2009 «Гидроэлектростанции. Мониторинг и оценка технического состояния гидротехнических сооружений в процессе эксплуатации. Нормы и требования» [130]	грунте; − планово-высотные перемещения гребня и основания; − фильтрационный режим;	требования к организации системы мониторинга в период организации, составу контролируемых показателей, оснащению КИА, периодичности и методам обработки результатов мониторинга
2019	ОАО «ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева» , утвержден Приказом Минрегион России от 29.12.2011 №635/18	Авторский коллектив организации-разработчика	СП 39.13330.2012 Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84* (с Изменениями N 1, 2, 3) [126]	− фильтрационный режим; − температурный режим − определение электрического сопротивления геофизическим методом (наведенное поле) − определение скорости прохождения сейсмической волны геофизическим методом [50].	Дополнения, внесенные в СП в 2019 г. впервые содержат требования к мониторингу грунтовой плотины с ПФЭ в виде ГЦБД из БСС.
2023	АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»	д.т.н. С.В. Сольский, к.т.н. М.Г. Лопатина, А.С. Величко, Е.В. Герасимова	СТО ВНИИГ 04.12.04-2.2023 «Рекомендации по проектированию противофильтрационного элемента из глиноцементобетона» [131]	− фильтрационный режим; − фильтрационная прочность ПФЭ	В стандарте предложены способы мониторинга фильтрационной прочности ГЦБД из БСС: с помощью волоконно-оптической КИА, расходометрии и электротомографии, а также сейсмометрии.
2025	АО «ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева» , утвержден	Авторский коллектив организации-разработчика	ГОСТ Р 57793-2025 Единая энергетическая система и	− эффективность работы противофильтрационных элементов и дренажных	Указан состав визуальных и инструментальных наблюдений на грунтовых

Год	Разработчик	Авторы	Документ	Основные контролируемые параметры	Содержание
	Приказом Росстандарта от 28.05.2025 N 492-ст		изолированно работающие энергосистемы. Гидравлические и гидроаккумулирующие электростанции. Гидротехнические сооружения. Мониторинг и оценка технического состояния в процессе эксплуатации. Основные положения [19]	устройств; − фильтрационный режим сооружения, основания, береговых примыканий; − общие и относительные осадки и перемещения; − фильтрационная прочность грунтов сооружения, основания и береговых примыканий; − температурный режим сооружения, основания, берегов и водохранилища (в северных условиях); − НДС сооружения, противофильтрационных устройств и основания; − контроль необратимых раскрытий швов; − основные нагрузки и воздействия на сооружение.	ГТС, а также принципы оценки технического состояния ГТС

Выполненный анализ отечественной нормативно-методической базы показал, что при развитии инновационных материалов в качестве ПФЭ недостаточно лишь лабораторных исследований. Несмотря на успешное внедрение глиноцементобетона в качестве ПФЭ грунтовых плотин, разработку практических рекомендаций по проектированию и расчетам ГЦБД, остается существенный пробел по оснащению таких ПФЭ инструментальными средствами контроля и организации натурных наблюдений за их состоянием [68, 11, 48, 47, 71]:

1. При внедрении в строительство новых видов ПФЭ грунтовых плотин внимание, в первую очередь, уделяется проектированию, физико-механическим характеристикам материала и расчетному обоснованию сооружений. Разработка способов ведения мониторинга безопасности за состоянием таких плотин «отстает» от других нововведений.

2. Действующая нормативная документация ориентирована на контроль только фильтрационного состояния ГЦБД из БСС. Имеющийся опыт натурных наблюдений за грунтовой плотиной с ГЦБД из БСС свидетельствует об особенностях формирования НДС в условиях эксплуатации, которые необходимы для учета в нормативной документации методов контроля НДС [48].

3. Контроль горизонтальных смещений грунтовой плотины, влияющих на опасное трещинообразование ГЦБД из БСС, является существенным пробелом в существующей нормативной документации и требует дальнейшее изучение с целью совершенствования методов инструментального контроля [48].

4. Отсутствуют требования к составу КИА и методам контроля, обеспечивающим контроль за возможным раскрытием межсвайных швов или трещинообразованием. Необходимость обоснования максимального возможного раскрытия трещин в ГЦБД при конструировании плотины с ПФЭ в виде ГЦБД из БСС освещалась еще в 2017 г. при исследовании самозалечивания трещин в ГЦБД [33].

Указанные проблемы сдерживают изучение работы грунтовых плотин с ПФЭ в виде ГЦБД из БСС в условиях штатной эксплуатации. Проектные

организации назначают состав КИА, ее расположение и параметры на основании общих рекомендаций по проектированию грунтовых плотин, а требования нормативной документации по мониторингу безопасности не охватывают все потенциально опасные участки диафрагм из ГЦБ. В результате этого возникает значительный разрыв между скоростью внедрения новых конструктивных решений и развитием нормативной базы для их мониторинга.

Настоящая диссертационная работа направлена на ликвидацию указанного разрыва путем комплексного исследования работы в условиях эксплуатации и разработки научного обоснованного подхода к мониторингу грунтовых плотин с ГЦБД из БСС.

1.3 Анализ средств КИА, используемых при контроле состояния грунтовых плотин

Ниже кратко рассмотрены основные средства инструментального контроля за состоянием грунтовых плотин. Традиционно в перечень таких наблюдений в обязательном порядке включают контроль температурного состояния грунтов, фильтрационного режима с целью контроля положения депрессионной поверхности, а также контроль деформаций плотины.

Температурный режим

Контроль температурного режима тела и основания грунтовой плотины наиболее целесообразен для плотин, эксплуатируемых в северной строительно-климатической зоне (ССКЗ) в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. Наиболее распространенный способ контроля температуры грунтов – установка закладной КИА в грунте плотины в строительный период. При необходимости организации контроля за температурным режимом уже эксплуатируемого сооружения обустраивают температурные скважины с расположением в них датчиков температуры переносного или стационарного типа.

Сведения о наиболее распространенных температурных датчиках, используемых для мониторинга температуры грунтовых плотин, приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Примеры температурных датчиков, используемых при мониторинге грунтовых плотин

Производитель	Наименование КИА, модель	Чувствительный элемент	Диапазон измерений, °С	Номер в госреестре СИ
Ace Instrument, Корея	Датчик температуры 5550	Полупроводник	–30…+120	91332–24
ООО «НПП «МСТД», Россия	Датчик температуры Т20	Волоконно-оптический	–60…+120	71300–18
ОАО «НИИЭС», АО «Институт Гидропроект»	Преобразователь температуры измерительный струнный модифицированный ПТС-М-90-В1	Струна	–30…90	42894–09
Roctest, Канада	Датчик температуры ТН	Термистор	–50…+150	89441–23
Ace Instrument, Корея	Датчик температуры 1010	Струна	–40…+150	–
Campbell Scientific, США	Термокоса CS225	Термистор		–

Фильтрационный режим

Для контроля фильтрационного режима системы «плотина–основание» в грунтовых плотинах традиционно предусматривается установка пьезометров. Наряду с классическими пьезометрами, которые представляют собой глухую трубу с перфорированной частью (водоприемником), существует множество вариаций дистанционных пьезометров. Дистанционные пьезометры представляют собой датчики давления или уровня воды, передаваемые сигнал от чувствительного элемента к считывающему устройству. Результаты измерения давления воды пересчитываются в метры водяного столба с привязкой к абсолютным отметкам.

С целью автоматизации измерений в ряде случаев предусматривается установка погружных датчиков уровня воды в пьезометрические колонны.

Сведения о наиболее распространенных датчиках-пьезометрах, используемых для мониторинга фильтрационного режима грунтовых плотин, приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Примеры датчиков-пьезометров, используемых при мониторинге грунтовых плотин

Производитель	Наименование КИА, модель	Чувствительный элемент	Диапазон измерений, МПа	Номер в госреестре СИ
Ace Instrument, Корея	Датчик давления серии 15xx	Струна	0…7	90049–23
ООО «НТП «Горизонт-М», Россия	Датчик давления PLLG	Первичный преобразователь давления.	0…3,0	87395–22
ОАО «НИИЭС», АО «Институт Гидропроект»	Преобразователи давления измерительные струнные модифицированные ПДС-М	Струна	0…3,0	42892–09
ООО «СПС», Россия	УСМ-ПСТ	Мембрана	0…3,5	87613–22

Другой метод фильтрационного контроля – использование волоконно-оптических датчиков, имеющих преимущество в дальности передачи данных перед традиционными датчиками (не более 1200 м) [121]. На сегодняшний день в АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» такими авторами, как С.В. Сольский, М.Г. Лопатина, Р.Н. Орищук, А.Л. Макушин, В.В. Дубок и др. [121], разработан ряд патентов, таких как конструкция устройства для определения характеристик волоконнооптических датчиков при фильтрации в грунте [84], способ определения местоположений и их контроль в днище бассейна суточного регулирования [85], способ контроля протечек глиноцементобетонной диафрагмы грунтовой плотины [79].

Деформации в плотине

При всем многообразии средств инструментального контроля за деформациями, неизменным остается создание опорной геодезической сети на сооружениях. Размещение геодезических знаков (марок, планово-высотные пункты) обеспечивает контроль за планово-высотными перемещениями

сооружений. Кроме того, существуют дополнительные средства инструментального контроля:

− щелемеры – для измерений величин раскрытия швов/трещин элементов конструкций;

− инклинометры – для измерений углов наклона объектов относительно гравитационного поля.

Сведения о наиболее распространенных датчиках-пьезометрах, используемых для мониторинга деформаций грунтовых плотин, приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Примеры датчиков деформаций, используемых при мониторинге грунтовых плотин

Производитель	Наименование КИА, модель	Диапазон измерений	Номер в госреестре СИ
Фирма «Sungjin Geotec Co., Ltd.», Корея	Датчик перемещений SJ-3000	Миллиметры: от 0…200 (в зависимости от модели)	65957–16
АООТ «Дигэс», Россия	Преобразователь линейных перемещений измерительный струнный ПЛПС/ПЛПС-С	Миллиметры: от 0…320 (в зависимости от модели)	13818–94 13802–94
ООО «ПетроМоделинг Геофизика», Россия	Инклинометр V2D	Угол наклона: –30…30 град	89000–23
ООО «СПС», Россия	Инклинометр скважинный вертикальный стационарный УСМ-ИСП-СВ	Угол наклона: –30…30 град	78761–20

Иные специальные наблюдения

При соответствующем обосновании на сооружении проводят специальные наблюдения, необходимые для изучения различных процессов, уточнения методов и результатов расчетов, обоснования конструктивных решений [19, 20]. В число таких наблюдений могут входить:

Напряженно-деформированное состояние

С помощью дистанционной КИА могу проводиться наблюдения не только за НДС грунта упорных призм, но и ПФЭ, например, ядра или «стены в грунте» в

соответствии с требованиями [126]. Наблюдения ПФЭ, в целом, не отличаются от наблюдений в упорных призмах и реализуются с помощью дистанционной КИА. Современные датчики давления грунта представляют собой конструкцию из двух пластин, сваренных по периметру и образующих внутри себя полость, заполненную несжимаемой жидкостью. Давление грунта на пластины вызывает изменение давление жидкости в корпусе, которая передает давление на мембрану, связанную с встроенным датчиком давления. При необходимости выполняют установку КИА в двух плоскостях: для контроля вертикального давления и горизонтального, вызванного гидростатической нагрузкой.

Геофизические исследования

Геофизические исследования – это комплекс неразрушающих методов исследования сооружения, основанный на изучении естественных или искусственных физических полей (магнитных, электрических, сейсмических и др.) [10, 9, 104, 123]. На грунтовых плотинах такие исследования позволяют получать информацию о состоянии тела плотины и ее основания в дополнение к уже имеющейся информации по итогам инженерных изысканий. Георадиолокационный метод применяется для выявления локальных неоднородностей или объектов в теле плотины, пустот и зон разуплотнения на небольшую глубину исследования (первые десятки метров) [9]. Электроразведка (электротомография, электрическое зондирование, метод естественного поля и вызванной поляризации) позволяет определять оползневые тела, границу вечномерзлых грунтов, поиск уровня грунтовых вод, водоносных горизонтов, зон обводнения, определение направлений фильтрации [173]. Сейсморазведка используется для получения детальной информации о структуре грунтов, выделение границ между рыхлыми и скальными породами, обнаружение подземных пустот [36]. Сейсмометрические наблюдения проводятся с целью обеспечения безопасности и предупреждения негативных воздействий преимущественно в сейсмически опасных районах с помощью автоматизированной системы сейсмометрического контроля (АССК).

Индикаторные методы наблюдений

Для детального изучения фильтрационных процессов в грунтовых плотинах применяются индикаторные методы наблюдений, заключающиеся в введении в воду различных индикаторов. Метод солевых растворов (например, хлорида натрия) основан на контроле изменения электропроводности воды в наблюдательных скважинах, что позволяет определить скорость и направления фильтрационных потоков. Метод красителей (например, флуоресцеин) предполагает закачку окрашенных веществ и последующее визуальное или инструментальное обнаружение их в контрольных точках для выявления даже незначительных утечек и мест размыва грунта. Кроме того, могут использоваться изотопные и газовые индикаторы для идентификации источников обводнения и изучения сложных фильтрационных процессов в основании и теле плотины.

В результате анализа средств КИА, используемых при контроле состояния грунтовых плотин, можно сделать следующие выводы:

1. Объем КИА, предусмотренной для монтажа в ГТС, определяется проектной организацией [127], при этом расположение и номенклатура КИА в ГЦБД из БСС не нормируется действующей нормативной документацией.
2. Определяется актуальность разработки методики мониторинга и рекомендации по оснащению грунтовых плотин с ГЦБД из БСС КИА [51].
3. Анализ подтвердил, что существующее разнообразие КИА позволяет решать большинство задач мониторинга грунтовых плотин. Однако выявлено отсутствие специализированных решений для контроля ключевых параметров работы ГЦБД из БСС, в частности, ее горизонтальных смещений и раскрытия межсвайных швов. Это обуславливает необходимость разработки новых технических решений и методик, представленных в данной работе.

1.4 Обзор способов обработки результатов мониторинга за состоянием сооружений

В современных условиях эксплуатации ГТС проблема оперативности, мобильности и автономности средств мониторинга за состоянием ГТС решается с

помощью внедрения автоматизированных систем диагностического контроля (АСДК). АСДК ГТС представляет собой комплексную систему, включающую в себя автоматизированную систему опроса КИА (АСО КИА) и информационно-диагностическую систему (ИДС) контроля безопасности. В соответствии с п. 4.17 СП 58.13330.2019 «Гидротехнические сооружения. Основные положения» [127], п.5.1.1 СТО 17330282.27.140.004-2008 «Контрольно-измерительные системы и аппаратура гидротехнических сооружений. Условия создания. Нормы и требования» [128] контрольно-измерительные системы сооружений I и II класса должны быть оснащены АСДК с целью оценки состояния сооружений в режиме реального времени.

Как правило, большинство производителей дистанционной КИА разрабатывает собственное программное обеспечение (ПО) для автоматизированного опроса и хранения базы данных измерений с различным функционалом и интерфейсом пользователя [30, 31, 35, 95, 166]. Однако возможна и интеграция средств инструментального контроля различного типа и различного производителя в единую систему.

В Российской Федерации наиболее распространенными ИДС, внедряемыми на гидротехнических сооружениях, являются:

1. ИДС «Дедал 2.0» (АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»). Система представляет собой web-приложение, позволяющая автоматизировать ведение электронных журналов, а также оперативную диагностику состояния ГТС с помощью построения таблиц, графиков и эпюр, а также цветовой индикации при 3-D визуализации ГТС по результатам данных инструментальных измерений.

ИДС «Дедал 2.0» (или предыдущая версия системы «Дедал») внедрена на таких объектах, как Волховская ГЭС, Верхне-Свирская ГЭС, Нижне-Свирская ГЭС» и др.

2. ИДС «БИНГ-4» (ООО НПП «ГЕОС»). Система предполагает установку на сервер непосредственно на гидроузле. Данные из сервера сбора данных передаются в систему ИДС, также обеспечивая визуализацию результатов

наблюдений в виде графиков и эпюр, хранение и обработку данных визуальных и инструментальных наблюдений.

ИДС «БИНГ-4» или его предыдущие версии установлены на таких объектах, как Бурейская ГЭС, Зарагижская ГЭС, Воткинская ГЭС, Саратовская ГЭС и др.

3. ИДС «SODIS M» (ГК «СОДИС Лаб»). Система поддерживает сбор данных с датчиков КИА, проводит непрерывный мониторинг, обеспечивает обработку данных по заданным критериям и анализ состояниях конструкций и сооружения. Разрабатывается преимущественно для мониторинга грунтовых сооружений хвостохранилищ.

4. Программное обеспечение «MonSol Monitoring Server» (ООО «МОНСОЛ РУС») создано для систем комплексного мониторинга сооружений, позволяющее в режиме реального времени отслеживать состояние сооружений с 3D визуализацией объекта.

5. Система «Струна-5» (НПК «Фаза») предназначена для автоматизации измерений и сбора данных прежде всего с закладной КИА струнного типа, устанавливаемой в сооружение в процессе строительства. Особенностью системы является возможность оценки работоспособности струнных датчиков. Модификации системы эксплуатируются на Усть-Илимской, Красноярской, Зейской ГЭС.

1.5 Формулирование цели и задач диссертационного исследования

Для настоящей диссертационной работы поставлена следующая цель – на основе анализа особенностей работы грунтовой плотины с ГЦБД из БСС разработать рациональные технические решения по мониторингу грунтовой плотины с ГЦБД из БСС.

Задачами работы являются следующие исследования:

1. Сбор, анализ, систематизация информации, посвященной существующим методам мониторинга грунтовых плотин, в том числе с ПФЭ. Обобщение

отечественного и зарубежного опытов проектирования, строительства и эксплуатации грунтовых плотин с ГЦБД из БСС.

2. Анализ результатов расчетных исследований состояния грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС высотой 41,5 м с ГЦБД из БСС.

3. Анализ и сопоставление результатов натурных исследований, полученных в процессе эксплуатации грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС, с расчетными показателями.

4. Разработка методических подходов к организации мониторинга грунтовой плотины с ГЦБД из БСС, предусматривающих принципы обработки и интерпретации результатов мониторинга и использования совокупности расчетных и натурных данных при оценке технического состояния сооружения.

5. Разработка и обоснование подходов к оснащению КИА грунтовых плотин высотой более 40 м с ГЦБД из БСС, включающих технологию монтажа, размещения КИА и контроль деформаций ГЦБД из БСС.

1.6 План исследования

В настоящей диссертационной работе автором предложена блок-схема (рисунок 1.1), которая легла в основу проведения исследований. При ее разработке учитывались поставленные цель и задачи работы, представленный в Главе 1 анализ специфики конструкций грунтовых плотин, нормативно-методической базы и существующих в ней решений по организации натурных наблюдений на грунтовых плотинах с диафрагмами, средств используемых при контроле состояния плотин КИА [48, 52].

Расчетные исследования Главы 2 выполнялись на основе положений и выводов, сделанных в Главе 1. Анализ натурных наблюдений в Главе 3 сопоставлялись с результатами расчетов, что позволило сформировать методические рекомендации по организации мониторинга в Главе 4 и разработать

технические решения по технологии монтажа, размещению КИА в БСС и контролю деформаций ГЦБД из БСС в Главе 5.

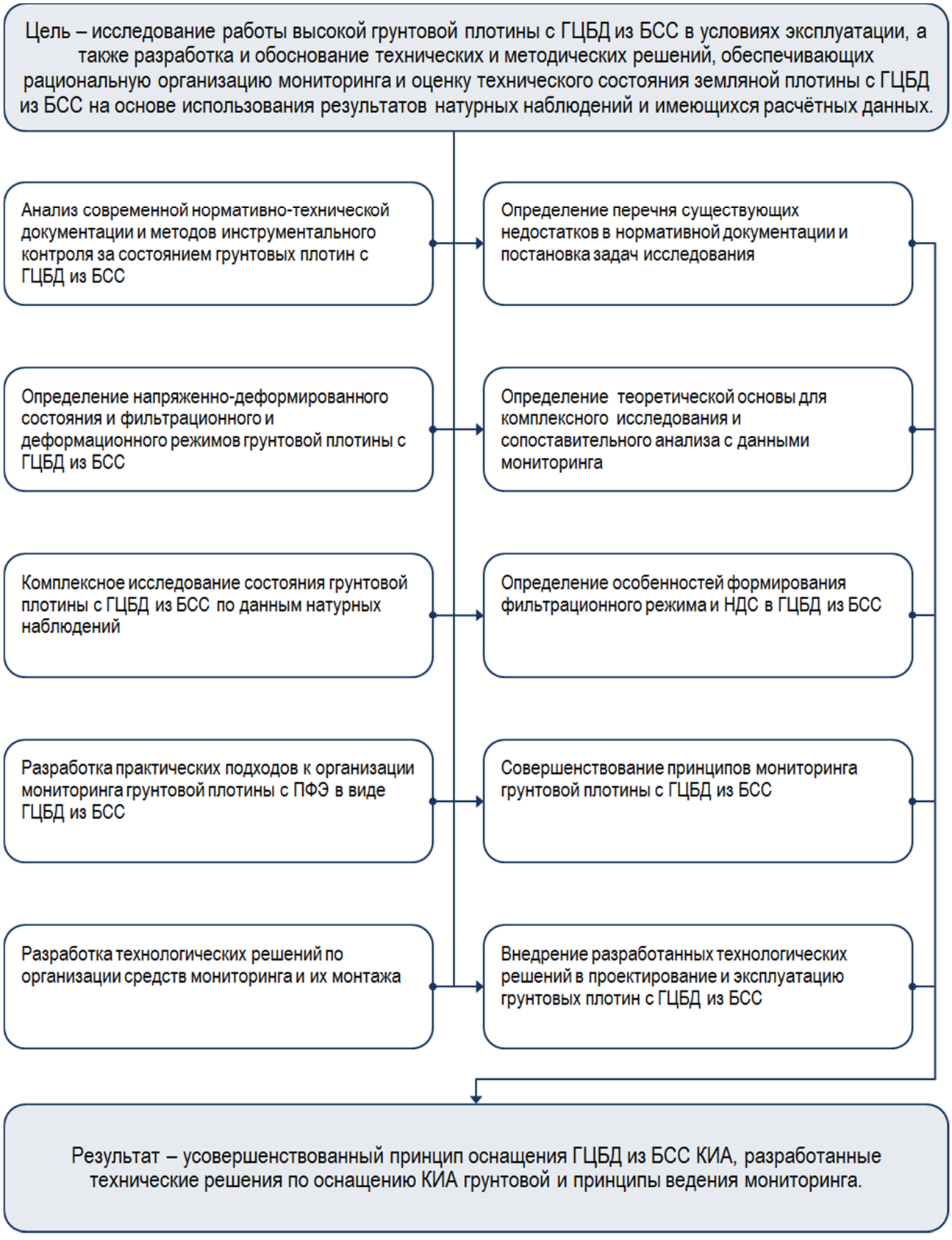


Рисунок 1.1 – Блок-схема плана исследований

1.7 Выводы по Главе 1

1. Выполнен анализ специфики контроля параметров состояния различных конструкций грунтовых плотин в зависимости от их ПФЭ, определены преимущества ГЦБ как материала ПФЭ и недостатки существующих положений и рекомендаций в области мониторинга грунтовых плотин с ПФЭ из ГЦБ.

ПФЭ в виде ГЦБД из БСС – сравнительно новый, но уже зарекомендовавший себя вид ПФЭ, обеспечивающий высокую водонепроницаемость в основании и в теле плотины на примерах строительного котлована, ремонтного участка и самостоятельного ПФЭ.

2. Установлено, что при всех преимуществах ГЦБД из БСС ее применение в качестве ПФЭ высоких грунтовых плотин ограничено малой изученностью работы таких конструкций в условиях длительной эксплуатации, особенно в части формирования НДС. Это создает значительные риски при проектировании и эксплуатации таких ответственных объектов

3. Анализ нормативно-методической документации по организации мониторинга состояния плотин с ГЦБД из БСС, выявил структурный пробел в нормативной документации: существующие требования и рекомендации ориентированы преимущественно на контроль фильтрационного режима и не учитывают специфические особенности работы ГЦБД из БСС, их НДС, плановые смещения, возможное раскрытие межсвайных швов.

4. Рассмотрен, изучен и структурирован основной состав существующей КИА, предназначенной для контроля технического состояния грунтовых плотин. Установлен системный разрыв между темпами внедрения инновационных конструктивных решений и развитием методов инструментального контроля их технического состояния, выражающийся в отсутствии регламентированных требований к составу, размещению и интерпретации данных КИА для ПФЭ в виде ГЦБД из БСС.

5. На основе выполненного анализа существующих конструкций ПФЭ и способов мониторинга их состояния в Главе 1 сформулированы задачи

диссертационной работы и разработан план исследований для достижения поставленной цели работы.

Глава 2 Анализ результатов расчетных исследований состояния грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС

В рамках диссертационного исследования были проанализированы результаты расчетов НДС и режима фильтрации грунтовой плотины Нижне-Бурейского гидроузла с глиноцементобетонной диафрагмой из буросекущихся свай, выполненных в АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» с участием автора (к.т.н. В.С. Кузнецов, к.т.н. Ладенко, к.т.н. О.А. Румянцев, к.т.н. О.А. Буряков, Р.Ю. Лабойко, К.М. Воробьев).

Автором была осуществлена непосредственна постановка задачи расчетов, назначены начальные граничные условия, выполнен анализ результатов расчетного моделирования и в дальнейшем данные использованы при интерпретации данных натурных наблюдений (Глава 3) и формировании рекомендаций к системе мониторинга (Глава 4) и рациональному комплексу КИА для плотин с ГЦБД из БСС (Глава 5).

При выполнении расчетов использовались материалы генерального проектировщика АО «Ленгидропроект» (исполнительная съемка, расчетное обоснование конструкции грунтовой плотины) и результаты исследований АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» при сопровождении отсыпки грунтовой плотины (прочностные и деформационные характеристики грунтов). Расчетные случаи назначались автором на основе анализа возможных ситуаций при эксплуатации плотины Нижне-Бурейской ГЭС.

На основе численного моделирования получены прогнозные значения ключевых параметров работы сооружения для их анализа, последующей верификации натурными данными мониторинга (Глава 3) и оценки соответствия проектным требованиям.

2.1 Конструктивные особенности и технология возведения грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС

Проект Нижне-Бурейской ГЭС первоначально включал в себя вариант конструкции грунтовой плотины с суглинистым ядром, однако в связи с достаточно сжатыми сроками строительства проект был пересмотрен, в результате чего генеральный проектировщик АО «Ленгидропроект» разработал конструкцию грунтовой плотины с ПФЭ в виде БСС [51]. Ключевой вклад в проектирование и обоснование данного технического решения внесли В.В. Борзунов, Б.Н. Юркевич, В.Н. Киселев, Г.Л. Козинец, Г.В. Денисов, Н.А. Вульфович, Е.А. Кадушкина и другие.

Специалистами ООО «СПИИ «Гидроспецпроект» Э.С. Аргалом, К.П. Кудриным, В.М. Королевым, О.Е. Смирновым, Е.В. Соловьевой и другими выполнялись разработка конструкции, технологии возведения ПФЭ, подбор состава ГЦБ смеси для БСС [51].

В отделе «Механика грунтов и геотехника» АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» проводился комплекс работ по опытным исследованиям грунтов для отсыпки плотины (Н.К. Васильев, В.В. Сокуров, А.В. Сазонов, Т.Ю. Векшина, А.Р. Засеев и другие), а в отделе «Основания, грунтовые и подземные сооружения» выполнялись исследования фильтрационных и суффозионных свойств ГЦБ (С.В. Сольский, О.Н. Котлов, М.Г. Лопатина, Р.Н. Орищук, Е.Е. Легина, Ф.П. Собкалов, А.В. Величко и другие) [51].

Важную роль при корректировке проекта плотины сыграл положительный опыт возведения перемычек котлована бетонных сооружений Нижне-Бурейской ГЭС также с ПФЭ в виде ГЦБД из БСС [48, 68]. Максимальный напор на перемычку составлял 12,5 м.

Являясь основным напорным ГТС гидроузла, плотина имеет максимальную высоту в русле 41,5 м (в примыкании к сопрягающему устою – 38,0 м) и длину по гребню 400,0 м. ПФЭ расположен по оси плотины в виде «стены в грунте» из ГЦБ и выполнен буросекущим способом с отметки 140,50 м с заглублением в скальное основание на 1,0 м. Для обеспечения сплошности и водонепроницаемости приняты скважины диаметром 1,2 м, в местах сопряжения скважин толщина «стены в грунте» составляет 0,85 м [73].

Для средней глубины скважин – 37,4 м, максимальной глубины – 40,8 м, был принят диаметр скважин 1,2 м с шагом 0,85 м. Общее количество скважин – 458 шт., в том числе 416 шт., предусмотренных проектом и 42 шт. дополнительных, выполненных в тех местах, где толщина пересечения свай оказалась менее 0,6 м. Сопряжение диафрагмы с бетонными элементами (правобережный устой и левобережная бетонная подготовка) выполнено через специальные глиноцементобетонные примыкания со шпонками, а в основании организована двухрядная цементационная завеса.

Технология устройства ГЦБД из БСС включала отсыпку тела грунтовой плотины до проектных отметок (гребня или яруса) [73]. Затем с гребня с помощью буровых установок осуществлялось поэтапное бурение отдельных скважин. Порядок бурения и укладки ГЦБ в скважины представлен на рисунке 2.1.

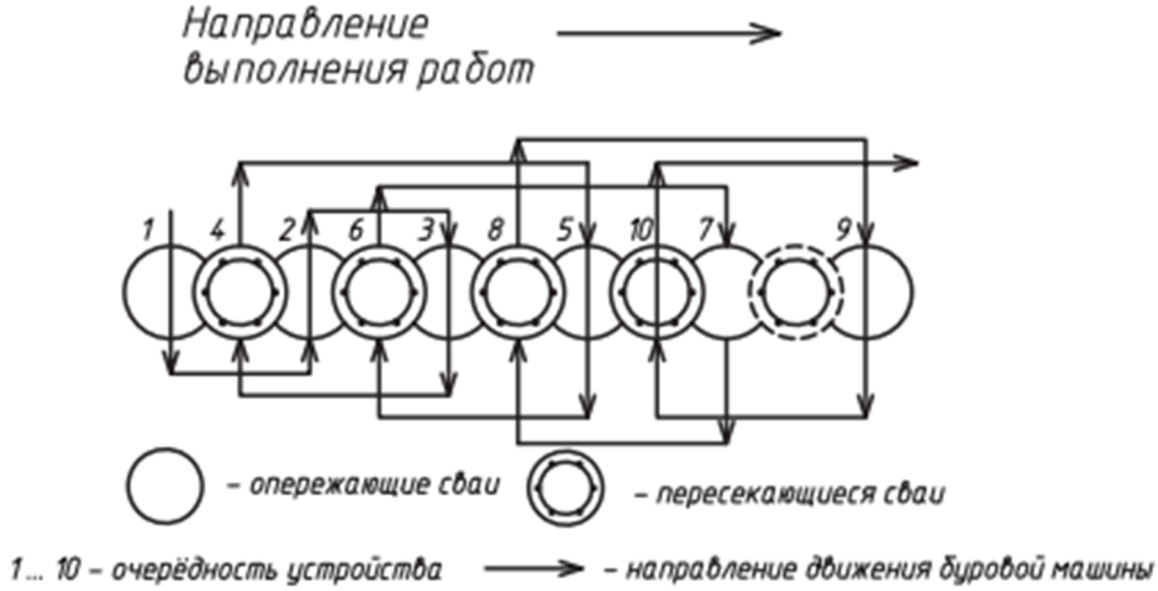


Рисунок 2.1 – Порядок устройства «стены в грунте» в виде ГЦБД из БСС

Бурение производилось с применением обсадных труб для предотвращения обвала стен скважины. После заполнения скважин первого ряда глиноцементобетонной смесью (ГЦБ) и ее твердения производилось бурение и бетонирование скважин второго ряда с частичным пересечением тела свай первого ряда [73], формируя единый противофильтрационный контур. Общий срок возведения ГЦБД из БСС составил 136 дней (с 08.07.2016 по 20.11.2016).

Данная конструкция стала первой в мировой и отечественной практике применения ГЦБД из БСС в качестве основного ПФЭ высокой грунтовой плотины. Предшествующий мировой опыт эксплуатации плотин с диафрагмами вида «стена в грунте» ограничивался плотинами высотой до 15,0 м: плотина Вади Хавазинах в Омане (высота 6,5 м) [170, 106], плотина Аддикс в США (высота 12,0 м) [142], плотина Фровиль во Франции (высота 15,0 м) [140, 106].

Описанные проектные конструктивные и технологические особенности грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС определили необходимость выполнения комплекса расчетных исследований в рамках диссертационной работы, направленных на оценку фильтрационного режима, НДС и устойчивости плотины.

2.2 Конечно-элементная дискретизация расчетных сечений и исходные данные

Программный комплекс GeoStudio, использованный при проведении расчетных исследований фильтрации, НДС и устойчивости откосов грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС, основан на методе конечных элементов. Расчетные области выбранных поперечных сечений были разбиты на 8-узловые четырехугольные конечные элементы девятого порядка. Расчетные характеристики грунтов тела и основания грунтовой плотины были приняты согласно проектным материалам и результатам экспериментальных исследований (табл. 2.1) [51].

Таблица 2.1 – Расчетные значения физико-механических характеристик грунтов тела и основания грунтовой плотины с учетом экспериментальных исследований АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»

№ п/п	Наименование грунта	W, %	$\rho_{ест.}$, г/см^3	$\rho_{нас.}$, г/см^3	e, д.е.	φ, °	c, кПа	$E_{деф.}$, МПа	μ, д.е.	$K_ф$, м/сут

№ п/п	Наименование грунта	W, %	$\rho_{ест.}$, г/см^3	$\rho_{нас.}$, г/см^3	e, д.е.	φ, °	c, кПа	$E_{деф.}$, МПа	μ, д.е.	$K_ф$, м/сут
1	Гравийно-галечниковый грунт м/р № 13	5	2.20	2.30	0.262	36.86[1)] 39.62[2)]	0[1)] 31[2)]	70	0.27[1)] 0.15[2)]	100
2	Песчаный грунт м/р №5	5	1.79–1.87	2.05	0.547	33.02[1)] 33.74[2)]	0[1)] 19[2)]	40	0.30[1)] 0.15[2)]	3–5
3	Гравийно-галечниковый грунт с отсевом фр. крупнее 40 мм	5	2.15	2.27	0.293	35.00	0	50	0.28	20
4	Галечниковый грунт фр. крупнее 40 мм	5	2.10	2.24	0.325	38.65	0	75	0.27	100
5	Горная масса гранитов и гранитоидов	5	2.00	2.19	0.421	37.95	0	70	0.27	1000
6	Русловой аллювий	–	2.22	2.22	0.374	35.00	0	50	0.28	150
7	Гранитоиды зоны выветривания	–	2.68	2.68	0.023	30.96	50	2000	0.30	0.5
8	Гранитоиды сильнотрещиноватые	–	2.84	2.84	0.007	35.00	200	4000	0.27	0.05
9	Гранитоиды среднетрещиноватые	–	2.84	2.84	0.007	36.86	300	9000	0.22	0.05
10	Гранитоиды слаботрещиноватые	–	2.84	2.84	0.007	38.65	400	13000	0.20	0.05
11	Глиноцементобетон	–	1.80	1.80	–	30.00	0	80	0.30	1.3×10^{-4}

Примечания

Цифрой 1) обозначены характеристики, принятые по данным проекта.

Цифрой 2) обозначены характеристики, принятые по результатам экспериментальных исследований.

Все характеристики, не обозначенные какой-либо цифрой, были приняты по данным проекта.

В качестве основных были рассмотрены следующие расчетные случаи [51]:

− первый (основной): отметка УВБ соответствует НПУ 138.00 м, отметка УНБ соответствует пропуску расходов 0.01% обеспеченности (117.360 м);

− второй (основной): отметка УВБ соответствует УМО 137.50 м, отметка УНБ соответствует пропуску расходов только через агрегаты ГЭС (110.900 м).

В качестве особых были рассмотрены следующие расчетные случаи [51]:

− первый (особый): отметка УВБ соответствует ФПУ 138.30 м, отметка УНБ соответствует пропуску расходов 0.01% обеспеченности (117.360 м);

− второй (особый): полный выход из строя глиноцементобетонной диафрагмы; отметка УВБ соответствует НПУ 138.00 м, отметка УНБ соответствует пропуску расходов 0.01% обеспеченности (117.360 м);

− третий (особый): отметка УВБ соответствует НПУ 138.00 м, отметка УНБ соответствует пропуску расходов 0.01% обеспеченности (117.360 м), сейсмическое воздействие на уровне проектного землетрясения;

− четвертый (особый): отметка УВБ соответствует НПУ 138.00 м, отметка УНБ соответствует пропуску расходов 0.01% обеспеченности (117.360 м), сейсмическое воздействие на уровне максимального расчетного землетрясения;

− пятый (особый): отметка УВБ соответствует НПУ 138.00 м, отметка УНБ соответствует межени (109.160 м), сейсмическое воздействие на уровне максимального расчетного землетрясения.

2.3 Методика и результаты расчета фильтрации через тело и основание грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС

Цель расчетов фильтрации через тело и основание грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС заключалась в определении положения депрессионной поверхности в теле плотины, верификации фильтрационной модели и оценке фильтрационной прочности тела и основании плотины при различных расчетных случаях и последующем сравнении с фактической картиной фильтрационного режима плотины по результатам мониторинга.

Расчеты фильтрации были выполнены в модуле SEEP/W программного комплекса GeoStudio 2018 [51] и проанализированы в настоящей диссертации. Расчетные значения коэффициентов фильтрации грунтов тела и основания плотины были приняты по данным табл. 2.1. При выполнении расчетов были приняты следующие граничные условия [51]:

− вдоль смоченной поверхности верхового откоса и ложа водохранилища: уровень воды, соответствующий отметке УМО, НПУ или ФПУ (в зависимости от расчетного случая);

− вдоль смоченной поверхности низового откоса и дна реки в нижнем бьефе: уровень воды, соответствующий пропуску расходов 0.01% обеспеченности (отм. 117.360 м), либо пропуску расходов только через агрегаты ГЭС (отм. 110.900 м), в зависимости от расчетного случая).

− вдоль нижней границы расчетной схемы: непроницаемая граница, Q=0.

В качестве примера на рисунке 2.2 показаны граничные условия, принятые при решении фильтрационной задачи в створе 3 [51].

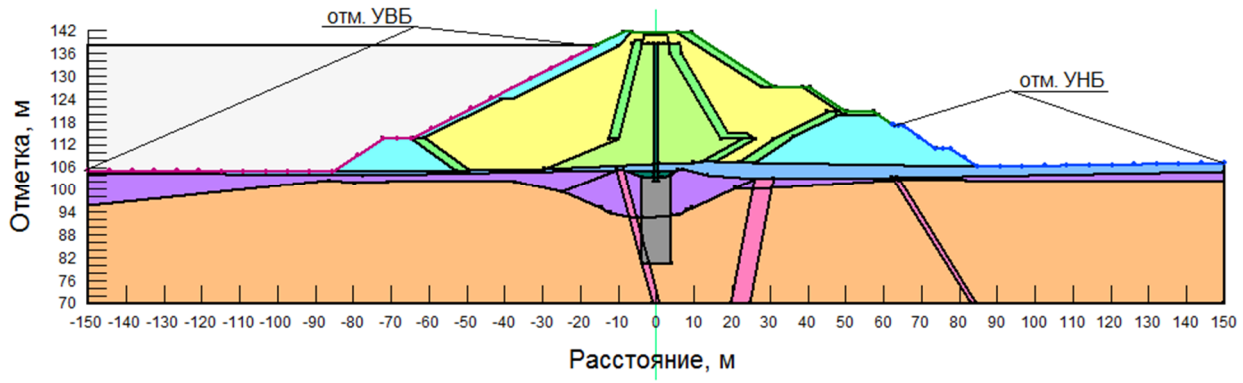


Рисунок 2.2 – Граничные условия, принятые для решения задачи фильтрации на примере створа №3

На рисунках А.1–А.8 Приложения А показано расчетное положение депрессионной поверхности в теле грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС для 1–2 основных и 1–2 особых расчетных случаев. На рисунках А.9–А.16 Приложения А приведены картины распределения расчетных градиентов напора в основании грунтовой плотины в створах №2 и №3 при различных расчетных случаях.

Ключевые прогнозные результаты, подлежащие сравнительному анализу в Главе 3:

1. Положение депрессионной поверхности.

Расчеты показали, что депрессионная поверхность локализована в верховой призме. В низовой упорной призме, за диафрагмой и цементационной завесой, напор практически полностью гасится. Это свидетельствует об эффективной работе ПФЭ в прогнозной модели.

2. Градиенты напора.

Максимальные прогнозные градиенты напора (I) в нескальных грунтах основания при основном сочетании нагрузок не превышают 0,20 д.е., что ниже критических (0,43 д.е.) и проектных допустимых значений (0,33 д.е.) [51]. В особом случае (условное разрушение диафрагмы) градиенты в песчаном ядре возрастают до 0,95 д.е., но также остаются ниже критического значения для данного грунта (1,32 д.е.).

3. Прогноз гашения напора.

Модель предсказывает, что противофильтрационный контур «ГЦБД – цемзавеса» должен обеспечивать гашение более 90% напора.

Таким образом формируется сводный прогноз фильтрационной картины в грунтовой плотине, подлежащий сравнительному анализу с результатами натурных наблюдений в Главе 3:

- Депрессионная поверхность в низовой призме – на отметках, близких к УНБ;
- Степень гашения напора на ПФЭ – более 90%.

2.4 Методика и результаты расчетных исследований НДС грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС

Для моделирования НДС грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС была задействована программа SIGMA/W из пакета GeoStudio. В качестве основной

модели грунта принята упругопластическая модель Кулона-Мора [51]. Цель расчетов заключалась в следующем:

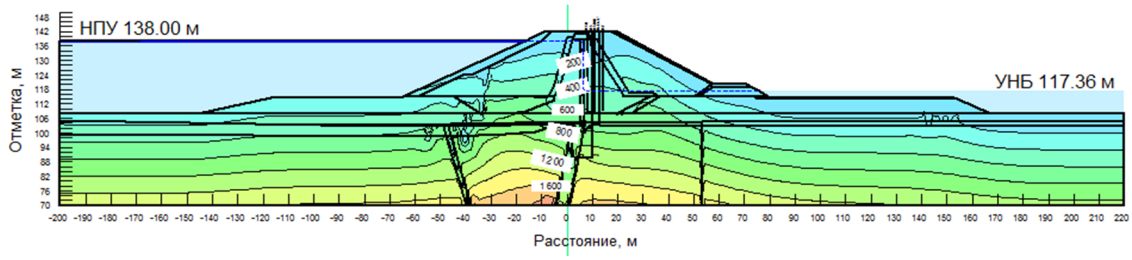
– оценка распределения вертикальных и горизонтальных напряжений, возникающих в теле и основании плотины для последующего использования при анализе устойчивости в расчетах статической и сейсмической устойчивости откосов сооружения;

– оценка напряженного состояния материала диафрагмы на предмет возникновения растягивающих напряжений [51].

Результаты расчетов представлены на рисунках 2.3 и 2.4.

На рисунках 2.5 и 2.6 изображены графики изменения по высоте вертикальных напряжений в диафрагме плотины в створах 2 и 3 при ФПУ.

а)



б)

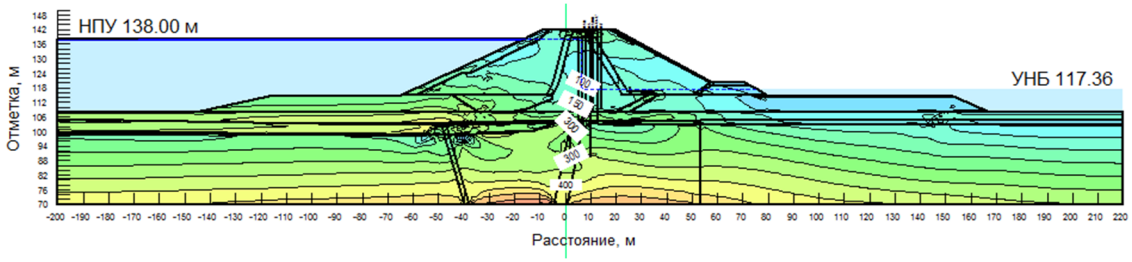
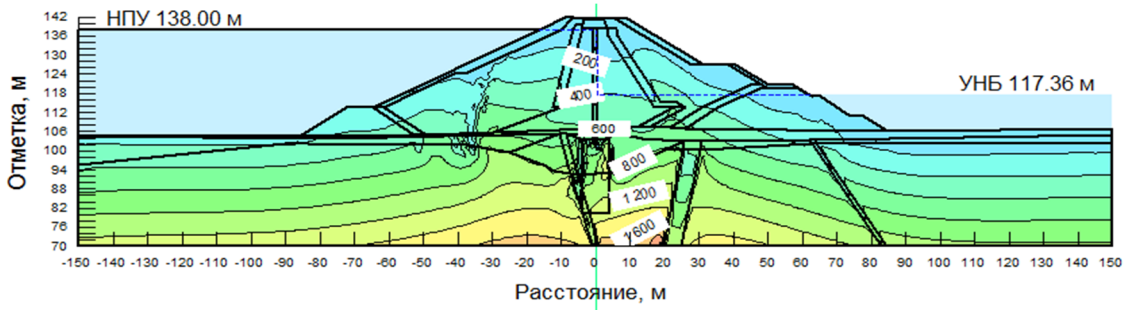


Рисунок 2.3 – Картины распределения полных вертикальных (а) и горизонтальных (б) напряжений в теле и основании грунтовой плотины в створе 2 при НПУ, кПа

а)



б)

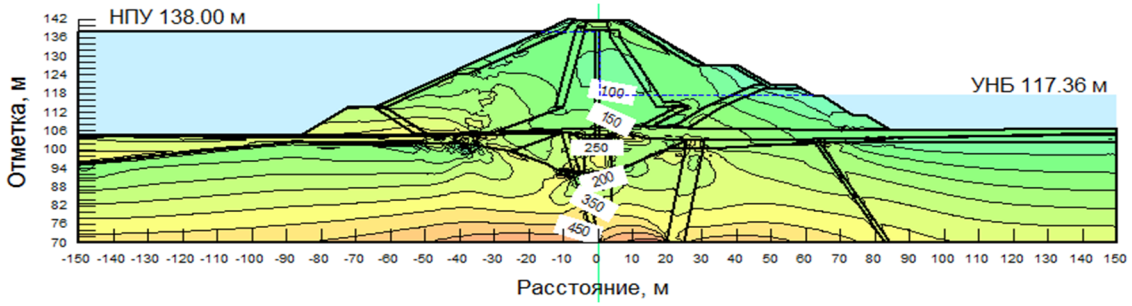


Рисунок 2.4 – Картины распределения полных вертикальных (а) и горизонтальных (б) напряжений в теле и основании грунтовой плотины в створе 3 при НПУ, кПа

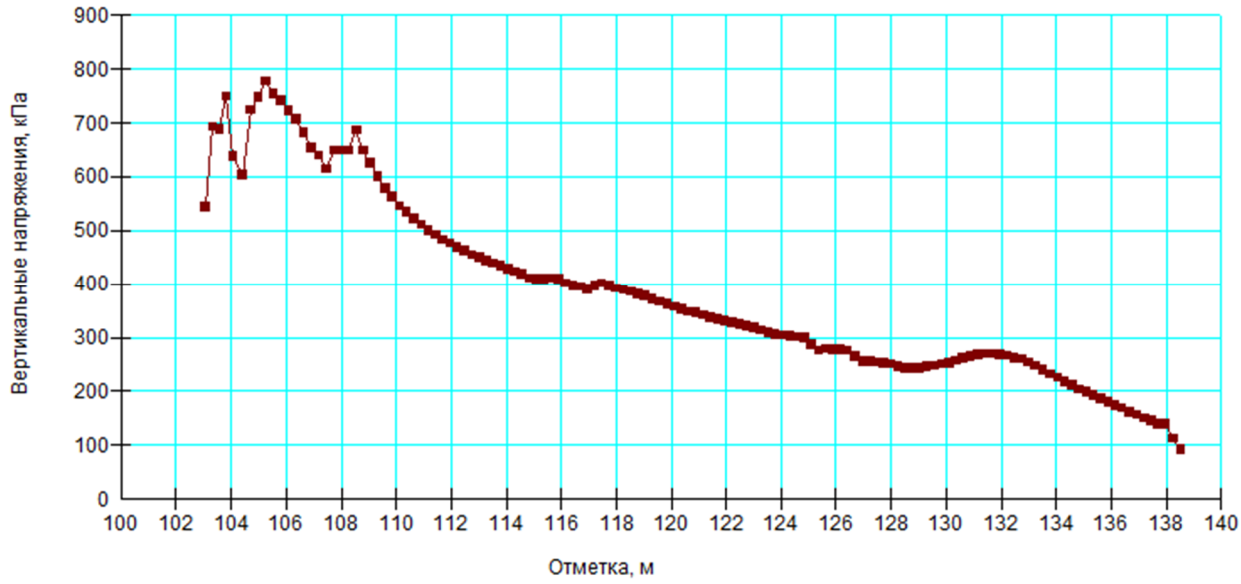


Рисунок 2.5 – График изменения по высоте вертикальных напряжений в диафрагме грунтовой плотины при ФПУ, створ 2

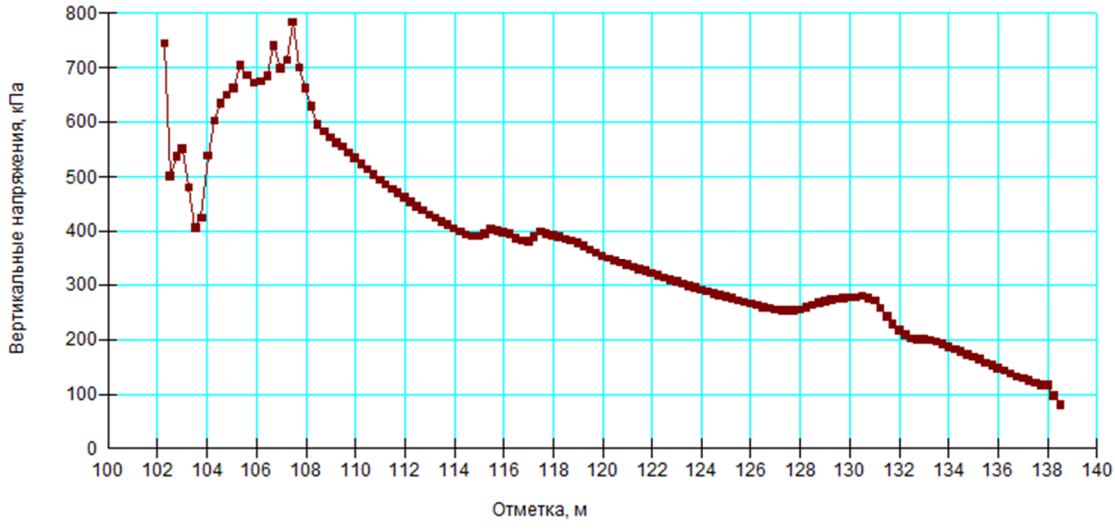


Рисунок 2.6 – График изменения по высоте вертикальных напряжений в диафрагме грунтовой плотины при ФПУ, створ 3

Ключевые прогнозные результаты, подлежащие сравнительному анализу в Главе 3:

1. По всей высоте ГЦБД возникают исключительно сжимающие вертикальные напряжения (рисунки 2.3, 2.4). Их величина не превышает 0,78 МПа (рисунки 2.5, 2.6) в нижней части (зона защемления в основание) до минимальных значений в пригребневой зоне.

2. Прогнозируемое отсутствие растягивающих напряжений является критически важным, так как исключает риск образования сквозных трещин в материале ГЦБ.

2.5 Методика и результаты расчетных исследований устойчивости грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС

2.5.1 Статическая устойчивость

Расчеты статической устойчивости грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС были проведены с целью определения коэффициентов местной и общей устойчивости их откосов под действием статических нагрузок и их сравнения с требуемыми значениями для сооружения I класса [51].

В соответствии с действующими нормами СП 39.13330.2012 [126] и СП 23.13330.2018 [125] для предотвращения достижения гидротехническими сооружениями, их конструктивными частями и основаниями предельных состояний при расчетах должно соблюдаться следующее условие:

$$\gamma_{lc} F \le \frac{\gamma_c}{\gamma_n} R, \qquad (2.1)$$

где F – расчетное значение обобщенного силового воздействия, по которому производится оценка предельного состояния, определенное с учетом коэффициента надежности по нагрузке γ_f=1,0, согласно приложению Д СП 58.13330.2019 [127];

R – обобщенное расчетное значение сил предельного сопротивления сдвигу по рассматриваемой поверхности (при расчетах по первой группе предельных состояний – расчетное значение), определенное с учетом коэффициентов надежности по материалу γ_m или грунту γ_g и условий работы γ_c;

γ_c – коэффициент условий работы;

γ_{lc}– коэффициент сочетания нагрузок;

γ_n– коэффициент надежности по ответственности сооружения.

Расчеты проводились по первой группе предельных состояний [51], при этом согласно [127] значения коэффициента сочетания нагрузок γ_{lc} были приняты:

− для основного сочетания нагрузок и воздействий в период нормальной эксплуатации: 1,00;

− для особого сочетания нагрузок и воздействий при особой нагрузке, в том числе сейсмической на уровне проектного землетрясения: 0,95;

− для особого сочетания нагрузок и воздействий при сейсмической нагрузке уровня максимального расчетного землетрясения: 0,85.

Значение коэффициента надежности по ответственности сооружения γn было принято согласно [127] для сооружений I класса равным 1,250 [51, 126].

Значение коэффициента условий работы γc было принято согласно [126] равным 1,00, поскольку использованный метод расчета устойчивости (см. п. 10.2) учитывает НДС.

При поиске опасной поверхности сдвига для коэффициента устойчивости k_s используется условие [126]:

$$k_s = \frac{R}{F} \geq k_{s,n} = \frac{\gamma_n \times \gamma_{lc}}{\gamma_c}, \qquad (2.2)$$

где k_s – расчетный коэффициент устойчивости; $k_{s,n}$– нормативный коэффициент устойчивости.

Устойчивость сооружения считается обеспеченной, если выполнено условие (2.1) или (2.2) [126].

Для гидротехнических сооружений I класса значение коэффициента устойчивости k_s не должно быть меньше 1,250 при основном сочетании нагрузок в

период нормальной эксплуатации и не должно быть меньше 1,187 для особого сочетания нагрузок (кроме сейсмического воздействия уровня МРЗ).

Вычисления устойчивости откосов грунтовой плотины производились в среде программного комплекса GeoStudio 2018 с использованием модуля SLOPE/W [51].

В программе SLOPE/W используется комбинированный метод расчета устойчивости, при котором потенциальная призма обрушения разбивается на отсеки, как в методе предельного равновесия, однако, силы, действующие на тот или иной отсек, определяются из результатов решения задачи о НДС плотины. Полученная критическая круглоцилиндрическая поверхность обрушения подвергалась процедуре оптимизации, которая позволяет находить поверхности возможного обрушения с наименьшим коэффициентом устойчивости, отличающиеся по форме от круглоцилиндрической.

Метод расчета устойчивости, используемый в программе SLOPE/W программного комплекса GeoStudio 2018, отвечает требованиям, предъявляемым к методам расчета устойчивости грунтовых плотин, приведенных в Приложении И [126], заключающиеся в следующем:

- необходимо использовать методы, оперирующие с расчлененной на вертикальные элементы призмой обрушения и с произвольной или круглоцилиндрической поверхностью сдвига, удовлетворяющие условиям равновесия в предельном состоянии [126];
- используемые методы должны удовлетворять как минимум двум уравнениям равновесия [126];
- вес грунта в пределах каждого элемента должен определяться с учетом ее капиллярного поднятия, давление воды по контуру элемента (поверхности откоса, поверхности сдвига и плоскостям раздела между элементами) определяется фильтрационным расчетом [126].

На рисунках А.17 – А.32 Приложения А показаны положения наиболее опасных поверхностей обрушения откосов грунтовой плотины при 1 и 2-ом

основных и 1-ом и 2-ом особых расчетных случаях, а в табл. 2.2 сведены полученные для них коэффициенты устойчивости.

Таблица 2.2 – Результаты расчетов статической устойчивости грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС

№ п.п.	Номер рисунка	Створ	Расчетный случай	Откос	Расчетное значение коэффициента устойчивости k_s.	$k_{норм.}$
1	А.17, Прил. А	2	1-й основной	Низовой	1,562	1,250
2	А.21, Прил. А			Верховой	1,673	
3	А.18, Прил. А		2-й основной	Низовой	1,564	1,250
4	А.22, Прил. А			Верховой	1,668	
5	А.19, Прил. А		1-й особый	Низовой	1,563	1,187
6	А.23, Прил. А			Верховой	1,680	
7	А.20, Прил. А		2-й особый	Низовой	1,560	1,187
8	А.24, Прил. А			Верховой	1,683	
9	А.25 а, б, Прил. А	3	1-й основной	Низовой	1,867 / 1,406	1,250
10	А.29, Прил. А			Верховой	1,716	
11	А.26 а, б, Прил. А		2-й основной	Низовой	1,873 / 1,404	1,250
12	А.30, Прил. А			Верховой	1,758	
13	А.27 а, б, Прил. А		1-й особый	Низовой	1,865 / 1,406	1,187
14	А.31, Прил. А			Верховой	1,676	
15	А.28 а, б, Прил. А		2-й особый	Низовой	1,799 / 1,400	1,187
16	А.32, Прил. А			Верховой	1,736	

Примечание – В строках 9, 11, 13, 15 в числителе указан коэффициент общей устойчивости, в знаменателе – коэффициент местной устойчивости низового откоса.

2.5.2 Сейсмическая устойчивость

Расчеты напряженного состояния грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС при воздействии сейсмических нагрузок были выполнены с помощью программы QUAKE/W программного комплекса GeoStudio 2018. Расчеты выполнялись в следующей последовательности:

− определялось начальное статическое напряженное состояние сооружения;

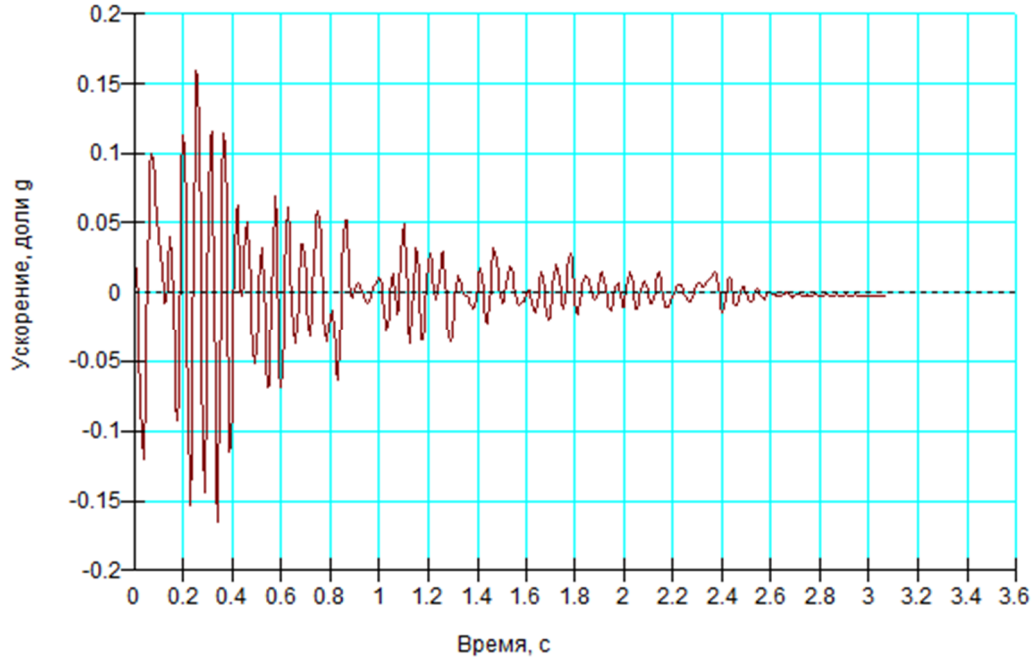
− с использованием расчетных акселерограмм, показанных на рисунках 2.7 и 2.8, определялось напряженное состояние сооружения при сейсмическом воздействии уровней проектного землетрясения (ПЗ) и максимального расчетного землетрясения (МРЗ); коэффициенты нормирования акселерограмм были приняты согласно расчетному обоснованию конструкции от Генерального проектировщика;

− с помощью программы SIGMA/W выполнялся расчет остаточных смещений тела плотины и ее основания.

Каждое сейсмическое воздействие было разбито на расчетные шаги, количество которых соответствует шагу цифровки акселерограммы. На каждом шаге выполнялись расчеты напряженного состояния плотины под действием сейсмической нагрузки. Коэффициент затухания грунтов определялся методом Исибаси и Чжанга [156,157]. Динамические значения характеристик физико-механических свойств грунтов тела и основания плотины были определены с помощью методики, приведенной в [149], а также по результатам исследований [12].

После определения напряженного состояния тела и основания плотины под действием сейсмической нагрузки, с помощью программы SIGMA/W определялись остаточные смещения. В каждом узле расчетной схемы определялась разница сейсмического напряженного состояния на двух соседних временных шагах. Эта разница затем использовалась как внешняя нагрузка. Таким образом, на каждом временном шаге определялись упругие и неупругие деформации, последние затем суммировались в соответствии с п. 8.4.19 СП 14.13330.2018 [124]. Кроме того, для сейсмического воздействия уровня МРЗ были определены остаточные смещения методом Ньюмарка, использованном при расчетном обосновании плотины.

а)



б)

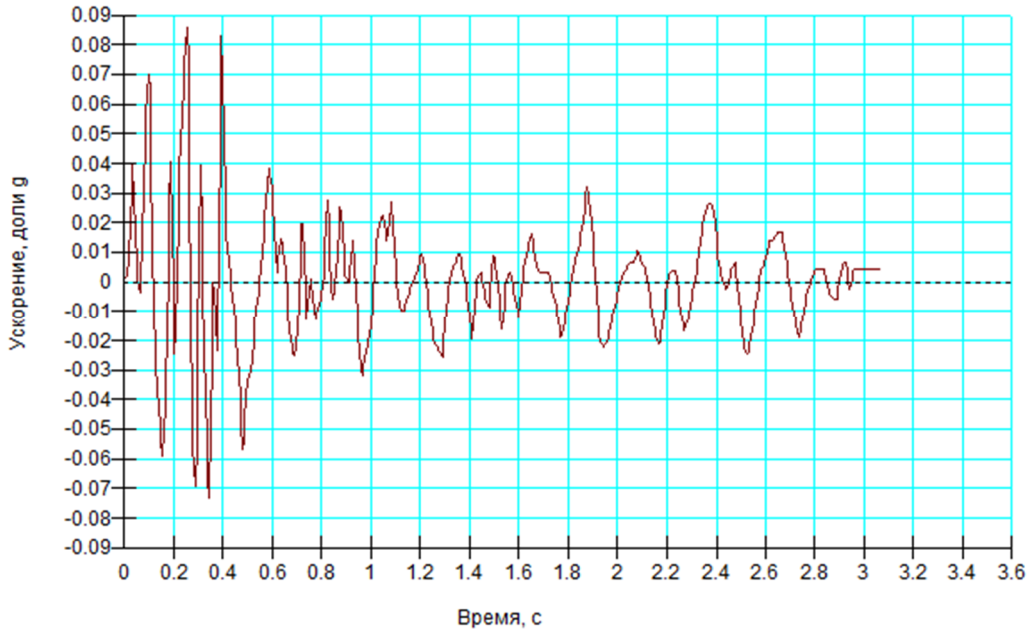
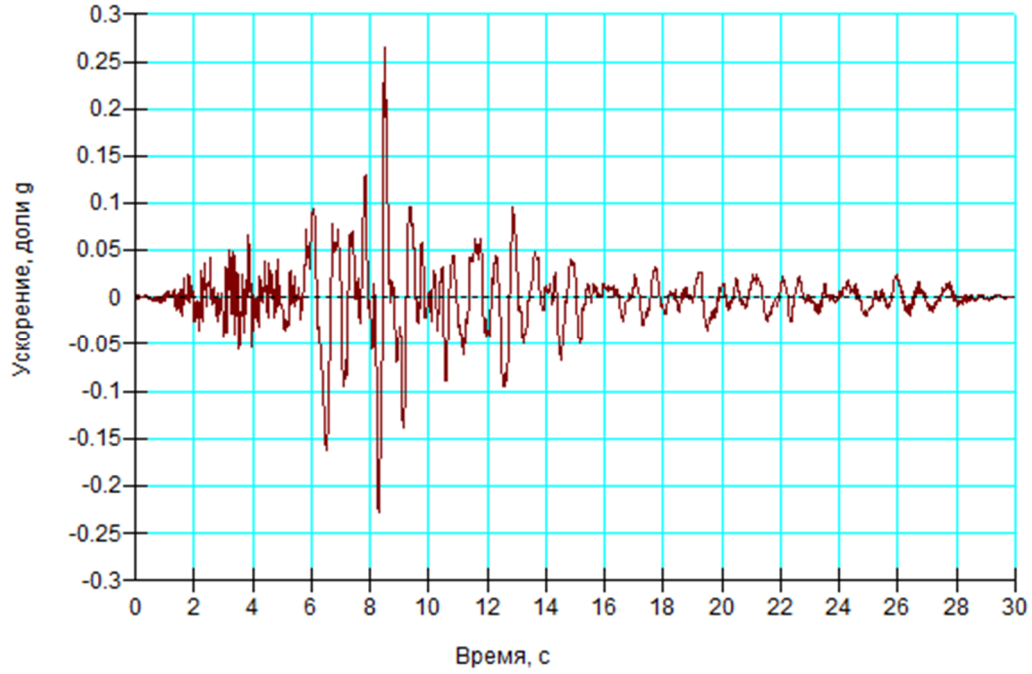


Рисунок 2.7 – Расчетная акселерограмма землетрясения уровня ПЗ:

а) горизонтальная компонента; б) вертикальная компонента

а)



б)

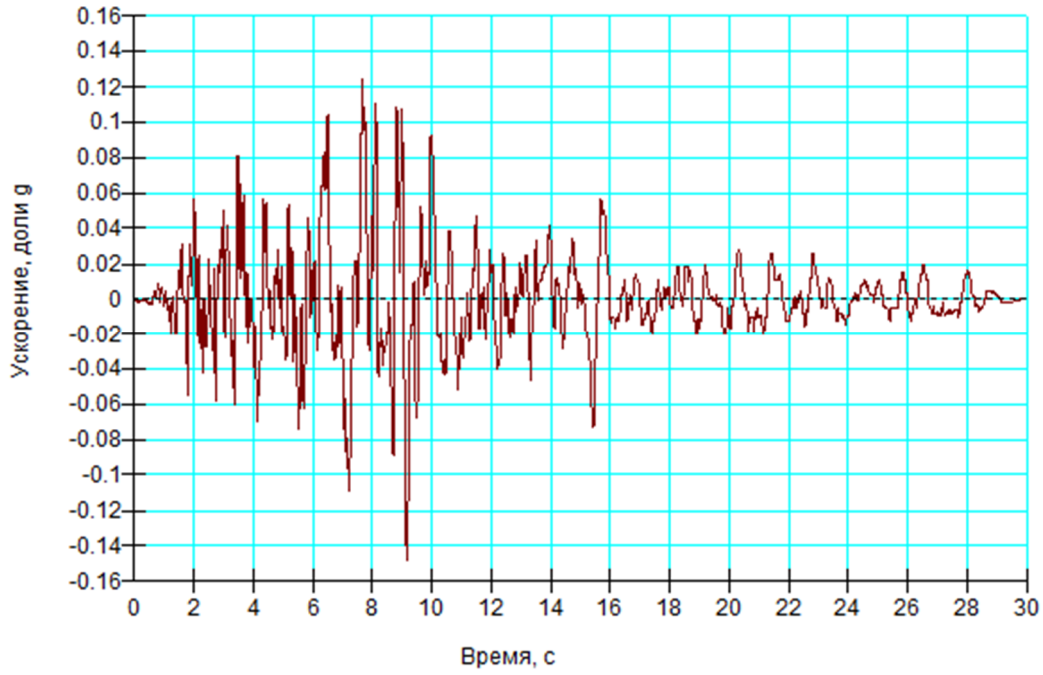


Рисунок 2.7 – Расчетная акселерограмма землетрясения уровня ПЗ:
а) горизонтальная компонента; б) вертикальная компонента

Ниже в табл. 2.3 приведены, а на рисунках А.33–А.44 Приложения А показаны расчетные значения остаточных смещений тела грунтовой плотины под действием сейсмических нагрузок.

Таблица 2.3 – Расчетные значения остаточных смещений гребня грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС при сейсмических воздействиях уровней ПЗ и МРЗ

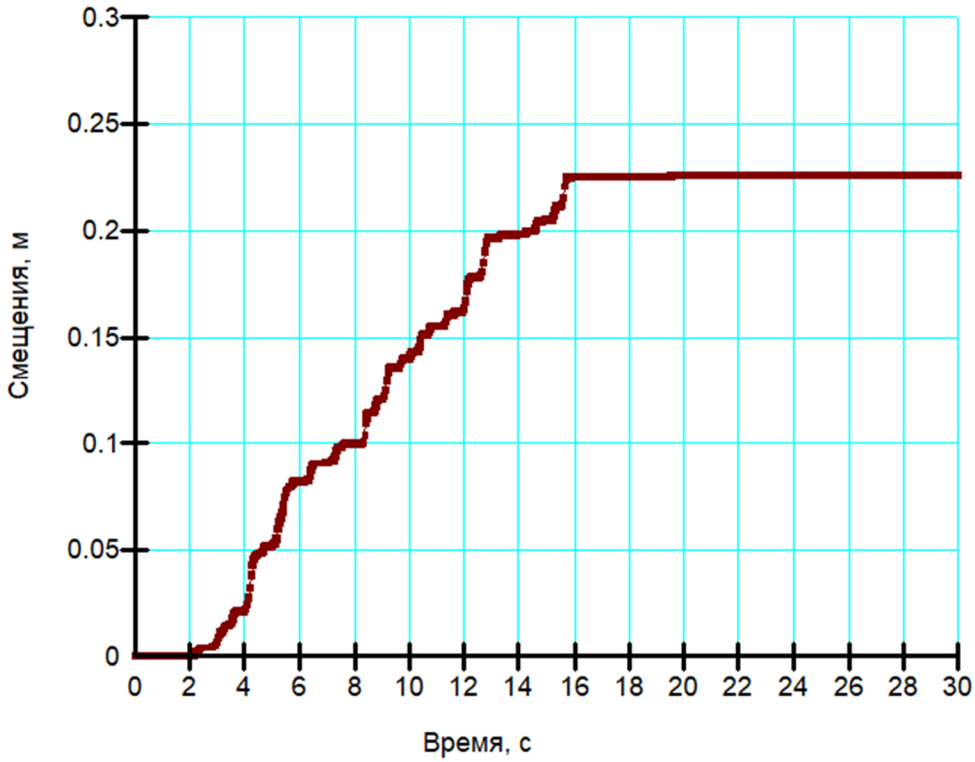
Сейсмическое воздействие уровня ПЗ					
Dx, м	№ рисунка	Dy, м	№ рисунка	Dxy, м	№ рисунка
1	2	3	4	5	6
Расчетный створ 2					
0,019	А.33, Прил. А	–0,124	А.34, Прил. А	0,125	А.35, Прил. А
Расчетный створ 3					
0,043	А.39, Прил. А	–0,096	А.40, Прил. А	0,104	А.41, Прил. А
Сейсмическое воздействие уровня МРЗ					
Расчетный створ 2					
–1,218	А.36а, Прил. А	–1,535	А.37а, Прил. А	1,571	А.38а, Прил. А
–1,361	А.36б, Прил. А	–0,491	А.37б, Прил. А	1,447	А.38б, Прил. А
Расчетный створ 3					
2,147	А.42а, Прил. А	–1,584	А.43а, Прил. А	2,66	А.44а, Прил. А
0,700	А.42б, Прил. А	–0,600	А.43б, Прил. А	0,922	А.44б, Прил. А

Из табл. 2.3 видно, что при сейсмическом воздействии уровня ПЗ, максимальные остаточные горизонтальные смещения гребня плотины прогнозируются на уровне 0,043 м в сторону водохранилища, вертикальные смещения (осадки) – 0,124 м.

При землетрясении уровня МРЗ остаточные горизонтальные смещения гребня плотины прогнозируются на уровне 2,147 м в сторону нижнего бьефа, вертикальные смещения (осадки) – 1,584 м, что значительно меньше превышения отметки гребня плотины над отметкой ФПУ (3,45 м). В такой ситуации возможно повреждение диафрагмы плотины, которое, однако, согласно результатам статических расчетов (2-ой особый расчетный случай) не приведет к потере фильтрационной прочности и устойчивости сооружения.

Анализ результатов, полученных при использовании метода Ньюмарка были показал значительно более низкие величины остаточных смещений вдоль потенциальной поверхности обрушения – 0,378 м в створе 2 и 0,226 м в створе 3 (рисунки А.45, А.46 Приложения А). Графики изменения во времени остаточных смещений вдоль поверхности обрушения по методу Ньюмарка для створов 2 и 3 представлены на рисунке 2.9.

а)



б)

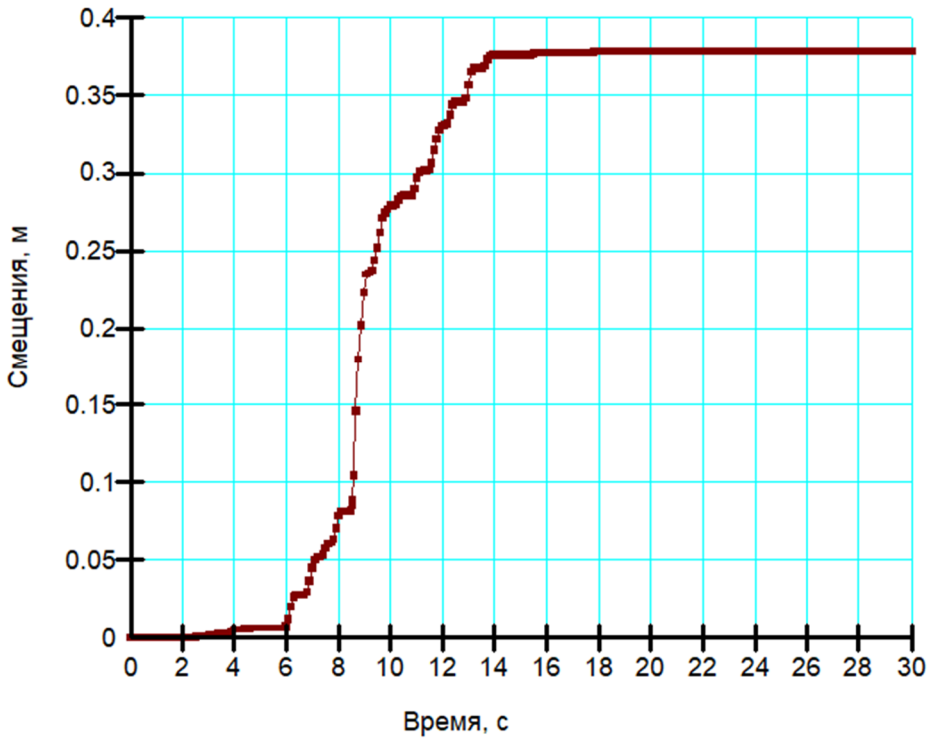


Рисунок 2.9 – Графики изменения во времени остаточных смещений вдоль поверхности обрушения, полученные по методу Ньюмарка для створа 2 (а) и створа 3 (б)

Различия в полученных результатах обусловлены тем, что в методе Ньюмарка смещения ограничены наперед заданной поверхностью обрушения, при этом не происходит какого-либо смещения призмы обрушения, если мгновенное значение коэффициента устойчивости превышает 1.000.

На рисунках 2.10 и 2.11 показаны графики изменения во времени максимальных вертикальных напряжений в диафрагме при сейсмическом воздействии уровня ПЗ соответственно в створах 2 и 3.

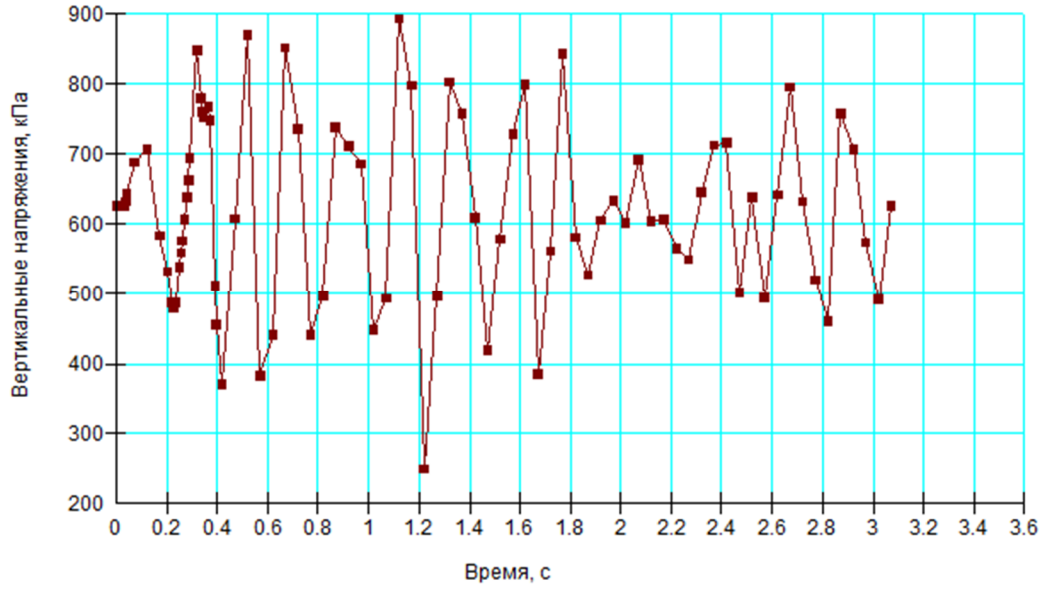


Рисунок 2.10 – График изменения во времени максимальных вертикальных напряжений в диафрагме при сейсмическом воздействии уровня ПЗ в створе 2

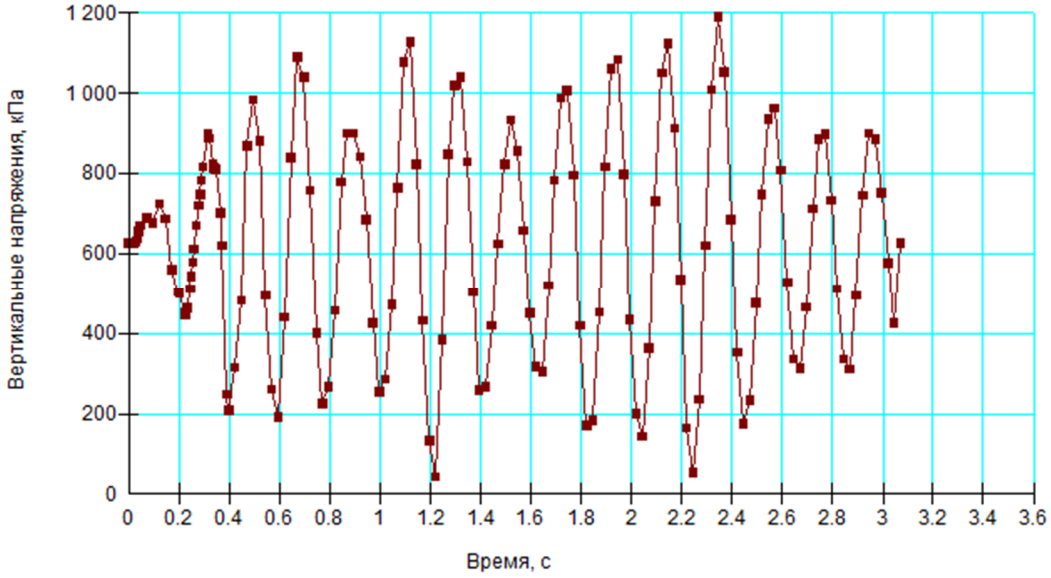


Рисунок 2.11 – График изменения во времени максимальных вертикальных напряжений в диафрагме при сейсмическом воздействии уровня ПЗ в створе 3

Из рисунках 2.10 и 2.11 видно, что возникающие при сейсмическом воздействии уровня ПЗ вертикальные напряжения прогнозируются на уровне 0,90 МПа и 1,19 МПа соответственно в створе 2 и 3, что не превышает предельных значений для особого сочетания нагрузок уровня ПЗ (1,26 МПа). Растягивающих напряжений в диафрагме при этом не прогнозируется.

Несмотря на значительные прогнозируемые смещения при землетрясении уровня МРЗ, превышение гребня над ФПУ остается достаточным (3.45 м против 2.66 м). Отсутствие растягивающих напряжений в диафрагме при ПЗ и сохранение фильтрационной прочности даже при ее условном повреждении (расчетный случай 2) позволяют заключить, что сейсмостойкость плотины обеспечивается в рамках принятых критериев для особых сочетаний нагрузок.

Ключевые прогнозные результаты:

1. Статическая устойчивость. Минимальные коэффициенты устойчивости k_s для основного сочетания нагрузок составляют 1,56–1,67, для особого (без сейсмики) – 1,56–1,68. Все значения существенно (более чем на 20%) превышают нормативные требования для сооружений I класса.

2. Сейсмическая устойчивость и смещения. При ПЗ прогнозируются незначительные остаточные смещения гребня: горизонтальные – до 0,04 м, вертикальные (осадка) – до 0,12 м. Напряжения в диафрагме не превышают предельных значений. При МРЗ прогнозные остаточные смещения возрастают: горизонтальные – до 2,15 м в сторону низового бьефа, осадка – до 1,58 м. Однако даже эти значения меньше запаса превышения гребня над ФПУ (3,45 м). Расчеты по методу Ньюмарка дают более консервативную оценку смещений по поверхностям скольжения – 0,23–0,38 м.

2.6 Сводная таблица прогнозных расчетных показателей

Для наглядности и удобства последующего сопоставления с натурными данными ключевые прогнозные параметры сведены в Таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Сводные прогнозные показатели работы грунтовой плотины с ГЦБД из БСС по результатам расчетного моделирования

№	Контролируемый параметр	Расчетный случай	Прогнозное значение	Нормативное/критическое значение	Примечание, цель контроля
1. Фильтрационный режим					
1.1.	Градиент напора в основании	Основной	≤0,20 д.е.	Iкр=0,43 д.е.	Оценка фильтрационной прочности основания
1.2.	Градиент напора в теле	Основной	0,95 д.е.	Iкр=1,32 д.е.	Оценка фильтрационной прочности тела
1.3.	Гашение напора на ПФЭ	Основной	>90%	–	Оценка эффективности ПФЭ
2. Напряженно-деформированное состояние					
2.1.	Характер напряжения в ГЦБД	Все случаи	Сжатие по всей высоте	Отсутствие растягивающих напряжений	Критерий трещиностойкости ПФЭ
2.2.	Напряжения в ГЦБД, макс. величина	Основной	0,7–0,8 МПа	1,2 МПа	Оценка запаса прочности ПФЭ
2.3.	Осадка гребня (от веса и напора)	Основной	0,2–0,3 м	–	Прогноз осадочных деформаций
3. Устойчивость					
3.1.	Коэффициент общей устойчивости откосов $к_s$	Основной	1,562–1,867	$k_{норм}$=1,250	Оценка запаса статической устойчивости
		Особый	1,560–1,865	$k_{норм}$=1,187	
3.2.	Коэффициент местной устойчивости откосов $к_s$	Основной	1,404–1,406	$k_{норм}$=1,250	
		Особый	1,400–1,406	$k_{норм}$=1,187	
3.3.	Остаточные смещения гребня (горизонтальные / вертикальные)	Сейсмика (ПЗ)	~0,04м/~0,12м	–	Оценка сейсмостойкости
3.4.	Остаточные смещения гребня (горизонтальные / вертикальные)	Сейсмика (МРЗ)	до 2,15 м / до 1,58 м	Запас над ФПУ=3,45 м	Оценка устойчивости при МРЗ

2.7 Выводы к главе 2

В рамках диссертационного исследования были проанализированы результаты расчетов НДС и режима фильтрации грунтовой плотины Нижне-Бурейского гидроузла с глиноцементобетонной диафрагмой из буросекущихся свай, выполненного во «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» с участием автора. Автором осуществлена постановка задачи расчетов, назначены начальные граничные условия, выполнен анализ результатов расчетного моделирования и в дальнейшем данные использованы при интерпретации данных натурных наблюдений (Глава 3) и формировании рекомендаций к системе мониторинга (Глава 4) и рациональному комплексу КИА для плотин с ГЦБД из БСС (Глава 5).

1. Выполненный анализ позволил выявить зоны потенциально опасных областей ГЦБД из БСС и в дальнейшем обосновать приоритетные участки размещения КИА.

2. Получен комплекс прогнозных количественных показателей, характеризующих ожидаемое поведение сооружения при основных и особых сочетаниях нагрузок (Таблица 2.4). Ключевыми прогнозными показателями являются: обеспеченность фильтрационной прочности тела и основания, исключительное наличие сжимающих напряжений в материале диафрагмы, запас статической устойчивости откосов.

3. Анализ расчетных исследований НДС выявил, что в условиях эксплуатации в теле плотины и в ГЦБД формируются деформации, величины и распределение которых оказывают определяющее влияние на работоспособность ПФЭ и не могут быть охарактеризованы только показателями фильтрационного режима.

4. Результаты анализа расчетных исследований подтвердили необходимость включения в систему мониторинга грунтовых плотин с ГЦБД из БСС инструментального контроля НДС и горизонтальных смещений наряду с традиционным фильтрационным контролем.

5. Результаты расчетного моделирования сформировали теоретическую и количественную основу для верификации реальной работы плотины. Сводные прогнозные данные, проанализированные и представленные в Таблице 2.2, являются ориентирами для последующего сравнительного анализа с фактическими данными натурного мониторинга, изложенными в Главе 3. В перспективе это позволит оценить адекватность расчетных моделей, уточнить параметры работы ГЦБД из БСС в реальных условиях эксплуатации и верифицировать принятые критерии безопасности.

Глава 3 Оценка состояния грунтовой плотины с ГЦБД из БСС Нижне-Бурейской ГЭС по данным натурных наблюдений

Целью анализа данных натурных наблюдений являлась оценка особенностей работы ГЦБД из БСС в составе грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС в условиях эксплуатации, а также выявление деформационных и фильтрационных процессов, не учитываемых или недостаточно полно отражаемых расчетными моделями.

3.1 Анализ проектного и фактического составов, номенклатуры и объема КИА

3.1.1 Работоспособность КИА грунтовой плотины

Состав и объем КИА разработаны генеральным проектировщиком Нижне-Бурейской ГЭС АО »Ленгидропроект». В период строительства гидроузла АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» подготовило предложения по оснащению грунтовой плотины КИА, которые были частично приняты при уточнении проекта. В частности, в примыканиях грунтовой плотины к левобережному склону и сопрягающему устою были установлены щелемеры ПЛПС-10 (производство АО «НИИЭС») для контроля раскрытия контактного шва между бетоном и глиноцементобетоном.

Таблица 3.1 – Состав КИА грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС [46]

№ п/п	Наименование КИА	Количество установленной КИА, шт		
		проект	установлено	действует
1	Знак планово-высотный (ПВ)	9	8	8
2	Марка поверхностная грунтовая (МП)	9	9	9
3	Марка глубинная грунтовая (МГ)	18	18	18
4	Пьезометр опускной (П)	42	55	55
5	Инклинометр (И)	4	4	4
6	Преобразователь температуры струнный	94	94	87

№ п/п	Наименование КИА	Количество установленной КИА, шт		
		проект	установлено	действует
7	Преобразователь давления воды струнный	6	6	3
8	Преобразователь напряжения грунта	24	24	19
9	Преобразователь линейных перемещений струнный	12	12	7
10	Преобразователь линейных перемещений (в ГЦБД)	12	12	9
11	Преобразователь напряжений (в ГЦБД)	12	12	10

В настоящее время работоспособными остаются 90% КИА гидроузла, что является свидетельством высокой качества проводимых монтажных работ [46].

3.1.2 Закладная КИА грунтовой плотины

Закладная КИА в грунте упорных призм представлена отечественными моделями датчиков производства АО «НИИЭС» (Россия) [48, 46]:

- Преобразователи температуры струнные ПТС-60;
- Преобразователи давления воды струнные ПДС-10;
- Преобразователи напряжения грунта ГД-10 и ГД-30;
- Преобразователи линейных перемещений струнные ПЛПС-10.

В ПФЭ грунтовой плотины проектом предусмотрена установка преобразователей компании Geokon (США) [48, 46]:

- Преобразователей линейных перемещений ПЛП-4430;
- Преобразователь напряжений ПНГ-4800.

Фильтрационный режим

Фильтрационный режим в достаточной мере контролируется с помощью опускных пьезометров классической конструкции, при этом 12 из 55 автоматизированы. Расположение водоприемных частей пьезометров позволяет контролировать фильтрационные потоки в основании, на контакте с ним, а также в теле грунтовой плотины:

- 8 шт. – для контроля фильтрационного режима тела плотины;
- 29 шт. – для контроля фильтрационного режима на контакте со скальным основанием;

− 18 шт. – для контроля фильтрационного режима через цементационную завесу в основании [71].

Для автоматизации выбраны погружные датчики давления воды Метран-55 ЛМП 307, которые зарекомендовали себя в качестве надежного средства инструментального контроля.

В трех измерительных створах №№2, 3, 4 на ПК 0+99, ПК1+78 и ПК2+53 на отметке 107,00 м (попарно со стороны верхнего и нижнего бьефов) на контакте с аллювиальным основанием установлены струнные преобразователи давления воды ПДС-10 с диапазоном измерений 0÷1,0 МПа, показания которых в пересчете на метры водяного столба фактически дублируют показания опускных пьезометров с установленными в этой зоне водоприемниками.

Температурный режим

Преобразователи температуры ПТС-60 установлены в центральной призме за ГЦБД из БСС, в переходной зоне и в низовой упорной призме [71]. Измерение происходит в шести контрольных створах на четырех отметках: 114.00 м, 123.00 м, 132.00 м, 138.00 м.

С помощью датчиков успешно контролируется температурный режим низовой упорной призмы, а также распределение в теле плотины зон влияния атмосферных воздействий или основания.

Напряжение в грунте

В песчаном грунте ядра плотины со стороны верхнего и нижнего бьефов относительно ПФЭ в трех створах на отметках 116.00 м и 126.75 м установлены датчики измерения нормального напряжения грунта ГД-10 и ГД-30 [71] с диапазоном измерений 0÷1,0 и 0÷3,0 МПа соответственно. Датчики ориентированы в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях для измерения нормальных напряжений в горизонтальной плоскости (σ_x) и вертикальной плоскости (σ_z). Разница в датчиках обусловлена исключительно высокими темпами строительства грунтовой плотины и фактическим наличием струнной аппаратуры у поставщиков.

Размещение датчиков напряжения грунта позволяют выполнять мониторинг напряженного состояния грунта в области контакта с ГЦБД, изучать и прогнозировать давление грунта при воздействии гидростатического давления на грунтовую плотину в условиях штатной эксплуатации [71].

Напряжение в противофильтрационном элементе

Проектом была предусмотрена установка КИА в трех створах (№№ 3, 4, 5) на четырех отметках: 105.00 м, 110.50 м, 116.00 м, 126.75 м. На каждой проектной отметке располагаются пары датчиков ПНГ-4800 и ПЛП-4430 для контроля вертикальных нормальных напряжений и линейных деформаций по высоте ПФЭ. Заранее подготовленные «гирлянды» преобразователей, в которых датчики надежно соединены между собой тросом, монтируются в скважины диафрагмы непосредственно перед укладкой ГЦБ смеси [50].

Впервые в практике гидростроительства благодаря техническому решению по оснащению ГЦБД из БСС КИА [68], получена возможность изучения НДС ГЦБ в качестве ПФЭ в условиях эксплуатации высокой грунтовой плотины высотой 41,5 м.

Раскрытие контактных швов

Конструктив грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС предполагает сопряжение ПФЭ с бетоном сопрягающего устоя (правый берег) и бетонной облицовкой скального левобережного массива посредством устройства глиноцементобетонных примыканий. Для контроля раскрытия контактного шва проектом предусмотрена установка преобразователей ПЛПС-10:

− в правобережном примыкании на отметках 111,00 м, 118,00 м, 125,00 м, 132,00 м;

− в левобережном примыкании по два преобразователя на отметках 118,00 м, 124,00 м, 130,00 м, 136,00 м.

3.1.3 Геодезическая КИА

Геодезические методы наблюдений за общими перемещениями грунтовой плотины по проекту предусматривают установку:

− планово-высотных знаков по гребню грунтовой плотины со стороны верхнего бьефа относительно оси сооружения на отм. 141,75 м;

− глубинных телескопических марок для наблюдений за послойными вертикальными перемещениями тела плотины (отметки 106,50 м, 114,00 м, 126,75 м, 138,50 м в створе № 1 и отметки 114,00 м, 126,75 м, 138,50 м в остальных створах);

− поверхностных марок для наблюдений за смещениями низовой бермы на отм. 120,00–141,75 м.

Состав КИА, предусмотренный проектом и установленный на грунтовой плотине Нижне-Бурейской ГЭС, достаточен для оперативного и всестороннего мониторинга за состоянием сооружения. При реализации инновационных решений любых конструкций и сооружений [14, 62] в гидротехническом строительстве, при проектировании КИА на разработчиков возлагается новая дополнительная задача – заложить основу для изучения работы такого уникального сооружения в условиях реальной эксплуатации.

Система мониторинга включает в себя комплексы для контроля фильтрационного и температурного режимов, НДС грунта и самого ПФЭ, а также геодезические средства. Особенностью является целенаправленное оснащение ГЦБД из БСС дистанционными датчиками для контроля НДС, что реализовано в практике отечественного гидростроения впервые.

Низкий процент работоспособности КИА в ПФЭ свидетельствует о недостаточной отработанности технологии монтажа на начальном этапе, что обусловило необходимость ее совершенствования в рамках настоящей диссертации.

3.2 Результаты и анализ натурных наблюдений за фильтрационным состоянием грунтовой плотины с ГЦБД Нижне-Бурейской ГЭС

В результате проведенного автором диссертации анализа натурных данных получены следующие результаты исследования фильтрационного режима грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС.

Гашение напора через грунтовую плотину с начала наблюдений составляет более 90%, что свидетельствует об эффективной работе противофильтрационного элемента и цементационной завесы в основании.

Средние действующие градиенты фильтрационных напоров в диафрагме плотины при проектном напоре находятся в пределах $I_{д.ср}$=30–32, что значительно ниже значений, допустимых для материалов глиноцементных элементов в виде «стена в грунте» [48].

По данным измерений струнных преобразователей ПДС перед диафрагмой и за ней можно определить потери напора на контуре «диафрагма-цемзавеса». Так как часть датчиков ПДС, установленных в верхнем бьефе, неработоспособны, отметка уровня воды перед диафрагмой принималась равной УВБ. Потери напора на контуре «диафрагма-цемзавеса» после наполнения водохранилища в 2019 году и при последующей эксплуатации определялись по формуле:

$$h_w=(\text{УВБ}–\text{ПДС}_{\text{НБ}})/(\text{УВБ}–\text{УНБ})\times 100 \qquad (3.1)$$

Среднее значение потери напора составило:

- в 2019 г. – 96%;
- в 2020 г. – 95%;
- в 2021 г. – 97%;
- в 2022 – 2025 гг. – 94%.

Выполненный автором анализ показал, что данные показаний рабочей дистанционной КИА коррелируются с уровнями воды в пьезометрах и УВБ. Показания датчиков давления, их корреляция с УВБ и УНБ, а также уровни воды в ближайших опускных пьезометрах, свидетельствуют о стабильном фильтрационном режиме в верховой и низовой упорных призмах.

На рисунках 3.1 и 3.2 представлено положение поверхности депрессии в грунтовой плотине. Показания пьезометров верховой призмы, расположенных

перед диафрагмой, близки к изменениям УВБ, что свидетельствует о сохранении свойств водоупорности противофильтрационного контура плотины.

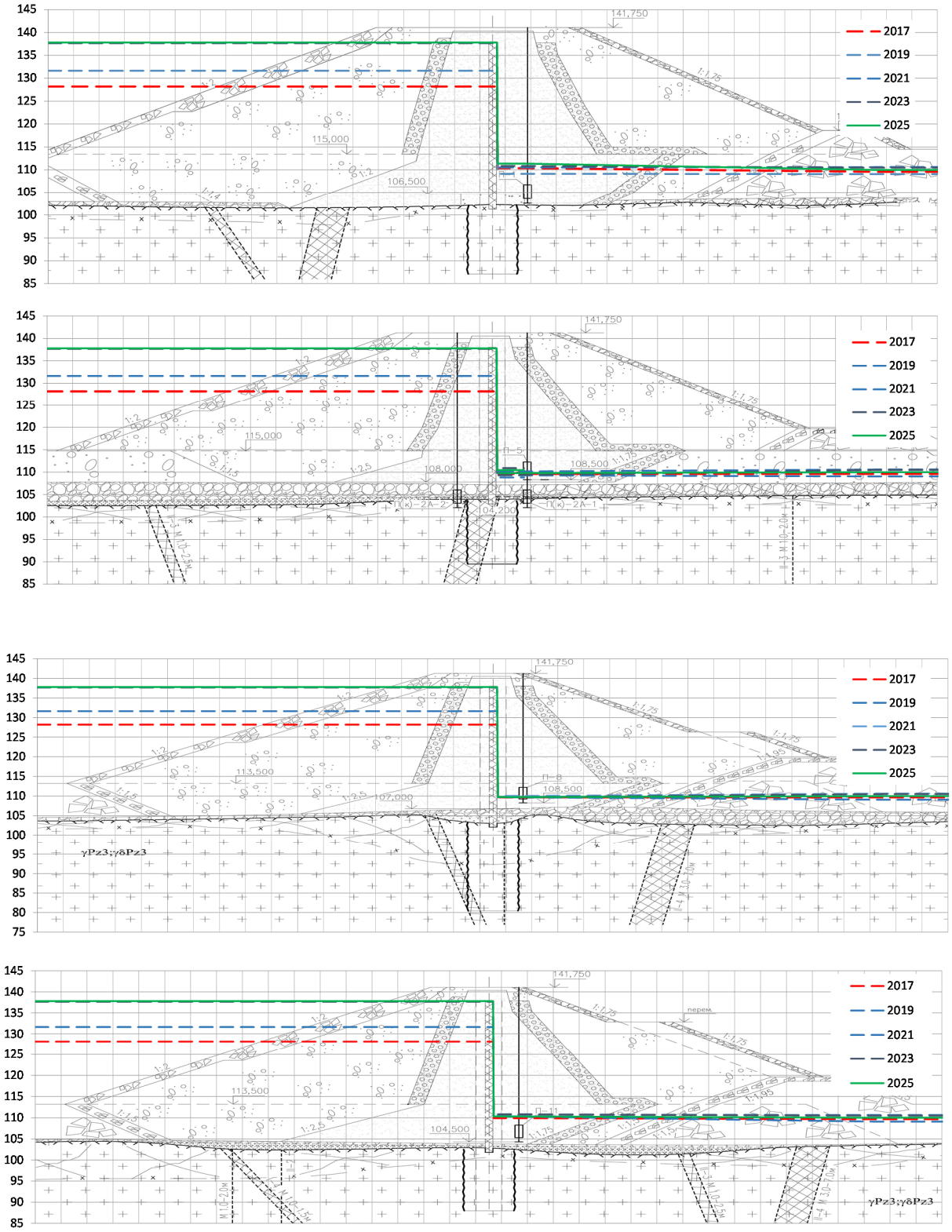


Рисунок 3.1 – Положение поверхности депрессии в грунтовой плотине НБГЭС. Створы (сверху вниз): 1, 2, 3, 4

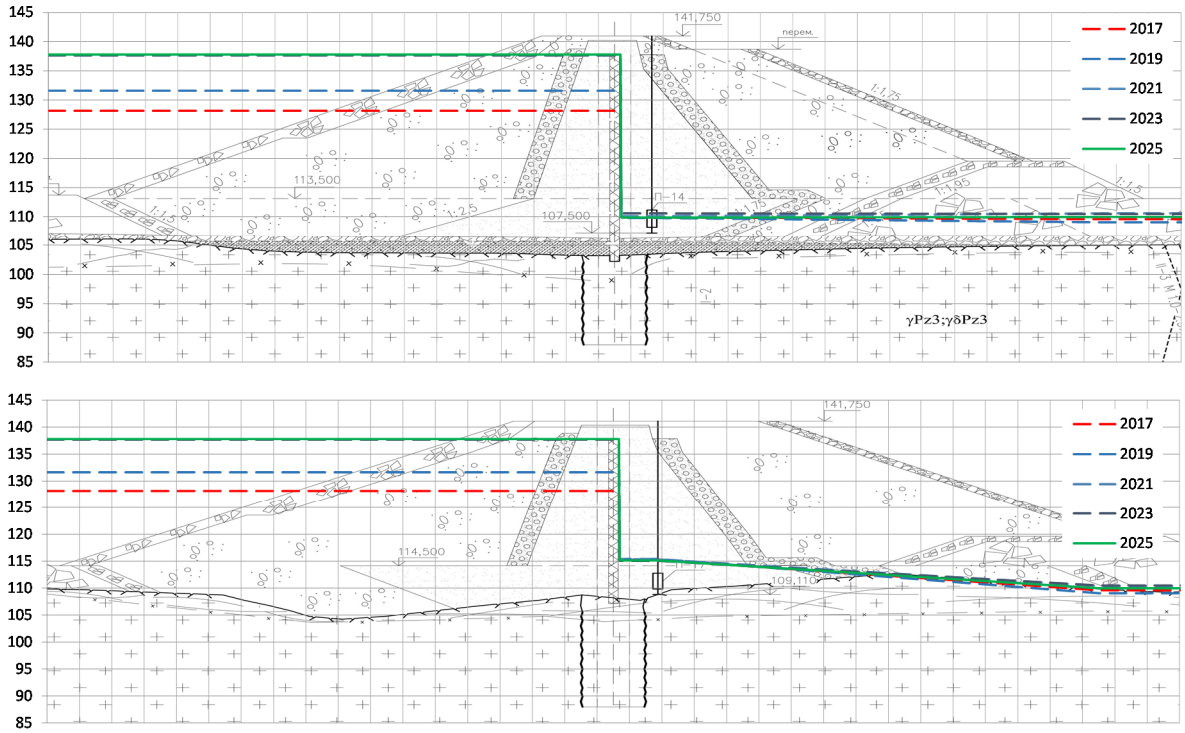


Рисунок 3.2 – Положение поверхности депрессии в грунтовой плотине НБГЭС. Створы 5 и 6

Поверхность депрессии за ПФЭ формируется на отметках близких к УНБ (не более 0,5 м) [51]. При этом следует отметить, что в основании грунтовой плотины на отметке низа цементационной завесы наблюдается около 95% гашение напора.

Вычисленные автором градиенты напора в створах, где контролируется примыкание к диафрагме с низовой стороны поверхности депрессии представлены в табл. 3.2. Так как сведений об уровнях воды перед диафрагмой нет, принимается для расчета УБВ «с запасом». Реальные градиенты напора в диафрагме будут несколько ниже. Для расчета градиента напора в качестве длины пути фильтрации принят наиболее тонкий участок диафрагмы – место сечения БСС толщиной 0,85 м.

Таблица 3.2 – Градиенты напора в ГЦБД

№ п/п	Створ	Пьезометр	Максимальный уровень воды в пьезометре, м	УВБ, м	Толщина диафрагмы, м	Градиент напора
2019						
1	1	п-1	113,42	137,97	0,85	28,88
2	2	п-5в	113,65			28,61
3	3	п-8	113,48			28,81
4	4	п-11	113,61			28,66
5	5	п-14	113,57			28,71
6	6	п-17	116,13			25,69
2020						
7	1	п-1	113,51	137,79	0,85	28,56
8	2	п-5в	113,60			28,46
9	3	п-8	113,50			28,58
10	4	п-11	114,26			27,68
11	5	п-14	113,86			28,15
12	6	п-17	115,51			26,21
2021						
13	1	п-1	114,99	137,89	0,85	26,94
14	2	п-5в	114,82			27,14
15	3	п-8	115,17			26,73
16	4	п-11	115,38			26,48
17	5	п-14	114,79			27,18
18	6	п-17	116,51			25,15
2022						
19	1	п-1	112,50	137,89	0,85	29,87
20	2	п-5в	112,50			29,87
21	3	п-8	113,55			28,64
22	4	п-11	113,09			29,18
23	5	п-14	112,87			29,44
24	6	п-17	115,68			26,13
2023						
25	1	п-1	111,31	137,83	0,85	31,20
26	2	п-5в	111,10			31,45
27	3	п-8	110,39			32,28
28	4	п-11	110,97			31,60
29	5	п-14	111,65			30,80
30	6	п-17	115,30			26,51
2024						
31	1	п-1	111,50	137,87	0,85	31,02
32	2	п-5в	110,59			32,09
33	3	п-8	110,37			32,35
34	4	п-11	110,87			31,76
35	5	п-14	110,68			31,99
36	6	п-17	115,37			26,47
2025						
37	1	п-1	112,65	137,88	0,85	29,68
38	2	п-5в	112,55			29,80
39	3	п-8	112,59			29,75

№ п/п	Створ	Пьезометр	Максимальный уровень воды в пьезометре, м	УВБ, м	Толщина диафрагмы, м	Градиент напора
40	4	п-11	112,61			29,73
41	5	п-14	112,64			29,69
42	6	п-17	115,33			26,53

Исследованный в ходе диссертационной работы фильтрационный режим в грунтовой плотине характеризуется стабильностью во времени. В низовой упорной призме пьезометрические уровни остаются близки к значению УНБ после наполнения водохранилища и в течение всего периода начальной эксплуатации сооружения [48].

В соответствии с фильтрационными расчетами, выполненными при обосновании конструкции грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС установлено, что фильтрационный поток выходит на низовой откос плотины в пределах низового банкета [71]. Фактическое фильтрационное состояние, установленное автором в ходе диссертационного исследования, соответствует проектным расчетам, обеспечивая фильтрационную прочность грунтов тела и основания.

Анализ данных за период эксплуатации 2017–2025 гг. позволяет сделать следующие ключевые выводы о фильтрационном режиме:

− Гашение напора на контуре «диафрагма – цемзавеса» стабильно составляет 94–97%, что подтверждает высокую эффективность противофильтрационного контура [51];

− Действующие градиенты напора в ГЦБД (25–32,35 ед., Таблица 3.2) значительно ниже допустимого значения (100 ед.), что свидетельствует о отсутствии риска фильтрационной эрозии и условий для нарушения фильтрационной прочности [51];

− Фильтрационный режим стабилизировался после наполнения водохранилища и не имеет негативных тенденций, полностью соответствуя проектным прогнозам;

− Натурные данные полностью подтвердили результаты расчетных исследований, изложенные в Главе 2. Положение депрессионной поверхности и величины градиентов в теле и основании плотины соответствуют расчетным значениям.

3.3 Результаты и анализ натурных наблюдений за НДС грунтовой плотины с ГЦБД Нижне-Бурейской ГЭС

Напряженное состояние грунта тела плотины

При оценке статической работы грунтовой плотины с тонкой диафрагмой важным является изучение бокового давления грунта на диафрагму. Натурные определения бокового давления на диафрагму осуществлялись автором в контрольных створах 3, 4, 5 [71]. На рисунках 3.3–3.5 представлены эпюры напряжения в грунте со стороны верхнего и нижнего бьефов относительно диафрагмы плотины Нижне-Бурейской ГЭС до наполнения водохранилища, после наполнения и принятия проектной гидростатической нагрузки, а также в первые годы эксплуатации. Изменение напряжения грунтовой плотины по створам представлено в табл. 3.3.

Таблица 3.3 – Горизонтальные нормальные напряжения в теле грунтовой плотины

Год	Отметка, м	Напряжение со стороны верхнего бьефа, МПа	Напряжение со стороны нижнего бьефа, МПа
Створ №3			
2018	126,75	0,16	0,05
	116,00	0,18	0,09
2019	126,75	0,20	0,07
	116,00	0,18	0,09
2020	126,75	0,18	0,07
	116,00	0,23	–
2021	126,75	0,18	0,07
	116,00	0,23	–
2022	126,75	0,17	0,07
	116,00	0,22	–
2023	126,75	0,17	0,07
	116,00	0,21	–
2024	126,75	0,17	0,07

Год	Отметка, м	Напряжение со стороны верхнего бьефа, МПа	Напряжение со стороны нижнего бьефа, МПа
	116,00	0,22	–
2025	126,75	0,17	0,07
	116,00	0,21	–
Створ №4			
2018	126,75	–	0,04
	116,00	0,27	0,06
2019	126,75	–	0,06
	116,00	0,30	0,09
2020	126,75	–	0,06
	116,00	0,29	0,09
2021	126,75	–	0,06
	116,00	0,27	0,08
2022	126,75	–	0,06
	116,00	0,25	0,08
2023	126,75	–	0,06
	116,00	0,23	0,08
2024	126,75	–	0,07
	116,00	–	0,08
2025	126,75	–	0,06
	116,00	–	0,07
Створ №5			
2018	126,75	0,06	0,07
	116,00	0,20	0,15
2019	126,75	0,12	0,10
	116,00	0,27	0,24
2020	126,75	0,12	0,10
	116,00	0,27	0,26
2021	126,75	0,12	0,10
	116,00	0,30	0,27
2022	126,75	0,12	0,10
	116,00	0,27	0,27
2023	126,75	0,13	0,10
	116,00	0,22	0,28
2024	126,75	0,12	0,09
	116,00	0,22	0,28
2025	126,75	0,12	0,10
	116,00	0,22	0,28

Автором данной диссертации установлено, что эпюры напряжения в грунте со стороны верхнего и нижнего бьефов относительно диафрагмы значительно отличаются друг от друга, как по формам эпюр, так и по величинам. При этом напряжение в грунте со стороны нижнего бьефа в створе №5 на отм. 116,0 м в несколько раз выше, чем в створах №№3 и 4. Учитывая идентичность способа, времени монтажа и тип КИА, подобная разница в показаниях может быть обусловлена большей деформативностью ГЦБД в створе №5 вследствие

особенностей отсыпки и уплотнения грунта при возведении плотины, а также устройства самих ГЦБ свай [47, 71].

ГЦБД из БСС, в силу своей жесткости, слабо передает нагрузку со стороны верхнего бьефа на низовую призму плотины. Это значит, что диафрагма, в виду её жесткости и особенностей опорного узла, не имеет возможности относительно свободно перемещаться под нагрузкой в сторону низовой призмы без изгиба и вынуждена воспринимать на себя значительную часть нагрузки.

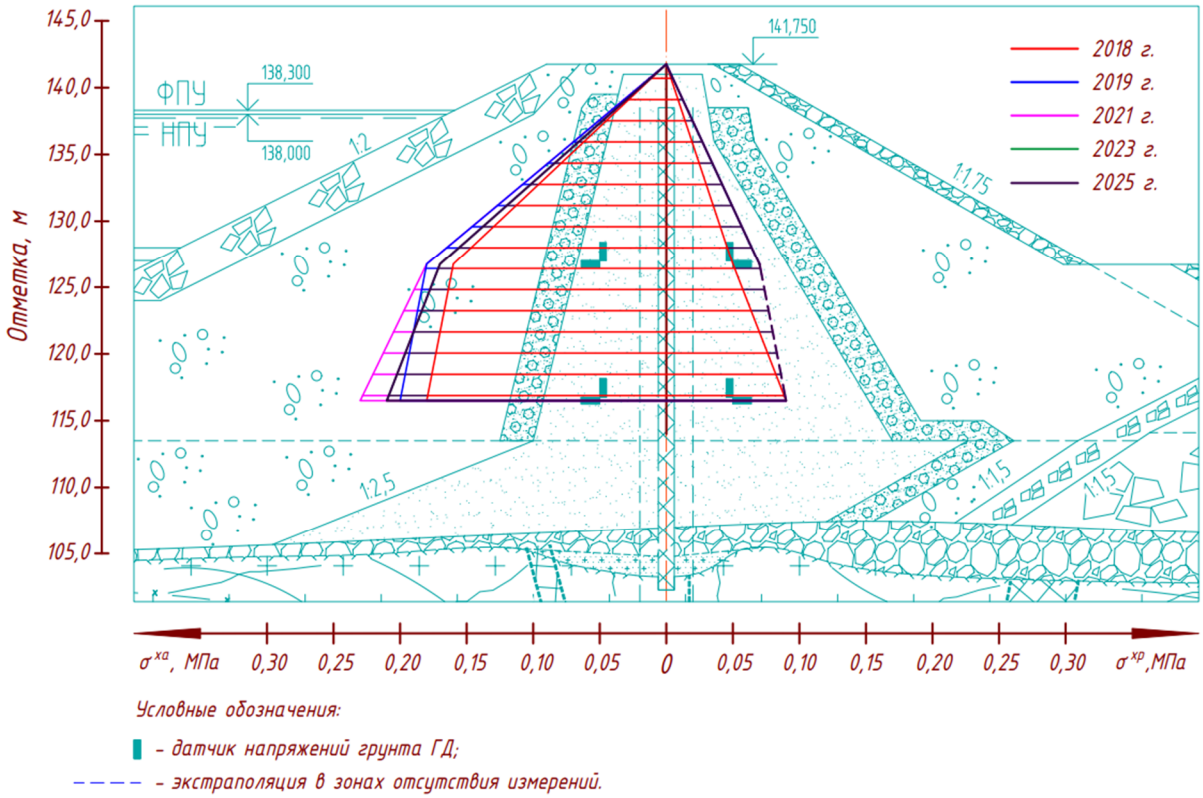


Рисунок 3.3 – Эпюра нормальных горизонтальных напряжений σ_x в теле плотины. Створ 3

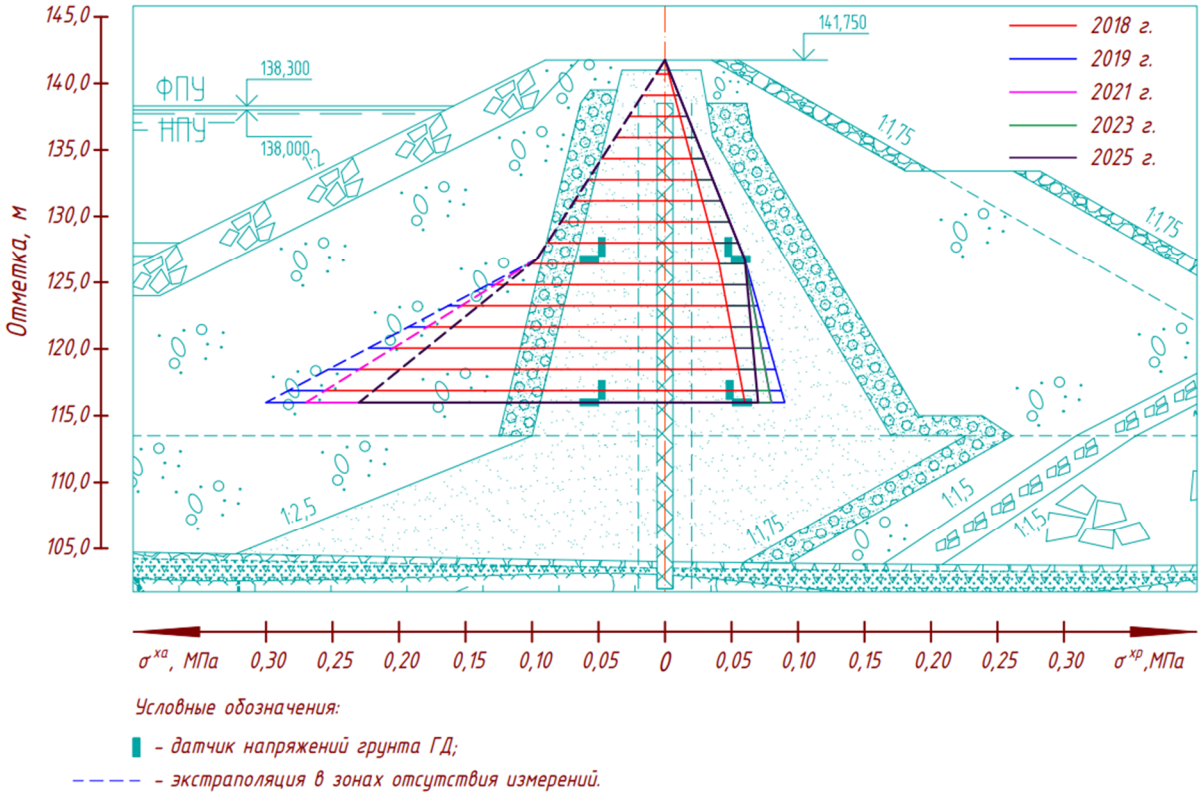


Рисунок 3.4 – Эпюра нормальных горизонтальных напряжений σx в теле плотины. Створ 4

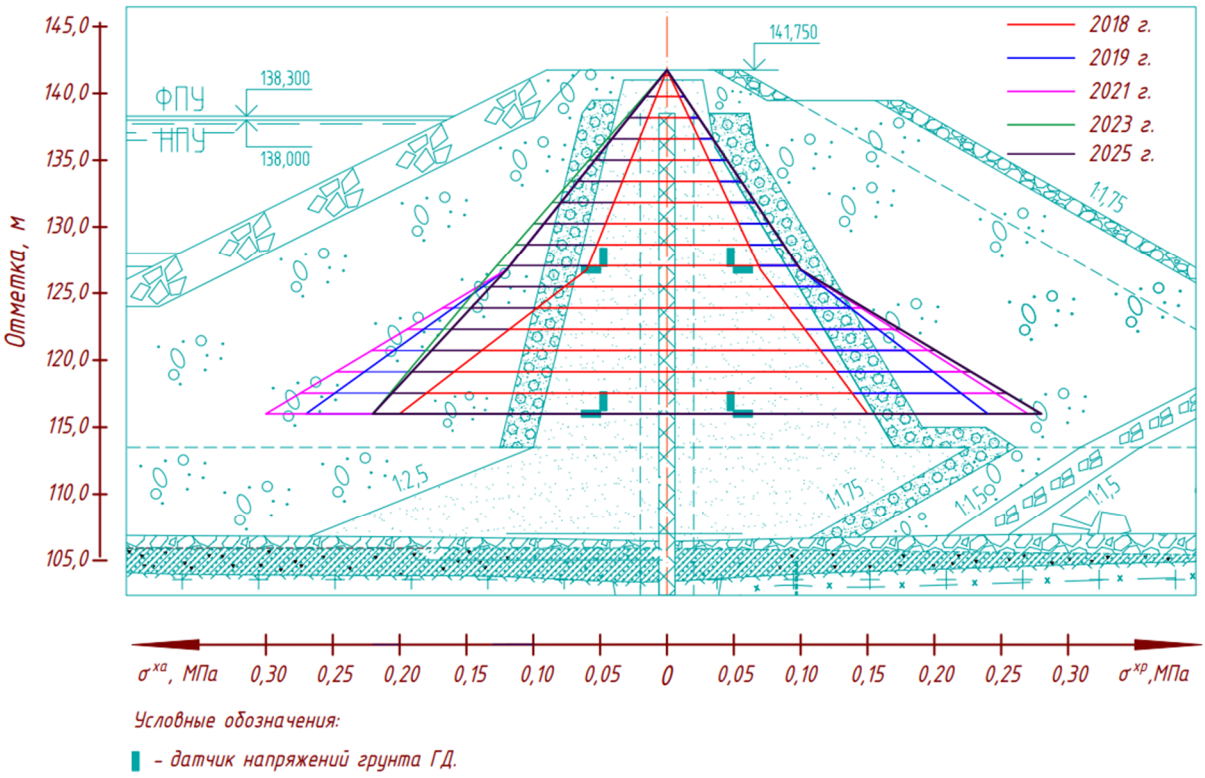


Рисунок 3.5 – Эпюра нормальных горизонтальных напряжений σx в теле плотины. Створ 5

При обработке и анализе результатов натурных наблюдений автором диссертации установлено, что передача давления, действующего на диафрагму, на

низовую призму песчаного ядра в настоящее время характеризуется значениями коэффициента передачи нагрузки ($k_{пн}$) в пределах 0,22÷0,95 – на отм. 116,00 м и 0,31÷0,83 – на отм. 126,75 м [71].

Кроме того, на НДС диафрагмы значительным образом сказывается достаточно сложное взаимодействие её с прилегающими к ней с верховой и низовой сторон грунтовыми массивами упорных призм тела плотины. При осадке призм грунт проскальзывает с трением по поверхностям диафрагмы, оказывая на неё силовое воздействие.

Напряженное состояние ПФЭ плотины

Ввиду отсутствия репрезентативных данных натурных наблюдений по КИА, расположенной в ГЦБД створа № 5 [71], при анализе состояния ПФЭ автором рассматривались только результаты мониторинга по створам №3 и №4.

По итогам анализа данных мониторинга за 7 лет эксплуатации грунтовой плотины с ГЦБД из БСС можно сделать вывод, что диафрагма во всех контрольных створах испытывает по всей её высоте вертикальные напряжения сжатия, изменяющиеся в различных сечениях в пределах:

в Створе 3 от 0,01 до 0,53 МПа;

в Створе 4 от 0,06 до 0,47МПа.

Аналогичные напряжения в прилегающих к диафрагме массивах грунта в отдельных сечениях близки по величине, превышают или меньше напряжений собственно в диафрагме (рисунки 3.6–3.7). Учитывая, что диафрагма находится в сжатом (по вертикали) состоянии, в совокупности с проводимых комплексом регулярных натурных наблюдений, автором сделан вывод, что она успешно выполняет функцию ПФЭ плотины. В части же раскрытия межсвайных швов и их водонепроницаемости – проектом такие наблюдения не предусмотрены. Существующие методы контроля состояния ГЦБД из БСС изложены автором в Главе 1. Разработкам дополнительных способов контроля и совершенствованию методики наблюдений за состоянием ГЦБД из БСС посвящена Глава 4.

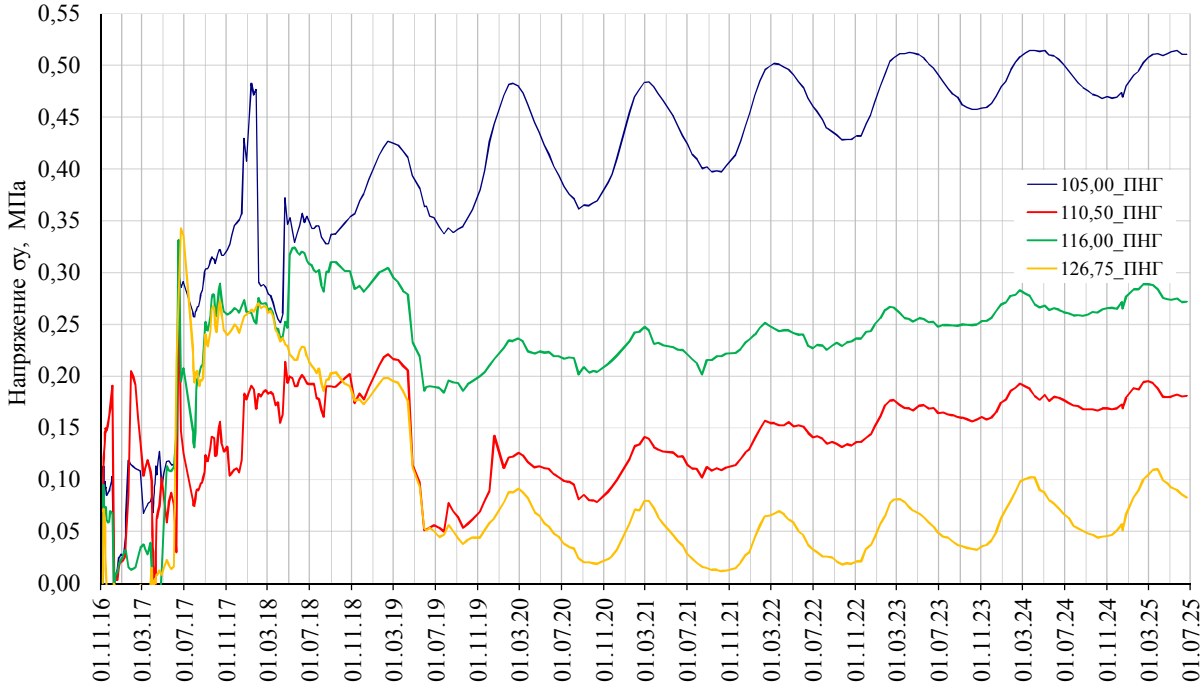


Рисунок 3.6 – Нормальные напряжения по вертикали в ГЦБД грунтовой плотины. Створ 3

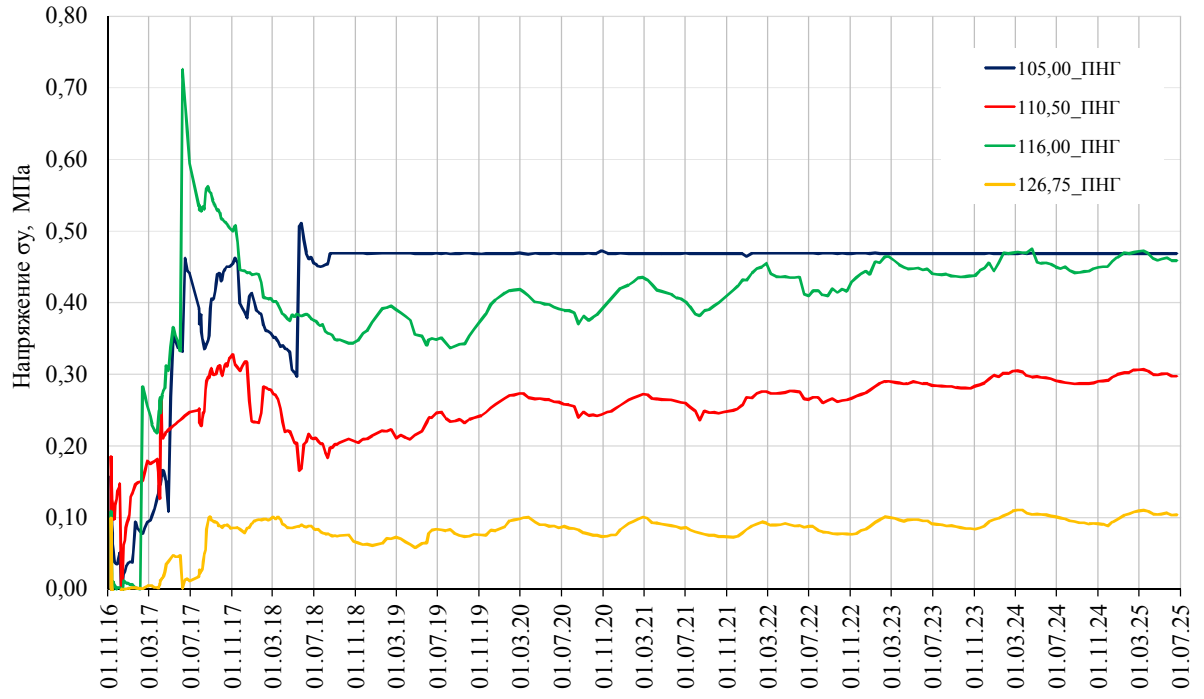


Рисунок 3.7 – Нормальные напряжения по вертикали в ГЦБД грунтовой плотины. Створ 4

В ходе исследования автором определено, что НДС диафрагмы Нижне-Бурейской ГЭС имеет особый характер: в ГЦБД не наблюдается ожидаемого убывания напряжений с увеличением отметки [47]. При этом наибольшие значения сжимающих напряжений наблюдаются в районе заглубления диафрагмы

в скальное основание на отм. 105,00 м (не менее 0,52–0,53 МПа), минимальные – на отм 126,75 м (0,01–0,08 МПа). Таким образом, преобразователи, установленные в зоне защемления в скальное основание на отметке 105,00 м, показывают значения, близкие к границе своего диапазона измерений. Расчетные сжимающие напряжения в ГЦБД не превышали 0,70 МПа в строительный период и 0,80 МПа при наполнении водохранилища. Важно отметить, что применение датчиков измерения напряжений с бо́льшим диапазоном измерений (например, до 1,0 МПа) уменьшили бы вероятность выхода их из строя по причине перегрузки. Наибольшие приращения напряжений были зафиксированы во время наполнения водохранилища, в последующем напряжения в ГЦБД оставались стабильными [47].

Важно отметить, что расчетными исследованиями при обосновании конструкции плотины АО «Ленгидропроект» было установлено, что с учетом вариации деформационных свойств ГЦБ при основных и особых сочетаниях нагрузок растягивающие напряжения в диафрагме могут возникать в примыканиях к берегу или сопрягающему сооружению, а сжимающие напряжения не превышают предела прочности глиноцементобетона на сжатие.

Вместе с тем, общая картина НДС грунтовой русловой плотины и диафрагмы укладывается в расчетное обоснование генерального проектировщика и свидетельствует о наличии сжимающих напряжений на всех контролируемых сечениях [71]. Полученные результаты в виде распределения сжимающих напряжений по высоте могут быть объяснены немонолитной работой диафрагмы в силу особенностей конструкции и производства работ. Каждая контролируемая свая имеет уникальное НДС и испытывает различные сочетания нагрузок, определяющих это состояние [47]. При этом сваи диафрагмы находятся в сжатом состоянии, исключающем возможность развития гидроразрыва межсвайных швов.

3.4 Сопоставление результатов натурных исследований с расчетными показателями

В таблице 3.4 приведено сравнение полученных характеристик ГЦБД и примыкающего грунта, полученных по результатам расчетного обоснования и в ходе анализа натурных исследований, выполненного автором в рамках диссертационного исследования.

Фактические показатели работы сооружения в большинстве случаев оказались на 13–43% ниже расчетных значений, что свидетельствует о достаточно консервативных расчетных предпосылках, принятых при проектировании плотины.

Давление грунта, оказываемое на диафрагму по результатам мониторинга, несколько отличается от результатов расчетов как при проектировании плотины, так и при численном моделировании в диссертационном исследовании, что обусловлено большим обжатием диафрагмы, технологией отсыпки и ручного уплотнения грунта в зоне расположения датчиков.

Выполненное сопоставление результатов расчетных исследований и данных мониторинга подтверждают удовлетворительную сходимость по порядку и характеру распределения измеренных параметров, корректность расчетных моделей и, как следствие, надежность грунтовой плотины с ГЦБД из БСС в условиях эксплуатации [48, 51].

Таблица 3.4 – Сравнение характеристик, полученных при обосновании конструкции грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС и по данным натурных наблюдений

Измеряемый параметр	По данным Генерального проектировщика АО «Ленгидропроект»	По данным НИУ МГСУ	По данным диссертационного исследования автора		Критическое значение
			Расчетные исследования	Анализ натурных наблюдений	
Максимальное вертикальное сжатие в ГЦБД, МПа	0,78	0,93	0,80	0,53	1,2 (по данным АО «Ленгидропроект» 1,1 (по данным НИУ МГСУ)
Растягивающее напряжение, МПа	до 0,4 МПа в левобережном примыкании; до 1,0 МПа в примыкании к сопрягающему устою	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует	–
Напряжение в грунте со стороны верхнего / нижнего бьефов, МПа	0,10 / 0,40	0,20 / 0,40	0,15 / 0,10	0,30 / 0,28	–
Максимальный градиент напора на ГЦБД	37,5	– Расчет выполнялся без учета ГЦБД	31,3	32,35	150
Коэффициент запаса устойчивости, основное сочетание $\left(\frac{\text{верховой откос}}{\text{низовой откос}}\right)$	$\frac{1{,}440}{1{,}360}$	–	$\frac{1{,}668}{1{,}562}$	–	1,250
Коэффициент запаса устойчивости, особое сочетание $\left(\frac{\text{верховой откос}}{\text{низовой откос}}\right)$	$\frac{1{,}440}{1{,}360}$	–	$\frac{1{,}680}{1{,}560}$	–	1,187

3.5 Выводы к главе 3

1. На основе ретроспективного анализа натурных данных за 2017–2025 гг. автором диссертационного исследования впервые получена комплексная картина эксплуатационного состояния первой в России высокой грунтовой плотины с ПФЭ в виде ГЦБД из БСС.

2. Анализ натурных наблюдений позволил автору установить характер перераспределения деформаций в ГЦБД из БСС на стадиях постановки сооружения под напор и при эксплуатации, что не может быть получено исключительно расчетными методами при проектировании сооружения. ГЦБД из БСС обеспечивает устойчивый фильтрационный режим и эффективное гашение напора даже в потенциально опасных участках – в зонах межсвайных швов.

3. Выявлены особенности формирования НДС ПФЭ. В отличие от монолитной стены в грунте, в каждой свае ГЦБД из БСС возникает уникальное НДС, свидетельствующее о пространственной неоднородности и сложном взаимодействии диафрагмы с деформируемым грунтовым массивом. Критически важным является подтвержденное отсутствие растягивающих напряжений в диафрагме на всех контролируемых сечениях.

4. Анализ натурных наблюдений установил, что принятое размещение и состав КИА обеспечивает общий контроль фильтрационного состояния плотины, но не позволяет в полной мере оценить НДС ГЦБД и выявить зоны потенциально опасных деформационных процессов на ранней стадии.

5. Установлено, что общая система КИА обеспечивает репрезентативный контроль, однако технология монтажа аппаратуры в ПФЭ на начальном этапе была несовершенной, что привело к частичной потере данных (створ №5). Это обосновывает необходимость расширения системы мониторинга и разработки специальных технических решений, представленных в главе 5.

6. Необходимость приоритетного контроля деформационных процессов в ГЦБД, сооружаемой по технологии БСС, подтверждена итогами анализа

натурных наблюдений. Данный элемент является определяющим для оценки технического состояния грунтовых плотин с аналогичным противофильтрационным элементом.

7. Сопоставление результатов исследований на основе конечно-элементного моделирования и данных мониторинга в условиях эксплуатации показало их удовлетворительную сходимость. Фактические значения вертикальных напряжений в ГЦБД из БСС оказались ниже расчетных на 32–43%, а значения градиентов напора ниже на 14%, что свидетельствует о консервативности расчетных оценок и позволяет обосновать надежность работы плотины в условиях эксплуатации.

8. Совершенствование нормативно-методической документации, посвященной оснащению КИА для контроля противофильтрационного элемента – одна из приоритетных задач при проектировании грунтовых с диафрагмой из БСС [50]. Система мониторинга нуждается в разработке регламента способов монтажа и номенклатуры КИА [52].

Глава 4 Методические подходы к организации мониторинга грунтовых плотин с ПФЭ в виде ГЦБД из БСС

Разработка методических подходов к оснащению КИА и организации мониторинга грунтовых плотин с ГЦБД из БСС выполнена на основе анализа нормативных пробелов (Глава 1), результатов расчетных исследований (Глава 2) и анализа натурных данных (Глава 3), выявивших определяющую роль деформационных процессов в работе исследуемого ПФЭ.

В число основных задач мониторинга грунтовой плотины с ГЦБД из БСС входят [52]:

− получение необходимой и в достаточном объеме информации о напряжениях и деформациях, возникающих в диафрагме и переходном слое, об осадке и горизонтальных смещениях диафрагмы и тела плотины, о температурном состоянии диафрагмы и переходных зон;

− выявление неблагоприятных тенденций изменения НДС диафрагмы, отклонений от проектного режима;

− контроль фильтрационного режима, определение гашения напора на ПФЭ;

− оперативная оценка (мониторинг) технического состояния диафрагмы по данным натурных наблюдений;

− уточнение на основе фактических статистических данных наблюдений за НДС ГЦБД, проектных и критериальных показателей надежности;

− обеспечение данными наблюдений обоснования выбора проектных решений по повышению надежности ГЦБД (в случаях обнаружения неблагоприятных тенденций).

Разработанные автором методические подходы к организации мониторинга направлены на создание обоснованной и технически достаточной системы мониторинга, способной решать указанные задачи, специфичные для плотин с ГЦБД из БСС.

4.1 Практические рекомендации по формированию рационального принципа оснащения КИА и системы мониторинга за состоянием грунтовых плотин с ГЦБД из БСС

Мониторинг технического состояния плотин с ГЦБД из БСС осуществляется на комплексном подходе визуальных, инструментальных и расчетно-аналитических методов контроля.

1. Назначение измерительных створов

1.1. При выборе диагностических створов для контроля НДС в ГЦБД из БСС следует учитывать расположение пьезометрической и геодезической КИА таким образом, чтобы КИА каждого типа располагалась в каждом диагностическом створе с целью всесторонней и полной оценки состояния ГЦБД из БСС в процессе эксплуатации сооружения.

1.2. Система мониторинга должна включать не менее трех основных измерительных створов, расположенных в вертикальных плоскостях, перпендикулярных оси плотины:

− Створ №1: В зоне максимальной высоты плотины и напора (как правило, русловая часть). Является основным для оценки работы ПФЭ при проектной нагрузке.

− Створы №2 и №3: В зонах береговых примыканий или при сопряжении с другими сооружениями. Контроль взаимодействия диафрагмы с деформируемым контактом или сопрягающим сооружением.

− Створы №4 и т.д.: Промежуточные створы устанавливаются в зонах с прогнозируемыми по результатам расчетов максимальными деформациями, в зонах с неоднородным геологическим строением основания.

Учет расчетных исследований при назначении измерительных створов

1.3. В упорных призмах, где расчеты определяют потенциальные поверхности обрушения с минимальным коэффициентом запаса, следует предусматривать размещение дополнительной фильтрационной КИА (опускных шахтных пьезометров или датчиков порового давления).

1.4. Приоритетной установка КИА (датчиков давления и линейных деформаций в ГЦБД, пьезометрической КИА в грунте призм) является в сечениях, где проектные расчеты фиксируют максимальные сжимающие напряжения в диафрагме или повышенные градиенты напора в грунте.

1.5. При наличии в ГЦБД растягивающих вертикальных напряжений или сжимающих, но близких к нулевому сжатию, следует кроме датчиков давления устанавливать вертикально ориентированные датчики линейных деформаций.

2. Размещение КИА в ГЦБД из БСС

2.1. Расположение КИА по высоте ГЦБД, а также количество отметок с установленной КИА определяется на основании результатов расчетных исследований распределения напряжений по высоте диафрагмы из БСС и должно обеспечивать контроль НДС по всей высоте ПФЭ.

2.2. В ГЦБД датчики устанавливаются на характерных горизонтах (отметках), но не менее 3. Для высоких плотин (высотой более 30 м) обязательными являются:

− горизонт 1 (нижний): вблизи подошвы плотины или в зоне заглубления ГЦБД в основание, где происходит локальная разгрузка, обусловленная защемлением диафрагмы в основании;

− горизонт 2 (средний): в зоне максимальных сжимающих напряжений и изгибных деформаций диафрагмы;

− горизонт 3 (верхний): в пригребневой части плотины.

Дополнительные горизонты распределяются по высоте в центральной части ГЦБД в зависимости от поля распределения напряжений и смещений в диафрагме по результатам расчетного моделирования.

2.3. Каждый горизонт с установленной в ГЦБД КИА представляет собой пару «датчик давления – датчик линейной деформации», смонтированную в единую конструкцию с помощью тросов [82].

2.4. Для контроля горизонтальных смещений и наклона ГЦБД из БСС скважины оснащаются вертикальными инклинометрами в соответствии с техническим предложением автора (Глава 5). Для получения картины о

пространственном поведении диафрагмы инклинометрические скважины распределяются по всей длине диафрагмы, в первую очередь:

- в зоне максимального напора (измерительный створ №1);
- в береговых примыканиях (измерительный створ №2 и №3);
- в зоне неоднородного геологического строения основания (измерительный створ №4).

2.5. Для контроля раскрытия межсвайных швов гребень ГЦБД оснащается датчиками линейных перемещений в соответствии с разработанным автором техническим решением [83]. При отсутствии возможности размещения датчиков по всей длине диафрагмы, в первую очередь предусматривается размещение КИА на участках с преобладанием изгибных или растягивающих деформаций.

2.5.1. При устройстве диафрагмы, возведенной в несколько ярусов, следует предусматривать контроль раскрытия межсвайных швов с помощью датчиков линейных перемещений, расположенных со стороны нижнего бьефа на каждом возводимом ярусе.

2.6. В береговых примыканиях ГЦБД или в примыканиях к бетонным сооружениям устанавливаются датчики линейных перемещений в количестве 2 шт. на 3–4 отметках для контроля раскрытия контактных швов.

2.7. При монтаже дистанционной КИА в скважины ГЦБД, предусматриваются мероприятия, обеспечивающие сохранность КИА в процессе укладки ГЦБ смеси [82].

3. Размещение КИА в грунте упорных призм

КИА для контроля фильтрационного режима

3.1. Пьезометрическая сеть состоит из глубинных пьезометров для контроля цементационной завесы и пьезометров в теле плотины для определения положения кривой депрессии. Пьезометры устанавливаются со стороны верхнего и нижнего бьефа относительно ГЦБД.

3.2. Пьезометры в основании должны контролировать не менее двух горизонтов: непосредственно под подошвой плотины и на глубине заложения противофильтрационного устройства (цементационной завесы).

3.3. Для контроля целостности и определения протечек через ГЦБД на этапе строительства предусматривается прокладка волоконно-оптического датчика температуры, определяющего место повреждения и величину протечек в соответствии с [79, 84].

3.4. Со стороны нижнего бьефа грунтовой плотины устраивается трубчатый дренаж для сбора воды, фильтрующейся через плотину [81].

КИА для контроля температурного режима

3.5. Температурный режим контролируется с помощью датчиков температуры, установленных в низовой упорной призме или скважин со стационарными или переносными термометрическими плетями (термокосами).

3.6. При эксплуатации плотины с ГЦБД из БСС в условиях сурового климата следует обеспечивать контроль за температурным режимом тела и основания для установления областей талого и мерзлого грунтов в теле плотины и в основании, а также положения границ между этими областями.

4. Периодичность натурных наблюдений

Периодичность регулярных визуальных и инструментальных наблюдений назначается индивидуально для каждого сооружения проектом и программой натурных наблюдений [19]. Ниже приведены рекомендации по периодичности, составленные на основе опыта многолетней практики эксплуатации и обследования грунтовых плотин, с учетом требований и рекомендаций [10, 47].

4.1. Визуальные наблюдения следует выполнять, руководствуясь действующей нормативно-методической документацией [50, 77, 99, 126, 130]. Визуальные наблюдения играют важную роль для всей системы мониторинга, поскольку на участках сооружения, не оснащенных КИА, только они могут дать информацию о состоянии сооружения и возникновении неблагоприятных процессов. С учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей плотин с ГЦБД в первую очередь необходимо контролировать следующие потенциально опасные зоны:

− зона сопряжения ГЦБД из БСС с основанием плотины. Здесь ввиду защемления ГЦБД в основание возможны концентрации напряжения, развитие

неравномерных деформаций и формирование сосредоточенной фильтрации. Визуальному контролю подлежат признаки осадок, трещинообразования, выходов фильтрации;

− гребень плотины в проекции расположения ГЦБД из БСС. В этой зоне возможны неравномерные осадки грунта над ГЦБД. Контролю подлежат продольные и поперечные трещины, просадки грунта;

− низовой откос плотины. В этой зоне возможны выходы фильтрационных вод, связанные с повреждением или раскрытием межсвайных швов, суффозия. Контролю подлежат интенсивность фильтрации, мутность воды, рост растительности на откосе, проявление воронок в грунте;

− примыкания к берегу и другим сооружениям. В местах сопряжения с береговыми примыканиями, устоями и другими ГТС возможны концентрации напряжений, раскрытие межсвайных швов и швов примыкания ГЦБД к другим сооружениям. Контролю подлежат трещинообразование, локальные деформации, выходы фильтрационных вод.

4.1.1. Визуальные натурные наблюдения должны проводиться с периодичностью:

− в период строительства, наполнения водохранилища, первый год эксплуатации – не реже 1 раз в неделю;

− в первые годы эксплуатации (2–3 года) – 2 раза в месяц;

− в последующие годы при нормальной работе сооружения – не реже 1 раз в месяц, уточняя Программой натурных наблюдений, учитывающей сезонность и специфику сооружения (появления наледей, зарастание откосов, влияние атмосферных осадков и т.д.).

4.2. Существенным дополнением визуальных обследований являются инструментальные наблюдения по установленной КИА, образующие вместе полноценную систему контроля состояния ГТС. Частота инструментальных наблюдений должна обеспечивать достоверность получаемых данных и быть достаточной для установления связи между внешними воздействиями на сооружение и измеряемыми параметрами. Периодичность инструментальных

наблюдений за состоянием грунтовой плотины с ГЦБД из БСС с помощью дистанционной КИА следует назначать исходя из следующих соображений:

4.2.1. в период строительства грунтовой плотины периодичность должна составлять:

- наблюдения за НДС плотины – не реже 1 раза в неделю;
- наблюдения за фильтрационным режимом – не реже 1 раза в неделю;
- наблюдения за температурным режимом – не реже 1 раза в неделю;
- наблюдения за планово-высотным смещением плотины – не реже 1 раза в квартал при отсутствии признаков опасных процессов (просадки, оползни, трещины и др.);

4.2.2. в период наполнения водохранилища и постановки плотины под напор периодичность замеров должна быть назначена в зависимости от скорости и продолжительности изменения уровня воды в верхнем бьефе таким образом, чтобы на каждый 1 м подъема уровня приходилось не менее одного цикла измерений дистанционной (струнной) КИА.

Внеочередные циклы геодезических измерений проводить до и после наполнения водохранилища. При длительном наполнении (в течение нескольких месяцев) – 2–4 цикла в месяц.

4.2.3. в период эксплуатации грунтовой плотины периодичность измерений уточняется программой натурных наблюдений, с периодичностью не реже 1–2 раза в месяц по дистанционной КИА и до 1 раза в 2–4 месяца по геодезической КИА.

5. Номенклатура и состав КИА в диагностическом створе

Для высоких грунтовых плотин с ГЦБД из БСС установлен минимально достаточный комплекс КИА в каждом диагностическом створе, указанный в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Минимальный комплекс КИА для оснащения измерительного створа грунтовой плотины с ГЦБД из БСС

Существующее решение инструментального контроля	Разработанное и запатентованное автором техническое решение	Разработанное автором техническое решение

Контролируемый параметр	Тип КИА	Количество КИА в измерительном створе	Область мониторинга
Положение поверхности депрессии	− Пьезометры опускной шахтный; − Пьезометр дистанционный (датчик)	4 шт., из которых: 1 шт. – в основании со стороны НБ; 1 шт – в теле плотины со стороны НБ; 1 шт. – в основании со стороны ВБ; 1 шт – в теле плотины со стороны ВБ;	− Определение градиента напора на диафрагме; − Построение поверхности депрессии
Давление грунта	Датчик давления грунта	2 пары на 2–3 отметках со стороны ВБ и НБ относительно ПФЭ. Ориентация пары датчиков – по потоку и поперек потока	Определение эпюры напряжений со стороны верхнего и нижнего бьефов относительно диафрагмы
Напряжение в ГЦБД	Датчик давления (в составе «гирлянды» КИА)	3–4 шт, из которых: 1 шт. – в зоне защемления в основании остальные – распределенные по высоте ПФЭ	Контроль сжимающих/растягивающих напряжений, верификация расчетов
Линейная деформация в ГЦБД	Датчик линейных деформаций (в составе «гирлянды» КИА)	3–4 шт., установленные в паре с датчиком давления (поз.3)	− Контроль линейных деформаций; − Контроль горизонтального трещинообразования
Смещение и наклон ГЦБД	Скважинный инклинометр	1 шт. в БСС	Контроль деформаций ГЦБД по высоте ПФЭ
Раскрытие межсвайного шва	Датчик линейных деформаций	Количество определяется проектом	Контроль целостности ГЦБД
Раскрытие шва в береговом примыкании («бетон-глиноцементобетон»)	Датчик линейных деформаций	По 2 шт. на 3–4 отметках	Контроль целостности ГЦБД в примыканиях к берегу и другим ГТС
Планово-высотное положение	− глубинные марки; − поверхностные марки; − плановый знак	1–2 шт. 1–2 шт. 1 шт.	Контроль деформаций грунта упорных призм

4.2 Алгоритм планирования состава и размещения КИА при проектировании и эксплуатации

Эффективность системы мониторинга безопасности грунтовой плотины с ГЦБД из БСС на всех стадиях её жизненного цикла определяется научно обоснованным планированием состава, номенклатуры и пространственного размещения КИА. На основании результатов расчётных исследований и ретроспективных данных натурных наблюдений [51, 47, 46, 71], полученных при эксплуатации Нижне-Бурейской ГЭС и изученных в ходе настоящей работы, разработан следующий алгоритм, который представляет собой последовательность шагов, реализуемых на этапах проектирования, строительства и эксплуатации (Рисунок 4.1).

Этап 1. Формулировка целевых задач мониторинга (проектная стадия)

На первом этапе на основе анализа конструктивных особенностей плотины и условий её эксплуатации формулируются конкретные цели мониторинга. Для плотин с ГЦБД из БСС целевые задачи в некоторой степени отличаются от задач для плотин с грунтовыми ядрами и должны включать:

− Контроль фильтрационного режима: Оценка гашения напора, выявление и локализация участков возможной сосредоточенной фильтрации через тело диафрагмы и межсвайные швы.

− Контроль температурного режима: Оценка зон распределения температуры в теле плотины, определение связи между температурным и фильтрационным режимами.

− Контроль НДС диафрагмы: Контроль возникновения сжимающих и, что критически важно, растягивающих напряжений в материале ГЦБ, оценка изгибных деформаций по высоте диафрагмы.

− Контроль взаимодействия «диафрагма – грунтовый массив упорных призм»: Определение эпюры напряжения в грунте со стороны верхнего и нижнего

бьефов относительно диафрагмы, оценка передачи нагрузки с верховой призмы на низовую.

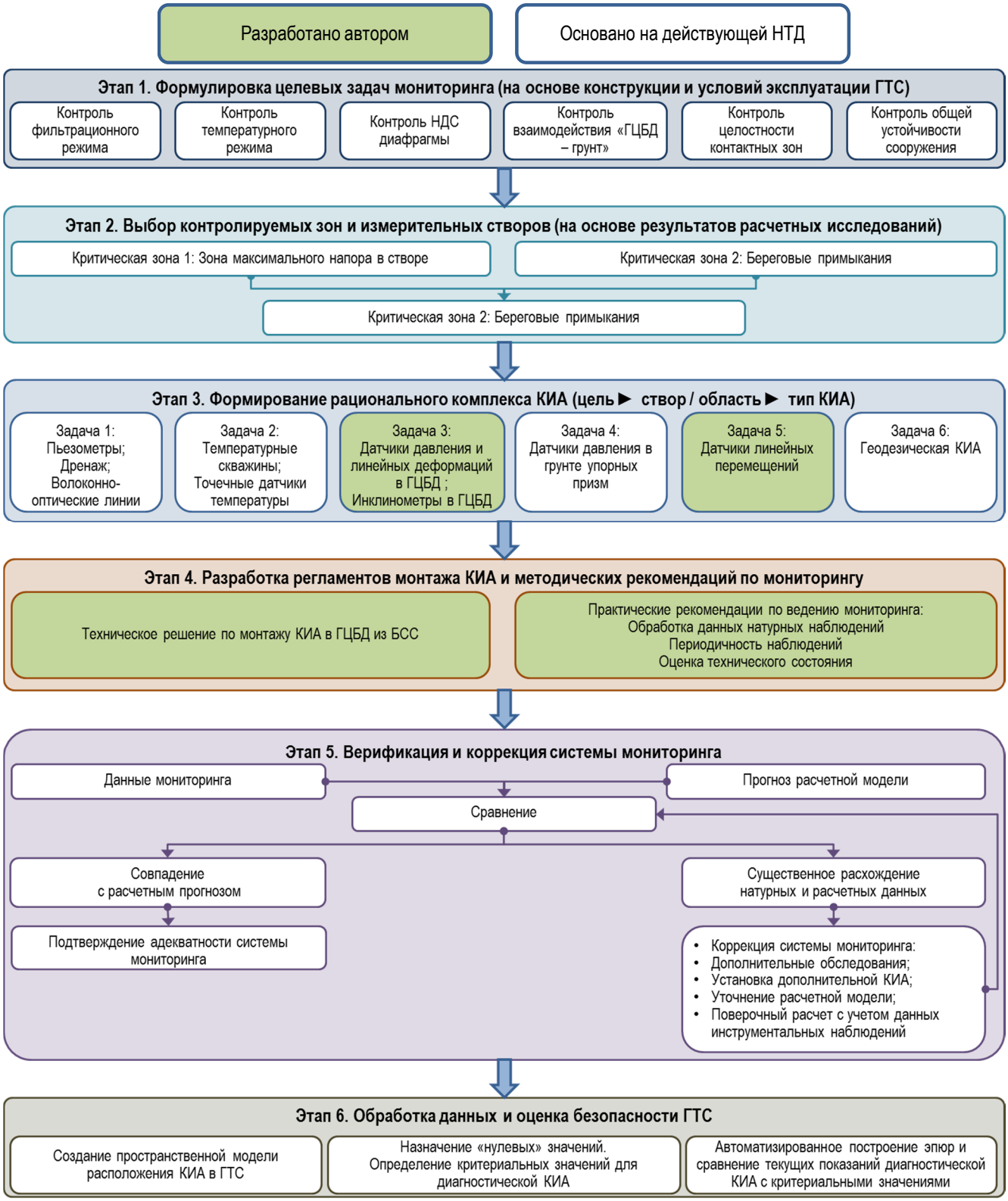


Рисунок 4.1 – Алгоритм планирования состава и размещения КИА на грунтовой плотине с ГЦБД из БСС

− Контроль целостности контактных зон: Контроль раскрытия межсвайных швов ГЦБД из БСС, швов в местах примыкания диафрагмы к бетонным устоям, сопрягающим сооружениям.

− Контроль общей устойчивости сооружения: Наблюдение за планово-высотными деформациями гребня, откосов и основания.

Этап 2. Выбор диагностических створов и горизонтов контроля (проектная стадия)

При размещении КИА в теле грунтовой плотины и ПФЭ на основе результатов детальных расчётных исследований (фильтрационных, НДС, устойчивости) выделяются критические зоны, требующие приоритетного оснащения:

− По длине плотины: зона максимального напора (как правило, в центре русла); участки сопряжения с берегами и бетонными сооружениями; зоны с неоднородностями в геологическом строении основания.

− По высоте плотины и диафрагмы: Область защемления диафрагмы в основание (зона концентрации напряжений); пригребневая часть (зона влияния температурных и атмосферных воздействий); середина высоты (зона максимального напора и возможных изгибных деформаций).

В каждой критической зоне назначается диагностический створ – вертикальная плоскость, в которой концентрируется комплекс КИА разного типа. Количество створов должно быть не менее трёх: два в береговых примыканиях и один в русловой части, общее количество створов принимается с учетом длины плотины, но не менее 1 створа на 50-100 м. В пределах каждого створа назначаются горизонты контроля, привязанные к проектным отметкам.

Этап 3. Формирование рационального комплекса КИА (проектная и строительная стадии)

Для каждой целевой задачи (этап 1) в каждом диагностическом створе и на каждом горизонте (этап 2) подбирается конкретный тип КИА, формируя интегрированный измерительный комплекс:

− Для задачи № 1 (фильтрационный режим): Пьезометры (опускные шахтные и дистанционные струнные/электрические) в низовой и верховой упорных призмах; дренажные расходомеры в низовой призме [81]; волоконно-оптические линии вдоль диафрагмы [79].

− Для задачи № 2 (температурный режим): Температурные скважины с термоплетью; дистанционные датчики температуры в низовой упорной призме.

− Для задачи № 3: дистанционные датчики давления и инклинометры скважинные, монтируемые в скважины БСС (раздел 5.2, Глава 5).

− Для задачи № 4: Датчики давления грунта, установленные в упорных призмах с верховой и низовой сторон относительно диафрагмы.

− Для задачи № 5: датчики линейных перемещений, установленные на межсвайных швах (раздел 5.2.2, Глава 5) и в местах примыкания диафрагмы к бетонным устоям или сопрягающим сооружениям.

− Для задачи № 6: Геодезическая КИА (марки поверхностные и глубинные, плановые знаки), устанавливаемая в грунтовой плотине после ее возведения для контроля планово-высотных смещений.

Этап 4. Разработка регламентов монтажа и рекомендаций по мониторингу

Для каждого типа КИА, особенно для устанавливаемой в БСС, разрабатывается детальный технологический регламент, включающий:

− Способ монтажа: Порядок сборки «гирлянд» датчиков, использование защитных труб и утяжелителей (раздел 5.2.1, Глава 5), последовательность операций при бетонировании скважины.

− График и методику первичных измерений: Определение «нулевых» показаний после завершения монтажа и набора прочности ГЦБ, перед наполнением водохранилища, в процессе постановки сооружения под напор и в период постоянной эксплуатации.

− Программу мониторинга: Периодичность измерений для разных типов КИА в строительный период, период наполнения и постоянной эксплуатации. Частота опроса датчиков в ПФЭ в период наполнения должна быть привязана к скорости подъёма УВБ.

Этап 5. Верификация и коррекция системы мониторинга

Алгоритм носит итеративный характер. После начала эксплуатации осуществляется:

− Верификация. Сравнение натурных данных (осадок, пьезометрических уровней, напряжений) с прогнозом расчётных моделей. Это позволяет оценить адекватность как модели, так и выбранных точек измерений.

− Коррекция. При выявлении существенных расхождений или новых, непрогнозировавшихся явлений (например, аномалий НДС в отдельных створах) программа мониторинга может быть скорректирована. Это может включать установку дополнительной КИА (например, инклинометров) в зоны, выявленные как проблемные, или изменение периодичности измерений.

Этап 6. Обработка данных и оценка безопасности

На всех стадиях реализуется система опроса, обработки и анализа данных натурных наблюдений за состоянием грунтовой плотины. Для высоких грунтовых плотин используется ИДС (раздел 1.4, Глава 1), в которой закладывается следующая информация:

− Пространственная модель расположения всей КИА;

− Назначение «нулевых» и критериальных значений для КИА;

− Алгоритмы автоматического построения эпюр, депрессионной поверхности и сравнения текущих показаний с критериальными значениями;

− Оценка состояния ГТС расчетными методами. Результаты выполнения поверочных расчетов прочности и устойчивости сооружения с учетом данных инструментальных наблюдений в период эксплуатации в соответствии с требованиями нормативной документации [87].

Предложенный алгоритм представляет собой методику, переводящую планирование мониторинга плотин с ГЦБД из БСС из области эмпирических решений в плоскость системного инженерного подхода. Его преимуществами являются: целевая ориентация (от задач – к аппаратуре), учёт специфики ПФЭ в виде ГЦБД из БСС с акцентом на контроль НДС диафрагмы. Внедрение данного алгоритма в практику проектирования позволит создавать экономически

обоснованные и технически эффективные системы мониторинга, обеспечивающие надёжный контроль безопасности новых и реконструируемых грунтовых плотин с малоизученным в условиях эксплуатации ПФЭ в виде ГЦБД из БСС.

4.3 Методика обработки и интерпретации результатов мониторинга состояния грунтовой плотины и ГЦБД

Для грунтовых плотин с ГЦБД из БСС, ввиду специфики работы их ПФЭ, определенной в Главе 3, предложена методика, учитывающая предложенный в предыдущем разделе принцип размещения КИА и особенности взаимодействия ГЦБД из БСС с деформируемым грунтовым массивом. Предлагаемая методика включает последовательность этапов, представленную на рисунке 4.2.

Этап 1. Первичная обработка и верификация достоверности данных

Цель этапа – очистка массива измерений от заведомо ошибочных значений и приведение разнородных данных к сопоставимому виду.

1. Контроль достоверности данных. Проверка показаний каждого датчика на соответствие его техническому диапазону, выявление «застывших» значений, скачков, вызванных внешними помехами или неисправностью аппаратуры. Показания, не прошедшие данный фильтр, маркируются как сбойные и исключаются из дальнейшего анализа.

2. Нормирование и приведение к физическим величинам. Пересчет частот струнных датчиков, электрических сигналов и кодов в инженерные единицы (МПа, мм, °С и др.) по индивидуальным градуировочным характеристикам (паспортам приборов).

3. Учет «нулевых» значений. Для КИА, установленной в ГЦБД, критически важно определение «нулевого» значения после набора материалом проектной прочности. Фактическое значение показаний дистанционной КИА высчитывается по формуле:



Рисунок 4.2 – Методика обработки и интерпретации данных мониторинга за состоянием грунтовой плотины с ГЦБД из БСС

$$Y_n = Y_i - Y_{\text{тв}} \quad (4.2)$$

где Y_i – текущее значение величины, измеряемой при i-м цикле измерений;

$Y_{\text{тв}}$ – значение измеренной величины, определенное по истечению периода набора прочности ГЦБ.

Все последующие приращения напряжений и деформаций вычисляются относительно этого состояния, а не момента монтажа. Для геодезических марок «нулевым» является значение цикла измерений после установки КИА.

Синхронизация во времени заключается в приведении всех данных к единой временной шкале с учетом периодичности замеров разных типов КИА (например, ежедневные – для автоматических датчиков, ежеквартальные – для геодезической КИА).

Этап 2. Пространственно-временной анализ и визуализация

Цель этапа – преобразование точечных данных в целостную картину состояния сооружения.

1. Построение временных рядов. Формирование графиков изменения каждого ключевого параметра (напряжение в конкретном датчике, уровень в пьезометре, осадка марки) за весь период наблюдений. На графики наносятся основные воздействия: этапы отсыпки плотины, наполнения и сработки водохранилища (УВБ), сезонные температурные циклы.

2. Построение эпюр распределения. Для каждого диагностического створа, назначенного и оснащенного КИА в соответствии с алгоритмом раздела 4.2 и цикла измерений строятся:

− Эпюра депрессионной поверхности по данным пьезометров, что позволяет наглядно оценить эффективность работы ПФЭ и дренажа.

− Эпюры напряжений по высоте диафрагмы (на основе датчиков в ГЦБ) и в прилегающем грунте. Сравнение этих эпюр позволяет количественно оценить перераспределение нагрузки.

− Эпюра горизонтальных смещений (прогиба) диафрагмы, построенная по данным скважинных инклинометров.

− Эпюры напряжений в грунте относительно диафрагмы по данным датчиков в грунте со стороны верхнего и нижнего бьефов.

3. Визуализация в ИДС. Интеграция данных в ИДС для создания трехмерных моделей, отображающих поля деформаций и напряжений.

До внедрения на ГТС АСО КИА, а также при отсутствии необходимости внедрения АСО КИА для ГТС III и IV классов, регламентируемой [127, 129], хранение и обработку данных измерений следует выполнять с использованием стандартных текстовых и табличных процессоров или специализированного программного обеспечения.

Этап 3. Сравнительный анализ и интерпретация

Цель этапа – выявление тенденций, оценка соответствия проектным ожиданиям и диагностика потенциальных аномалий.

1. Сравнение с проектными (расчетными) значениями. Сопоставление измеренных величин (коэффициента устойчивости, градиентов напора, величин осадок) с результатами, полученными на этапе проектирования. Ключевой аспект для ГЦБД из БСС – проверка отсутствия растягивающих напряжений.

2. Сравнение с критериальными значениями (K1, K2). Оперативное сопоставление текущих измеренных параметров с установленными количественными критериями безопасности.

3. Выявление корреляционных связей. Анализ причинно-следственных связей между воздействиями и реакцией сооружения. Например:

− Корреляция между подъемом уровня воды в верхнем бьефе и ростом напряжений в диафрагме и/или горизонтальным смещением и наклоном ГЦБД из БСС в сторону нижнего бьефа.

− Корреляция между раскрытием межсвайных швов ГЦБД из БСС и локальным изменением фильтрационного режима (показания волоконно-оптической линии, рост расхода в дренаже, водопроявления на низовом откосе, рост уровней воды в пьезометрах низовой упорной призмы).

Отсутствие ожидаемой корреляции (например, рост УВБ не приводит к изменению напряжений в каком-либо датчике) может указывать на

неработоспособность датчика КИА или на особый характер работы данного участка диафрагмы вследствие разной степени обжатия грунта (п. 3.3, Глава 3).

4. Оценка динамики и стабилизации процессов. Анализ динамики деформаций (осадок, смещений) и распределения порового давления. Критически важно оценить, стабилизировались ли процессы после наполнения водохранилища или продолжают развиваться.

Этап 4. Оценка технического состояния ГТС

На основе комплексного анализа формулируется итоговое заключение о техническом состоянии сооружения и его элементах, включающее:

1. Заключение по результатам инструментальных и визуальных наблюдений

2. Прогноз развития состояния. Экстраполяция выявленных тенденций на ближайшую перспективу с использованием статистических методов или уточненных на основе натурных данных расчетных моделей.

3. Рекомендации по дальнейшей эксплуатации:

- Рекомендация об изменении периодичности наблюдений;
- Рекомендация о проведении дополнительных обследований.

Данная методика на основана на опыте эксплуатации грунтовой плотины, требований нормативной документации [19, 20, 21, 130, 131] и адаптирована для грунтовых плотин с ГЦБД из БСС с применением как существующих отдельных технических решений [79, 80, 81], так и разработанных в ходе диссертационного исследования предложений автора [82, 83].

4.4 Выводы к главе 4

1. По результатам анализа расчетных исследований и данных натурных наблюдений разработан методический подход к организации рационального мониторинга грунтовых плотин с диафрагмой из глиноцементобетонных БСС, обеспечивающий комплексную оценку фильтрационного состояния и НДС сооружения.

2. На основе комплексного анализа специфики работы плотины с ГЦБД из БСС разработан и формализован комплексный методический подход к организации мониторинга. Подход интегрирует три взаимосвязанных фактора: практические требования к рациональному составу и размещению КИА, алгоритм планирования системы мониторинга и КИА на всех стадиях жизненного цикла сооружения и методику обработки и интерпретации данных наблюдений.

3. Сформулированы научно обоснованные требования к рациональной схеме КИА, которые учитывают специфику работы диафрагмы в деформируемом грунтовом массиве. Ключевым элементом схемы является оснащение самой диафрагмы КИА для контроля НДС и горизонтальных смещений, что непосредственно вытекает из выявленных особенностей её взаимодействия с деформируемым грунтовым массивом.

4. В отличие от действующих нормативных требований, ориентированных преимущественно на контроль фильтрационного режима, предлагаемый методический подход включает контроль деформаций диафрагмы, определяющих условия работы межсвайных швов.

5. Предложена поэтапная методика интерпретации результатов мониторинга, центральным элементом которой является верификация прогнозных расчетных моделей (Глава 2) с гипотезой об отсутствии растягивающих напряжений в ГЦБД путем сопоставления с натурными данными (Глава 3). Методика обеспечивает оперативную диагностику текущего состояния сооружения и выявление негативных динамик в показаниях, формируя доказательную базу для прогноза состояния плотины.

6. Обоснован подход к сопоставлению расчетных и натурных данных в качестве инструмента уточнения расчетных моделей и повышения достоверности оценки безопасности. На примере плотины Нижне-Бурейской ГЭС показано, что данный подход позволяет выявлять особенности реального поведения конструкции (например, характер распределения напряжений по высоте диафрагмы), не укладывающиеся в расчетные представления.

7. Реализация предложенных методических подходов создает основу для разработки конкретных технических решений по оснащению КИА, рассмотренных в следующей главе, и выявления неблагоприятных деформационных процессов в ПФЭ с целью повышения уровня безопасности при эксплуатации грунтовых плотин [50].

Глава 5 Разработка технических решений по инструментальному контролю состояния грунтовых плотин с ГЦБД из БСС

С целью внедрения методического подхода к мониторингу, обоснованного в Главе 4, предложены технические решения для инструментального контроля грунтовых плотин с противофильтрационным элементом из буросекущихся свай (ГЦБД из БСС). Предлагаемые решения позволяют получать достоверные данные о деформационных процессах, влияющих на работоспособность диафрагмы.

При разработке технических решений и с целью решения поставленных в диссертации задач в данной Главе рассмотрены следующие вопросы:

1. Анализ существующих перспективных методов комплексного контроля за состоянием ГЦБД из БСС.
2. Обобщение проблем, возникающих при монтаже КИА и организации мониторинга за состоянием грунтовой плотины с ГЦБД из БСС.
3. Разработка технических решений монтажу КИА в БСС и инструментальному контролю состояния ГЦБД из БСС.

Авторское участие в решении каждого из обозначенных вопросов подтверждается личным вкладом при выполнении диссертационной работы. Соискателем осуществлен монтаж КИА в диафрагму грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС. Кроме того, автор выступает соавтором двух патентов Российской Федерации (Приложения Б, В), которые посвящены обеспечению сохранности КИА и совершенствованию системы мониторинга технического состояния плотин с аналогичным ПФЭ.

В дальнейшей перспективе с использованием полученных проработок предполагается создание СТО по мониторингу грунтовых плотин с ГЦБД из БСС [45].

5.1 Перспективные методы комплексного контроля за состоянием ГЦБД из БСС

Несмотря на то, что в нормативно-технической документации в настоящее время отсутствуют регламентированные требования по оснащению грунтовой плотины с ГЦБД из БСС КИА [50, 52], уже существуют некоторые запатентованные технические решения, посвященные мониторингу и контролю состояния фильтрационного состояния такого ПФЭ. Краткие сведения о некоторых из них приведены ниже.

1. Патент РФ № 2628447 «Способ контроля глиноцементобетонной диафрагмы в грунтовой плотине» зарегистрирован в 2019 году АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» [73, 79].

Идея способа заключается в прокладке волоконно-оптического датчика вдоль ГЦБД и устройстве водонепроницаемых полок из суглинка со стороны нижнего бьефа (рисунок 5.1).

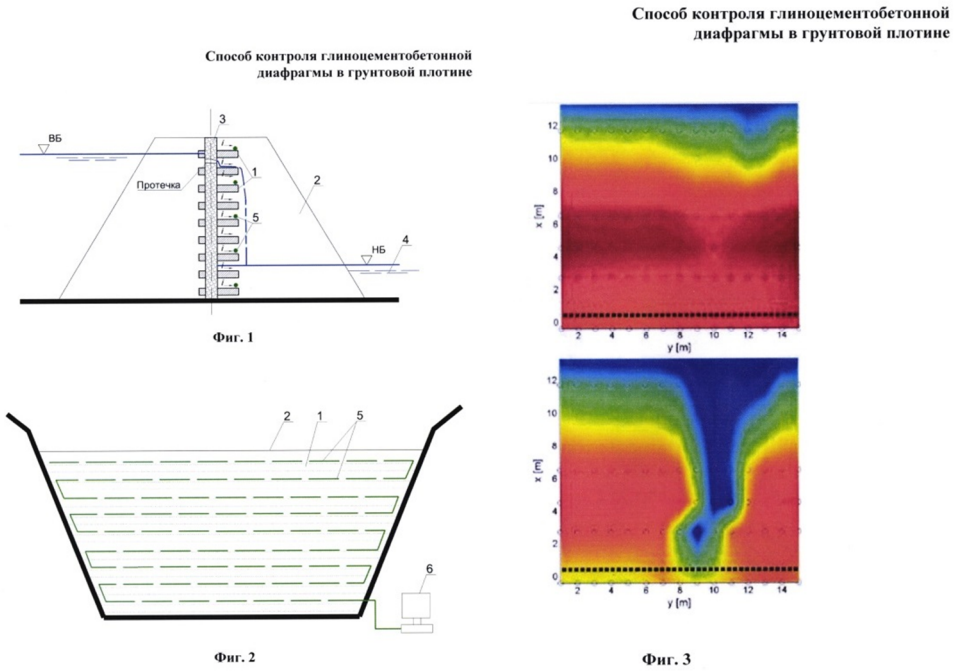


Рисунок 5.1 – Грунтовая плотина с глиноцементобетонной диафрагмой: 1 – водонепроницаемые полки из суглинка; 2 – грунтовая плотина; 3 – диафрагма с уклоном i водонепроницаемых полок, 4 – нижний бьеф; 5 – непрерывно уложенный волоконно-оптический датчик температуры, 6 – считывающий волоконно-оптический трансивер

Технический результат состоит в определении участков повреждений диафрагмы с точностью до 1,0 м.

2. Патент РФ № 2709040 «Способ контроля фильтрационного состояния грунтовой плотины с глиноцементобетонной диафрагмой» оформлен в 2019 г. АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» [81].

Способ контроля предусматривает устройство трубчатого дренажа для сбора фильтрующейся воды и сбора в общий коллектор (рисунок 5.2) [48].

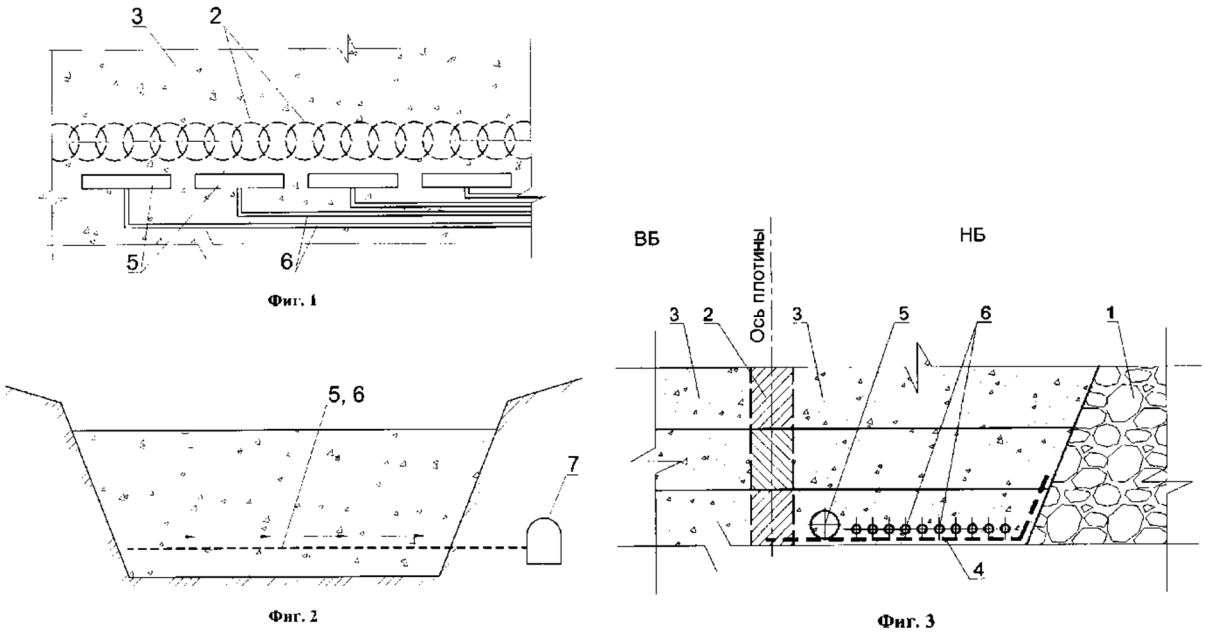


Рисунок 5.2 – Схема устройства трубчатого дренажа в теле грунтовой плотины с глиноцементобетонной диафрагмой: 1 – грунтовая плотина; 2 – глиноцементобетонная диафрагма; 3 – обратный фильтр; 4 – водонепроницаемая полка из бентонитовых матов; 5 – дренажная труба; 6 – водоотводная трубка; 7 – общая смотровая потерна

Предложенное решение позволяет оценить фильтрационное состояние грунтовой плотины с ГЦБД путем определения мест локальных возможных повреждений ГЦБД с точностью до 1–1,5 м.

3. Патент РФ № 2678535 «Способ мониторинга состояния диафрагмы из буросекущихся глиноцементобетонных свай в грунтовой плотине методом электротомографии» [48, 73, 69] оформлен в 2019 г. АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» [80].

Разработанный патент предусматривает выполнение мониторинга фильтрационного состояния ГЦБД из БСС на основе получения информации о

распределении величины удельного электрического сопротивления в точках измерений диафрагмы (рисунок 5.3).

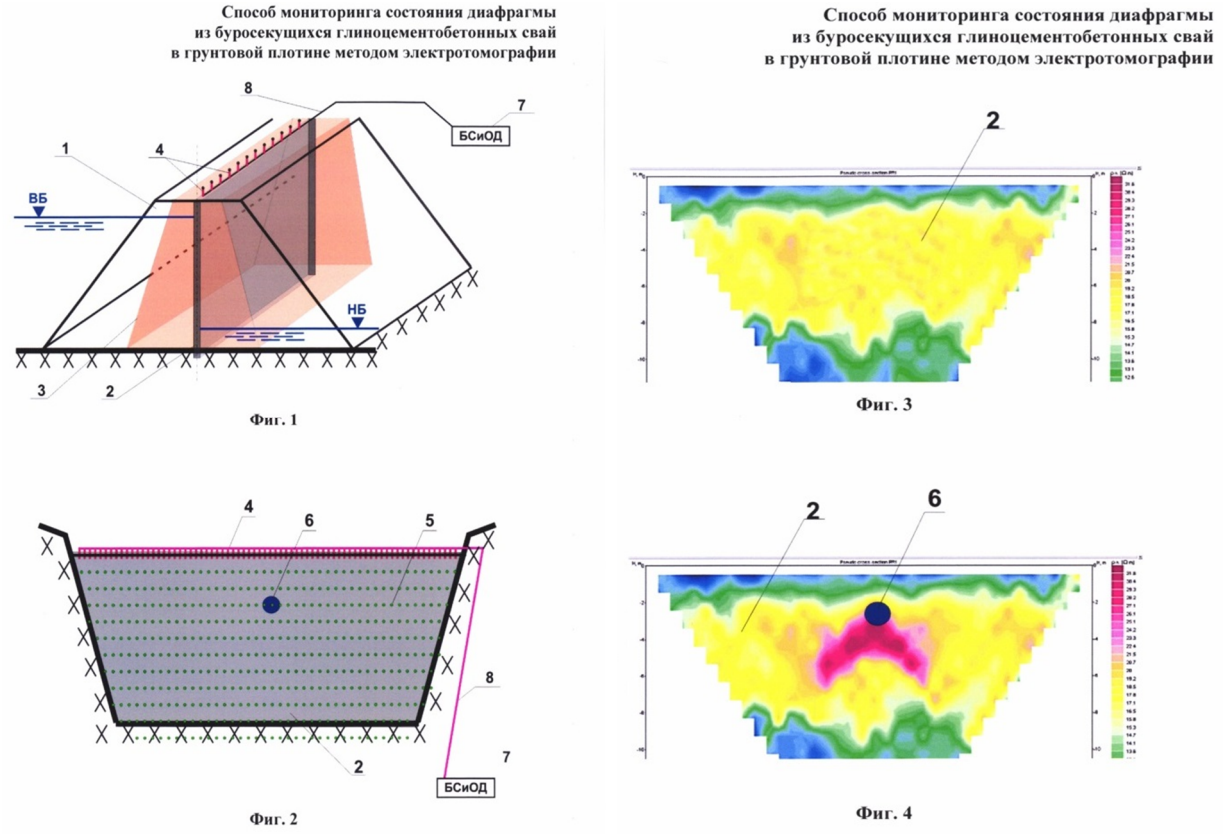


Рисунок 5.3 – Способ мониторинга состояния ГЦБД методом электротомографии: 1 – грунтовая плотина; 2 – ГЦБД из БСС; 3 – переходная зона; 4 – питающие и приемные стальные электроды; 5 – точка измерения удельного электрического сопротивления; 6 – зона нарушения диафрагмы; 7 – блок сбора и обработки данных; 8 – многожильный геофизический кабель;

Анализ существующих запатентованных решений, посвященных мониторингу состояния грунтовой плотины с ПФЭ из ГЦБ, свидетельствует о том, что все они посвящены мониторингу фильтрационного состояния плотины и позволяют определить местоположение сосредоточенной интенсивной фильтрации с точностью до 1–1,5 м [50]. При этом в совокупности с результатами исследований автора, следует вывод, что остаются нерешенными следующие задачи:

− количественная оценка деформационных процессов (раскрытие швов, смещения);

− обеспечение надежного монтажа КИА для контроля НДС.

Данный пробел восполняется разработанными автором в настоящей Главе техническими решениями.

5.2 Характеристика проблем при монтаже КИА и организации мониторинга за состоянием грунтовой плотины с ГЦБД из БСС

Основной целью проведения натурных наблюдений за ГЦБД из БСС и в частности за НДС является обеспечение надежной работы диафрагмы и плотины в целом при постановке под проектную нагрузку и дальнейшей эксплуатации.

Для решения перечисленных в п.5.1 задач предусматривается использовать, в основном, комплекс дистанционной (закладной) и геодезической КИА. Неотъемлемым условием обеспечения эффективного контроля за НДС ГЦБД следует считать своевременный и качественный монтаж КИА, а так же полноту и систематичность проводимых натурных наблюдений.

Опыт монтажа КИА в БСС в Российской Федерации ограничивается двумя объектами:

- опытный полигон Гоцатлинской ГЭС в 2012 г. [62,134];
- русловая грунтовая плотина Нижне-Бурейской ГЭС в 2019 г. [68, 48, 50, 134].

До начала работ на опытном полигоне Гоцатлинской ГЭС специалистами АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» были разработаны предложения и составлен технический регламент по установке КИА для контроля ПФЭ грунтовой плотины. В качестве средств инструментального контроля были выбраны струнные датчики давления ПНГС-10 и перемещения ПЛПС-10 (рисунок 5.4), расположенные на двух отметках. На каждом горизонте было установлено по 2 преобразователя давления и перемещения.



Рисунок 5.4 – Преобразователь напряжения грунта ПНГС-10 (слева) и преобразователь линейных перемещений ПЛПС-10 (справа)

Схема размещения КИА в скважине опытного полигона Гоцатлинской ГЭС представлена на рисунке 5.5.

Глубина контролируемой скважины составляла 20,4 м. Несмотря на успешный опыт монтажа КИА в скважину (рисунок 5.6), натурные наблюдения ограничились непродолжительным периодом времени (около 2 месяцев). Как следствие, отсутствует репрезентативный ряд данных наблюдений, способствующий изучению работы ГЦБД из БСС [50].

При разработке проекта грунтовой плотины Нижне-Бурейского гидроузла была предусмотрена установка струнной КИА не только в тело плотины, но и в ПФЭ [68, 50]. Типовая схема расположения КИА в плотине изображена на рисунке 5.7. Таким образом, плотина Нижне-Бурейской ГЭС является первым в отечественной практике гидротехнического строительства объектом, где не только реализован ПФЭ на всю высоту плотины в виде ГЦБД из БСС, но и выполнен монтаж дистанционной струнной КИА в ПФЭ для оценки состояния диафрагмы [14]. Датчики КИА были установлены на четырех отметках (горизонтах) в трех контрольных створах. В каждую скважину смонтирована конструкция, представляющая собой единую «гирлянду» из попарно установленных струнных датчиков напряжения ПНГ-4800 и линейных деформаций ПЛП-4430, соединенных между собой тросами. При опускании «гирлянды» в скважину каждая пара датчиков занимает свое проектное положение (проектную отметку) [50, 52].

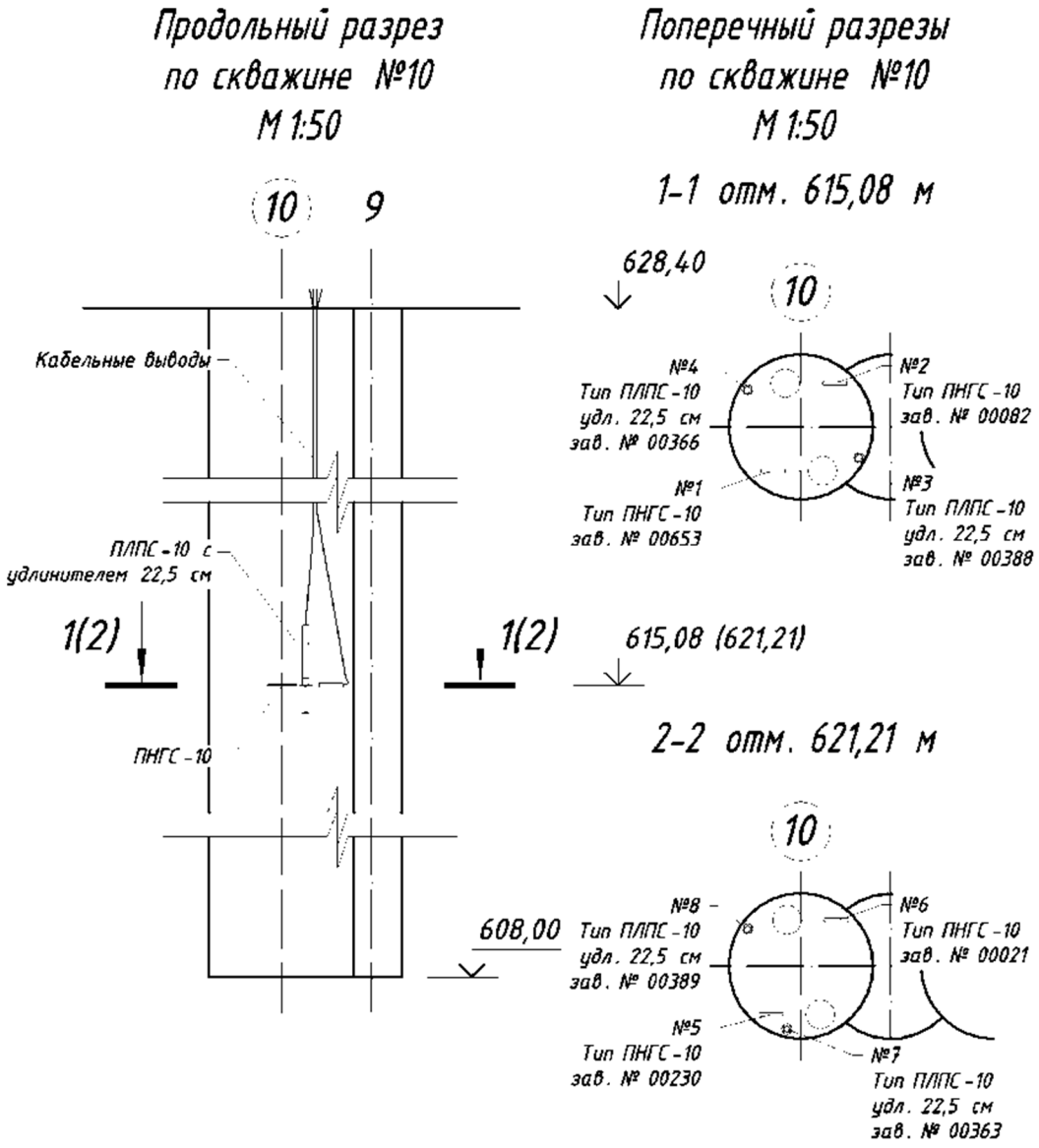


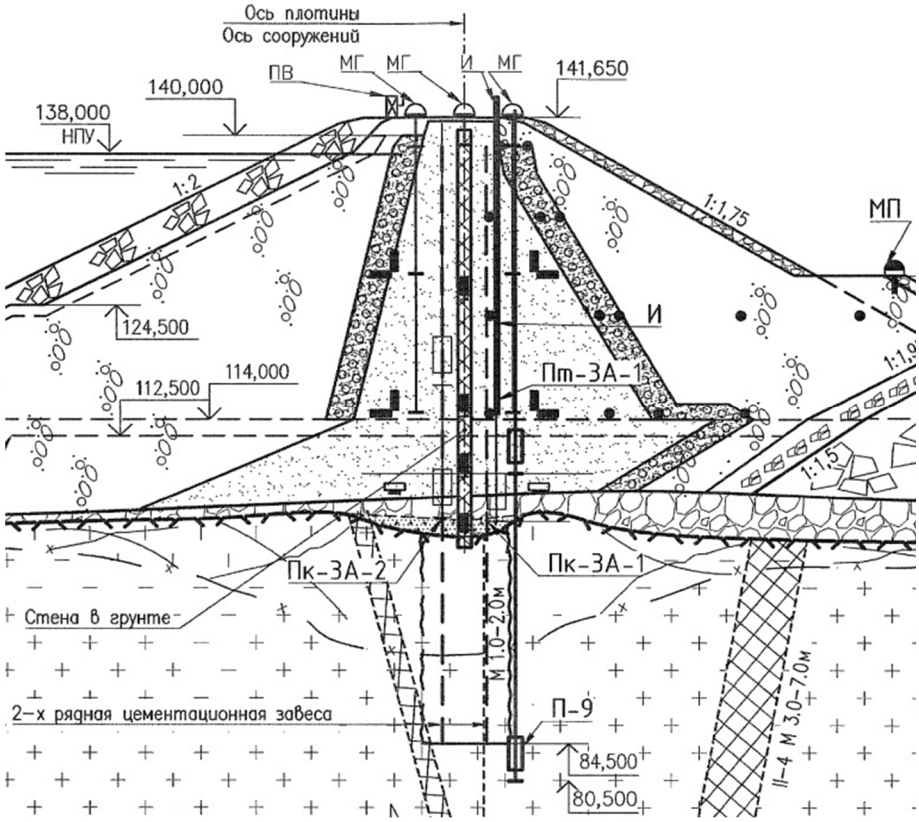
Рисунок 5.5 – Схема размещения КИА в скважине опытного полигона Гоцатлинской ГЭС



Рисунок 5.6 – Фотографии процесса монтажа датчиков КИА на опытном полигоне Гоцатлинской ГЭС

Поскольку технология монтажа данной конструкции применялась впервые, в процессе установки на первой скважине вскрылись недочеты проектных решений. Собственного веса конструкции не хватило для удержания её на заданной глубине, а при выполнении бетонных работ это привело к тому, что некоторые датчики были вытеснены на поверхность. Все последующие блоки

были укомплектованы специальными грузами, что обеспечило их успешную и корректную фиксацию в оставшихся скважинах (рисунок 5.8) [50].



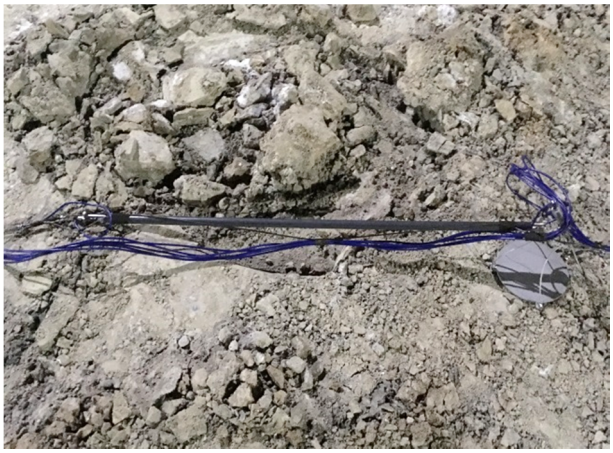
Наименование КИА	Условные обозначения	
	Буквен.	Бок. вид
Планово–высотный знак	ПВ	
Марка глубинная грунтовая	МГ	
Пьезометр	П	
Временный измерительный пульт	ВИП	
Преобразователь температуры струнный	ПТС-60	
Преобразователь давления струнный	ПДС-10	
Преобразователь напряжения грунта струнный	ПНГС–10	
Преобразователь линейных перемещений	ПЛП–4430	
Преобразователь напряжения грунта	ПНГ–4800	

Рисунок 5.7 – Схема размещения КИА для типового сечения плотины Нижне-Бурейской ГЭС

Ввиду отсутствия репрезентативных данных натурных наблюдений по КИА, расположенной в ГЦБД створа № 5 [71], мониторинг состояния ПФЭ осуществляется только по створам №3 и №4. Схема расположения створов указана на рисунке 5.9.




соединение датчиков КИА с помощью хомутов и тросов




собранная гирлянда перед монтажом в скважину




смонтированная гирлянда КИА в скважину

Рисунок 5.8 – Фотографии процесса монтажа преобразователей датчиков КИА в скважины «стены в грунте» грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС

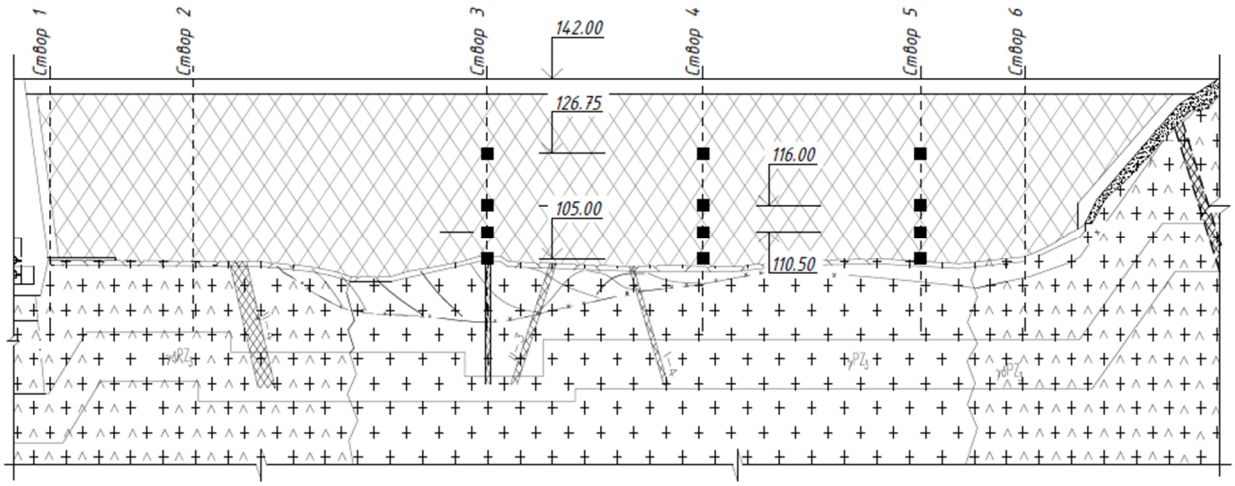


Рисунок 5.9 – Схема расположения КИА в ГЦБД грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС

При монтаже КИА в грунте плотины процент работоспособной КИА составил 98 %, а при установке в скважины этот показатель составил уже 87%.

Мониторинг состояния грунтовой плотины с ПФЭ из ГЦБД из БСС предусматривает автоматизированный опрос струнной КИА. В совокупности с остальной имеющейся в теле грунтовой плотины КИА, можно говорить о достаточном объеме средств измерения и выполняемых измерениях для контроля фильтрационного и температурного режимов грунтов тела плотины. Анализ данных мониторинга по установленной в ПФЭ КИА выявил недостаточность объема датчиков для всестороннего изучения работы ПФЭ в условиях штатной эксплуатации [52].

В результате анализа применяемого комплекса КИА и данных натурных наблюдений можно выделить основные проблемы монтажа КИА в грунтовую плотину с ГЦБД из БСС и сделать следующие выводы:

1. С целью подробного изучения работы грунтовой плотины с ГЦБД из БСС следует предусматривать [52]:

− контроль раскрытия межсвайных швов;

− контроль НДС ГЦБД в бортовых примыканиях и в центральной части грунтовых плотин;

− контроль распределения плановых смещений вдоль ГЦБД под действием гидростатической нагрузки;

− выявление мест нарушений целостности ПФЭ (мест сосредоточенной фильтрации).

Из указанного перечня в действующей нормативной документации [126,131] изложены только принципы контроля фильтрационного режима плотины с ГЦБД из БСС.

2. Современная номенклатура КИА позволяет охватывать полный спектр возможных факторов, влияющих на работу сооружения: температура, деформации исследуемого материала и окружающего массива грунта, влажность и т.д. Однако ввиду конструктивных особенностей и технологии строительства требуется особый подход при выборе КИА и ее расположения в ПФЭ в виде ГЦБД из БСС.

3. Основная сложность при монтаже КИА заключается в сохранении проектной пространственной ориентации датчиков в скважине и обеспечении условий, препятствующих выдавливанию на поверхность датчиков при бетонировании скважины.

4. Малый опыт монтажа и эксплуатации КИА в скважинах БСС, отсутствие регламентированных требований по обеспечению сохранности датчиков при производстве строительных работ становится одной из главных проблем для широкого внедрения в практику гидротехнического строительства.

5. Организация мониторинга за состоянием эксплуатируемого объекта базируется на Программе натурных наблюдений, разрабатываемой с учетом конструктивных особенностей ГТС, действующих норм и правил. Относительно грунтовых плотин с ПФЭ в виде ГЦБД из БСС неучтенными нормативной документацией задачами мониторинга за состоянием ГЦБД являются:

− выявление неблагоприятных тенденций изменения НДС диафрагмы из БСС, отклонений от проектного режима;

− уточнение на основе фактических статистических данных наблюдений за НДС ГЦБД, проектных и критериальных показателей надежности;

− получение необходимой для дальнейшего проектирования плотин с ПФЭ данного типа информации о напряжениях, деформациях, смещениях, возникающих в ГЦБД, а также о ее температурном состоянии [52].

Таким образом, выявленные пробелы в нормативной документации влекут за собой несовершенство технологии монтажа КИА в БСС и отсутствие контроля за деформациями ГЦБД из БСС и, как следствие, недостаточность изучения работы рассматриваемого вида ПФЭ в условиях эксплуатации ГТС.

5.3 Разработка технических решений по монтажу КИА в БСС и инструментальному контролю состояния ГЦБД из БСС.

5.3.1 Разработка усовершенствованного способа монтажа дистанционной КИА в ГЦБД из БСС

В основе совершенствования способа монтажа КИА в скважины ГЦБД из БСС лежит принцип изоляции КИА от поступающей ГЦБ смеси во время бетонирования скважины [50, 82]. Как следует из практики, монтаж КИА сопряжен с двумя основными трудностями: сохранение проектного пространственного положения датчиков и предотвращение их выдавливания на поверхность при бетонировании скважины [50, 52, 71, 82].

Разработанный автором способ монтажа КИА заключается в осуществлении следующей последовательности действий:

1. Сборка конструкции. Проектная комплектация КИА собирается в единую гибкую конструкцию «гирлянду» с помощью тросов. Интервалы между измерительными преобразователями по длине троса рассчитываются таким образом, чтобы в натянутом вертикальном положении конструкции каждый датчик занимал строго заданную проектную отметку. Для обеспечения устойчивости конструкции к архимедовой силе и предотвращения всплытия в нижней части гирлянды закрепляется якорный груз.

2. Подготовка скважины. В устье пробуренной скважины на дно вертикально опускается защитная труба, диаметр которой обеспечивает свободное перемещение в ней устанавливаемой КИА.

3. Установка КИА. Собранная гирлянда датчиков опускается внутрь подготовленной обсадной трубы, занимая в ней проектное положение.

4. Процесс бетонирования скважины. После размещения КИА осуществляется подача ГЦБ раствора в скважину. По мере бетонирования выполняется синхронный подъем как обсадной колонны, так и защитной трубы. Полость, освобождаемая при подъеме труб, немедленно заполняется поступающим снизу раствором. Наличие защитной трубы в этом процессе является ключевым для сохранения проектной пространственной ориентации датчиков, предохраняя их от смещения под действием поступающей ГЦБ смеси.

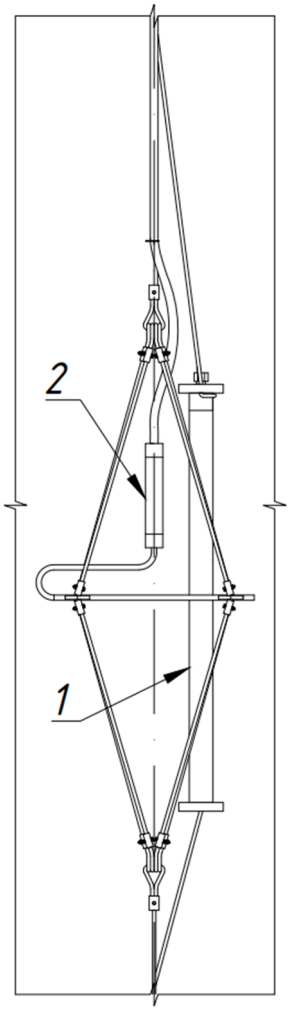
Типовая схема соединения датчиков в единую конструкцию («гирлянду») с помощью тросов представлена на рисунке 5.10.

В нижней части защитной трубы допускается выполнять перфорацию отверстиями для равномерного заполнения ГЦБ смеси при бетонировании скважины.

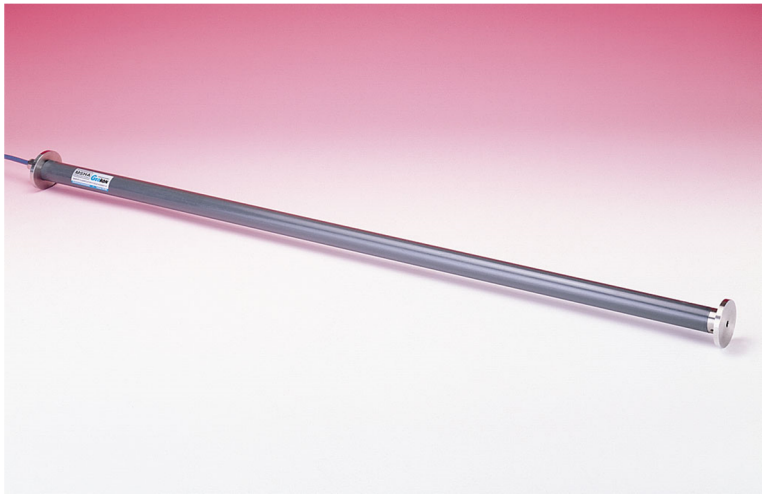
Описанный способ изложен в патенте на изобретение № 2822674 [82] и характеризуется следующим:

1. Обеспечивается возможность контроля НДС ПФЭ, запроектированного в виде ГЦБД из БСС;

2. Обеспечивается сохранность и проектное положение КИА при бетонировании скважины.



1–



2–

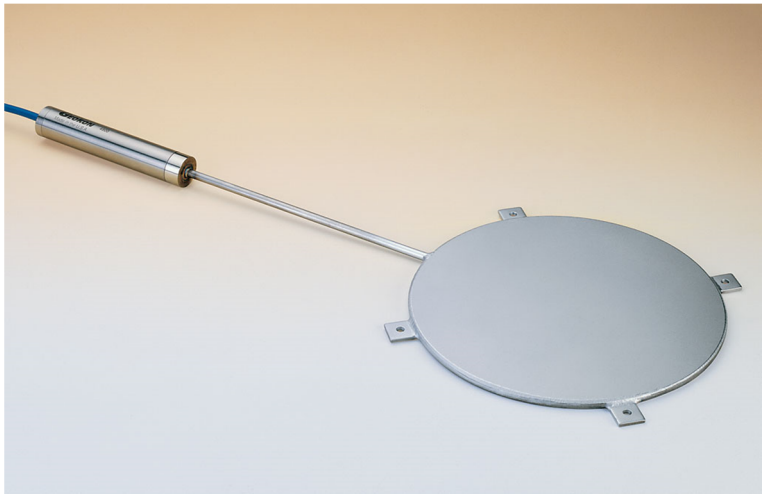


Рисунок 5.10 – Типовая схема соединения датчиков напряжения грунта и линейных деформаций в единую конструкцию: 1 – преобразователь линейных деформаций; 2 – преобразователь напряжения грунта

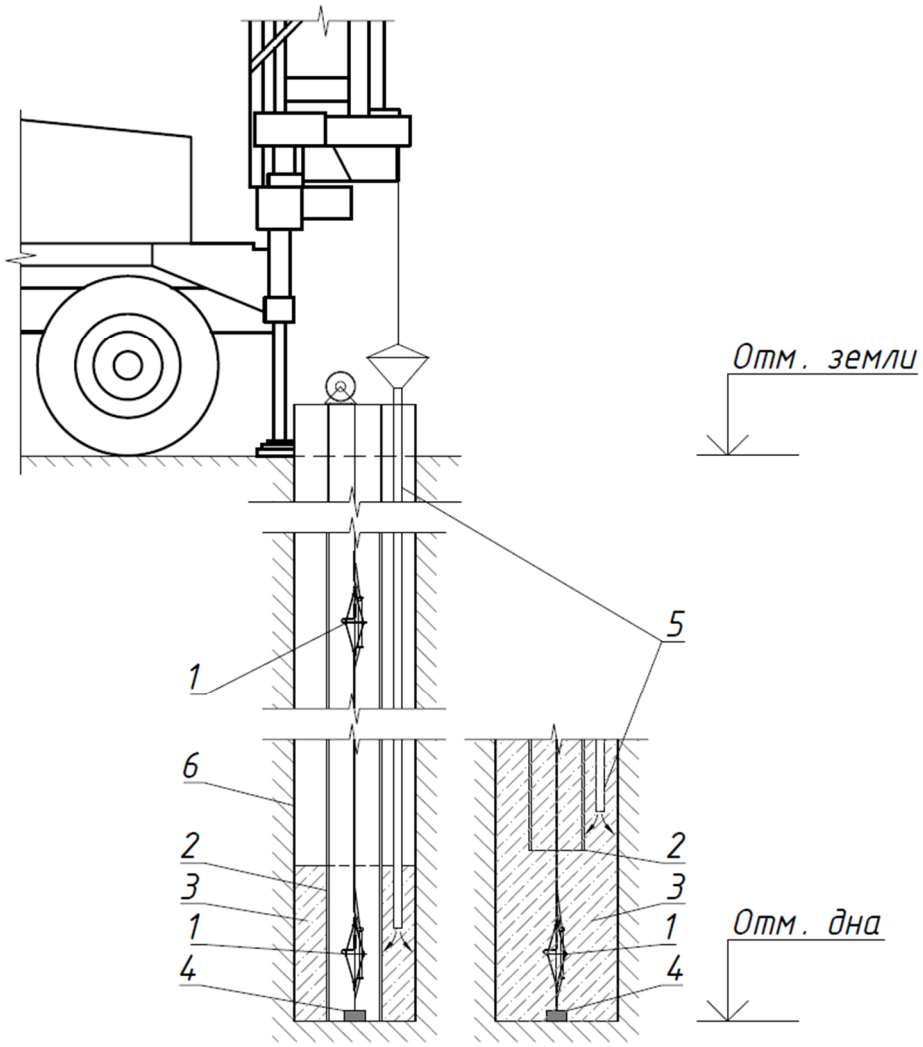


Рисунок 5.11 – Усовершенствованная схема монтажа КИА в БСС: 1 – дистанционная КИА, смонтированная в единую конструкцию; 2 – защитная труба, 3 – ГЦБ смесь, 4 – груз-утяжелитель; 5 – бетонолитная труба, 6 – обсадная труба.

5.3.2 Способ контроля деформаций в грунтовой плотине межсвайных швов ГЦБД из БСС

В рамках совершенствования методов контроля за ГЦБД из БСС предложен и запатентован метод дистанционного мониторинга целостности межсвайных швов ГЦБД из БСС [83]. Техническая сущность изобретения заключается в интеграции КИА непосредственно в области швов на этапе ее устройства для последующего контроля деформационных процессов.

Предлагаемое техническое решение предусматривает размещение датчиков линейных деформаций (рисунок 5.12), измерение их показаний и количественную оценку раскрытия межсвайных швов в процессе эксплуатации сооружения.

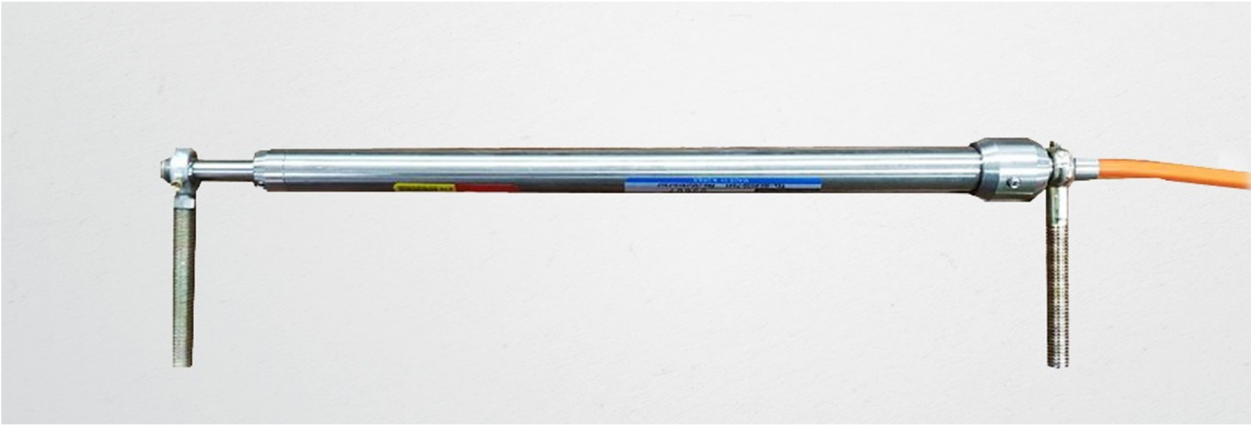


Рисунок 5.12 – Типовой струнный преобразователь линейных деформаций

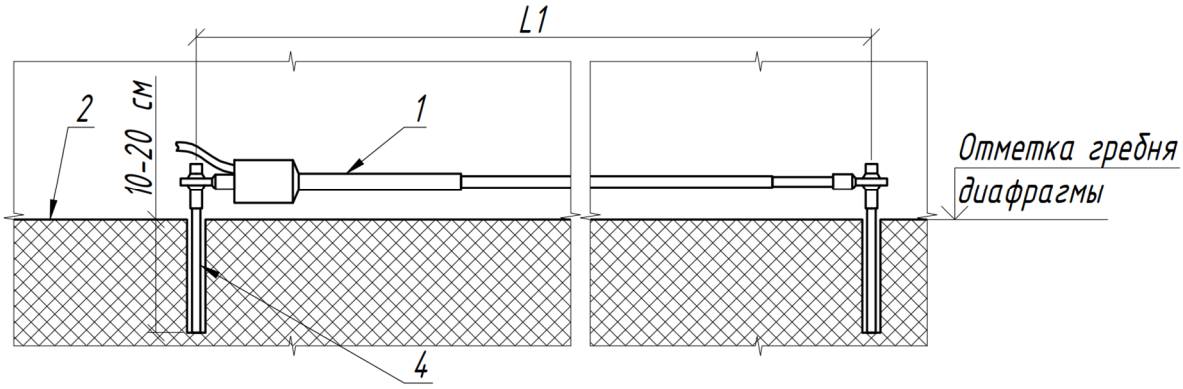
Схема расположения датчика в БСС представлена на рисунке 5.13.

Контроль состояния ГЦБД из БСС осуществляют на основе полученной информации о распределении линейных деформаций вдоль диафрагмы в точках измерений, совпадающих с расположением межсвайных швов.

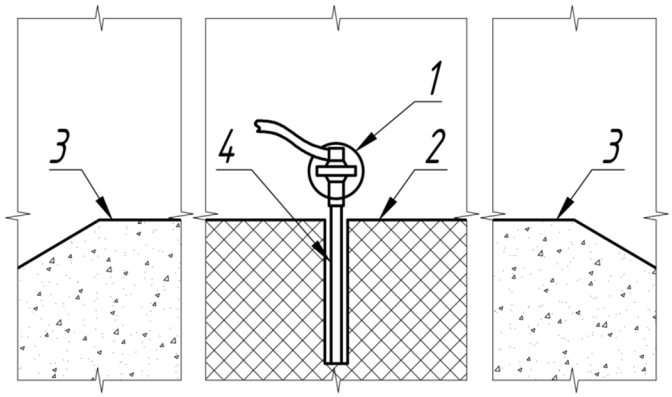
Разработанный способ контроля деформаций осуществляется в следующей технологической последовательности.

1. Подготовка и параметризация измерительных преобразователей. На стадии заводского изготовления датчиков линейных деформаций производится расчёт и подбор их конструктивной длины (L1). Основным критерием является обеспечение условия $L1 \geq 2L2$, где L2 – проектный размер секущей части (рисунок 5.13). Данное соотношение гарантирует, что анкерные элементы датчика будут расположены вне зоны активного влияния межсвайного шва, что является необходимым условием для корректного контроля его раскрытия.

а)



б)



в)

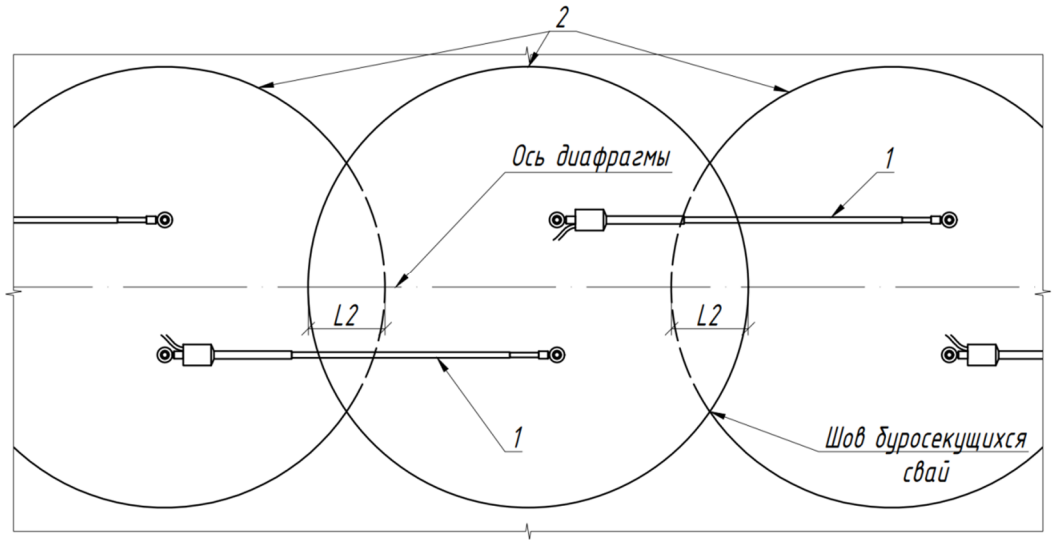


Рисунок 5.13 – Схема расположения КИА для контроля деформаций межсвайных швов ГЦБД из БСС в грунтовой плотине: а) продольный разрез плотины с датчиком линейных деформаций; б) поперечный разрез плотины с датчиком линейных деформаций; в) расположение датчиков линейных деформаций вдоль оси ГЦБД в плане.

1 – датчик линейных деформаций; 2 – ГЦБД из БСС, 3 – грунтовая плотина, 4 – анкеры датчиков линейных деформаций 1, L1 – длина датчика линейных деформаций 1, L2 –секущая часть БСС.

2. Измерения и обработка данных. Для получения информации о распределении деформаций вдоль ГЦБД грунтовой плотины выполняют последовательный цикл измерений каждого датчика линейных деформаций, по заранее разработанной изготовителем датчика градуировочной характеристике выполняют пересчет полученных от датчиков сигналов в физическую величину. Истинное значение раскрытия шва определяется по формуле:

$$X=X_i-X_0, \qquad (5.1)$$

где X_i – текущее значение линейной деформации, определяемое при i-м цикле измерений;

X_0 – значение линейной деформации, принятое за исходное («нулевое») и определенное сразу после установки датчика на межсвайный шов.

3. Анализ и интерпретация результатов. На основании обработанных данных выявляются зоны с максимальными значениями деформаций. Путём сопоставления этих величин с планом размещения измерительных преобразователей определяется локализация участков диафрагмы, подверженных наибольшему раскрытию контактных швов. Точность количественной оценки раскрытия межсвайных швов зависит от характеристик датчика линейных деформаций и, как правило, находится в пределах ±2% от диапазона измерений датчика.

Использование разработанного автором способа контроля состояния ГЦБД из БСС позволяет значительно улучшить контроль ее целостности в наиболее деформационно-нагруженных участках (межсвайных швах) и распространить систему наблюдений на всю длину ПФЭ. Расположение датчиков вдоль всей диафрагмы грунтовой плотины позволяет определять с точностью до 1 м места наибольших деформаций межсвайных швов. При устройстве ГЦБД из БСС в несколько ярусов возможно выполнять установку датчиков линейных деформаций на каждом промежуточном ярусе, тем самым обеспечивая контроль раскрытия межсвайных швов не только в пригребневой части диафрагмы, но и по всей ее высоте [50].

5.3.3 Способ контроля горизонтальных смещений и наклонов в грунтовой плотине ГЦБД из БСС

Одним из распространенных методов в геотехническом мониторинге для определения величины, глубины залегания и направления горизонтальных перемещений грунтовых массивов является использование скважинных инклинометров.

Диафрагма из ГЦБ, взаимодействуя с деформируемым грунтовым массивом, воспринимает изгибающие нагрузки, а экспериментальное определение фактической изогнутой оси диафрагмы становится актуальной задачей мониторинга. Знание реальной формы изгибной линии является критически важным для верификации расчетных моделей и оценки реального НДС сооружения. Предлагаемый способ контроля горизонтальных смещений заключается в устройстве инклинометрических скважин с последующей установкой скважинных инклинометров непосредственно в тело ГЦБД из БСС после её возведения (рисунок 5.14).

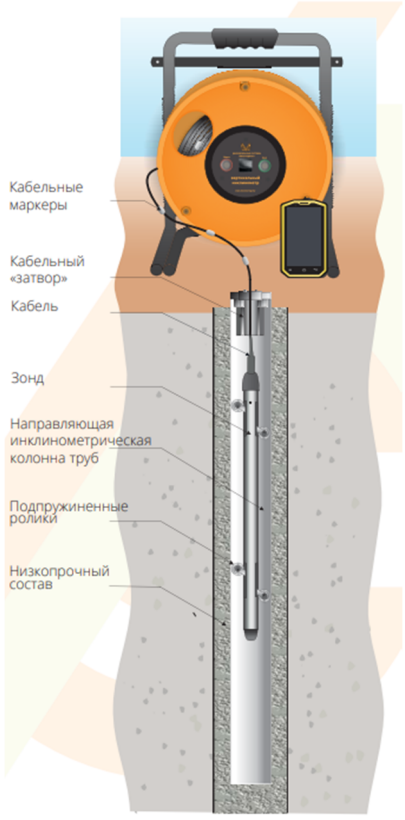


Рисунок 5.14 – Схема погружения скважинного инклинометра

К технологическим преимуществам данного способа относятся:

− малый диаметр скважин (порядка 30–50 мм) по сравнению с диаметром свай, составляющих диафрагму;

− практическая осуществимость и относительная простота технической реализации.

Применение технологии алмазного бурения позволяет минимизировать динамические воздействия на материал диафрагмы и обеспечить целостность стенок скважины.

Для формирования репрезентативной картины о пространственном поведении диафрагмы необходимо устраивать инклинометрические скважины следует размещать по всей её длине. Наиболее значимыми участками для размещения скважин являются:

− зона максимального напора;

− участки береговых примыканий, где возможна концентрация наибольших деформаций;

− зоны с неоднородным геологическим строением основания плотины.

Конечным результатом цикла инклинометрических наблюдений является построение вертикального профиля скважины, графически отображающего величину горизонтальных смещений по глубине заложения диафрагмы (рисунок 5.15).

Внедрение предложенного способа контроля в систему мониторинга грунтовых плотин с ГЦБД из БСС позволит получить массив ранее неизученной информации о работе ГЦБД из БСС в условиях постоянной эксплуатации:

1. Экспериментальное определение формы изгиба диафрагмы. Определение реальной изогнутой оси диафрагмы под воздействием гидростатического давления и бокового давления грунта;

2. Диагностика целостности. Своевременное выявление и локализация зон потенциального трещинообразования, фиксируемых как резкие изломы на инклинометрической кривой;

3. Уточнение и верификация расчетных моделей грунтовой плотины с ГЦБД из БСС, выполняемых в программных комплексах, путем использования натурных данных о фактических перемещениях;

4. Разработка научно обоснованных критериев безопасности для плотин с ГЦБД из БСС по величине допустимых горизонтальных смещений.

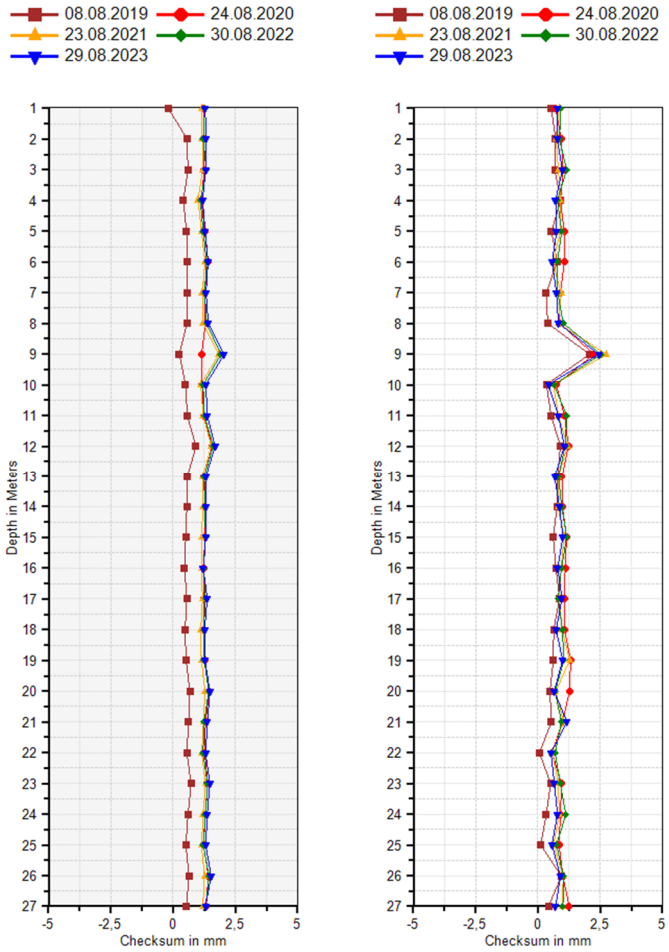


Рисунок 5.15 – Пример графической обработки результатов измерений

Полученные инклинометрические кривые позволяют получить реальную картину изгиба и наклона диафрагмы, выявить точки концентрации деформаций (переломы на кривой) и количественно оценить величину горизонтальных смещений для сравнения с предельными значениями.

Таким образом, применение скважинных инклинометров для мониторинга ГЦБД из БСС представляет собой технически обоснованный и эффективный подход. Предлагаемый способ позволяет получить принципиально новые данные о пространственной работе противофильтрационного элемента в условиях

эксплуатации. Реализация системы инклинометрического контроля обеспечит получение объективной информации о деформационном состоянии диафрагмы, что является необходимым условием для обоснования её долговременной надежности и безопасности всей плотины в целом.

5.4 Выводы к главе 5

1. Существует ряд разработанных и запатентованных технических решений, которые направлены на контроль фильтрационного состояния плотины с ГЦБД из БСС, однако остаются не учтенными такие проблемы как обеспечение сохранности КИА в БСС и контроль деформаций ПФЭ.

2. Определены основные сложности при производстве работ по монтажу КИА в скважины БСС на примерах их использования в отечественной практике. Выявлена низкая эффективность ранее применявшихся технологий в части сохранности КИА при монтаже в скважины БСС.

3. Впервые разработаны технические решения, в том числе защищенные патентами РФ, что свидетельствует об их оригинальности и воспроизводимости. Решения обеспечивают надежный монтаж и инструментальный контроль деформаций для ГЦБД из БСС, что раньше оставалось вне области мониторинга:

− Способ монтажа дистанционной КИА в БСС, гарантирующий работоспособность и проектное позиционирование датчиков в процессе укладки ГЦБ смеси [52, 82];

− Способ контроля деформаций межсвайных швов ГЦБД, позволяющий напрямую измерять величину их раскрытия и определять наиболее опасные участки, что является принципиально новым в практике мониторинга подобных ПФЭ [83].

− Техническое решение по контролю горизонтальных смещений и наклона ГЦБД из БСС с помощью установки скважинного инклинометра в тело диафрагмы, что позволяет получать данные о её прогибе и пространственном поведении под нагрузкой.

4. Предложенные технические решения по инструментальному контролю, интегрирующие усовершенствованный метод монтажа и новые виды контроля, представляют собой законченное техническое решение для системы мониторинга. Этот комплекс является практической реализацией методических подходов, изложенных в Главе 4, и направлен на устранение выявленных в Главе 1 нормативных пробелов.

5. Внедрение разработанного комплекса КИА позволит получать в составе системы мониторинга достоверную информацию о реальной работе ГЦБД из БСС способствует повышению безопасной эксплуатации как существующих, так и вновь проектируемых высоких грунтовых плотин с рассматриваемым типом ПФЭ из БСС.

Заключение

В диссертационной работе была поставлена цель, заключающаяся в исследовании работы высокой грунтовой плотины с глиноцементобетонной диафрагмой из буросекущихся свай в условиях эксплуатации, разработке и обосновании технических и методических решений, которые обеспечивают рациональную организацию мониторинга и оценку технического состояния грунтовой плотины с ГЦБД из БСС на основе использования результатов натурных наблюдений и имеющихся расчётных данных.

Для достижения поставленной цели автором было запланировано и выполнено первое в отечественной практике комплексное исследование работы высокой грунтовой плотины с ГЦБД из БСС, сочетающее полноценный натурный эксперимент с современным численным моделированием и разработкой на этой основе новых технических и методических решений.

1. Выполнен анализ нормативно-методической документации по мониторингу грунтовых плотин с ПФЭ, возводимых в виде ГЦБД из БСС, проанализирован и структурирован основной состав применяемой КИА для контроля технического состояния подобных плотин. Определены и обоснованы недостатки нормативной базы, выраженные в отсутствии регламентированных требований к составу, размещению и интерпретации данных мониторинга.

2. Установлено, что опыт монтажа и эксплуатации КИА в ПФЭ грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС требует отдельной проработки нормативной документации, а также разработки технических решений по сохранению работоспособности КИА, расширению способов инструментального контроля для всестороннего изучения работы аналогичных плотин в период эксплуатации.

3. На основе анализа конечно-элементного моделирования фильтрационного состояния и НДС грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС установлено распределение напряжения, расчетных градиентов напора и

положение депрессионной поверхности, в результате чего доказана надежность применяемой конструкции в условиях эксплуатации. При различных расчетных случаях установлено, что фильтрационная прочность и устойчивость обеспечиваются. В ГЦБД установлены вертикальные сжимающие напряжения, не превышающие расчетные, а растягивающие напряжения отсутствуют.

4. По результатам комплексного анализа данных натурных наблюдений впервые получена детальная картина фильтрационного состояния и НДС высокой грунтовой плотины с ГЦБД из БСС в условиях эксплуатации, определены ее соответствия и различия расчетным данным при проектировании на примере плотины Нижне-Бурейской ГЭС. Расчетные значения градиента напора, напряжений в грунте и в ГЦБД оказались существенно выше фактически определенных автором при анализе данных мониторинга, что доказывает прочность диафрагмы.

5. По результатам анализа данных натурных наблюдений на плотине Нижне-Бурейской ГЭС впервые установлены особенности формирования НДС в ГЦБД из БСС, включая немонолитный характер работы диафрагмы, обусловленные различным сочетанием нагрузок, определяющим напряженное состояние. Определено, что в диафрагме из БСС каждая свая испытывает уникальное НДС, взаимодействуя с грунтом тела плотины, при этом критически важным явилось установление факта наличия устойчивого сжатого состояния контролируемых свай, что исключает риск гидроразрыва межсвайных швов.

6. Выполненное автором сопоставление результатов расчетных исследований с результатами проведенного анализа данных мониторинга показало их удовлетворительную сходимость по характеристикам напряженно-деформированного и фильтрационного состояний, подтверждающую надежность работы грунтовой плотины с ГЦБД, выполненной методом БСС в условиях эксплуатации.

7. Полученные результаты комплексных (расчетных и натурных) исследований за работой ГЦБД из БСС в условиях штатной эксплуатации обеспечили основу для разработки практических рекомендаций по

рациональному принципу мониторингу грунтовых плотин с ГЦБД из БСС, а также технических решений по оснащению КИА.

8. Впервые разработан и научно обоснован рациональный методический подход к организации и совершенствованию системы мониторинга грунтовой плотины с ГЦБД из БСС, определяющий минимальный состав КИА и периодичность наблюдений, алгоритм планирования состава и размещения КИА в плотине с ГЦБД из БСС, а также поэтапную методику обработки и интерпретации данных регулярных наблюдений. В основу рекомендаций легли, в том числе принципы, применяемые автором при анализе результатов мониторинга за состоянием грунтовой плотины с ГЦБД из БСС в период строительства и эксплуатации.

9. Разработанный методический подход к организации мониторинга грунтовой плотины с ГЦБД из БСС в отличие от существующих нормативных требований, предусматривающих преимущественно контроль фильтрационного состояния, включает также контроль деформаций ПФЭ в наиболее подверженных деформациям участках и направлен на комплексную оценку фильтрационного состояния и НДС плотины.

10. Разработан и запатентован способ монтажа КИА в ГЦБД из БСС, в основе которого лежит принцип изоляции датчиков КИА от поступающей ГЦБД смеси. Данная технология обеспечивает проектное положение КИА в процессе монтажа и сохранность КИА при бетонировании скважины.

11. Разработан и запатентован способ контроля деформаций в грунтовой плотине межсвайных швов ГЦБД из БСС, расширяющий возможности раннего выявления неблагоприятных тенденций и позволяющий обеспечить контроль целостности диафрагмы в наиболее подверженных деформациям участках, а также распространить область контроля на всю длину диафрагмы.

Результаты настоящей диссертационной работы были использованы при строительстве грунтовой плотины, разработке автором декларации безопасности ГТС Нижне-Бурейской ГЭС в 2024–2025 гг., а принципы анализа данных натурных наблюдений и оценка технического состояния грунтовой плотины

Нижне-Бурейской ГЭС применялись в период строительства, постановки сооружений под напор и продолжается в настоящее время.

В качестве возможного развития и направления дальнейших исследований по тематике представленной диссертации целесообразно совершенствование нормативно-технической базы в части мониторинга грунтовых плотин с ГЦБД из БСС, учет результатов исследований при анализе и оценке технического состояния грунтовых плотин, а также внедрение в практику строительства запатентованных автором технических решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айрапетян, Р. А. Проектирование каменно-земляных и каменно-набросных плотин / Р. А. Айрапетян. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергия, 1975. – 328 с. – Текст : непосредственный.
2. Аллас, Э. Э. Метод устройства бетонных стенок (диафрагм) глубокого заложения // Гидротехническое строительство. – 1957. – № 10. – С. 53–55. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
3. Анализ структуры фильтрационного потока в глиноцементобетонной диафрагме плотины Гоцатлинской ГЭС / С. В. Сольский, М. Г. Лопатина, Р. Н. Орищук [и др.] // Гидротехническое строительство. – 2017. – № 7. – С. 14–21. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
4. Анисимов, Н.И. Водохранилищные плотины / Н.И. Анисимов. – Москва: ОГИЗ, 1931. – 236 с. – Текст : непосредственный.
5. Аргал, Э. С. Борьба с фильтрацией в основании западной дамбы хвостохранилища Удоканского ГМК // Гидротехническое строительство. – 2023. – № 10. – С. 16–21. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
6. Аргал, Э.С. О некоторых свойствах глиноцементобетона и особенностях работы стены в грунте в теле плотины / Э.С. Аргал, В.М. Королёв // Гидротехническое строительство. 2019. № 5. С. 10–19. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
7. Бестужева, А. С. Напряжённо-деформированное состояние грунтовой плотины с глиноцементобетонной диафрагмой и зоной из камнебетона / А. С. Бестужева, А. А. Тарасов // Гидротехническое строительство. – 2022. – № 11. – С. 2–11. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
8. Величко, А. С. Анализ методов определений прочностных и деформационных характеристик глиноцементобетона // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2023. – Т. 308. – С. 92–103. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.
9. Владов, М. Л. Введение в георадиолокацию / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – Москва : Изд-во Моск. ун-та, 2005. – 155 с. – Текст : непосредственный.

10. Владов, М. Л. Обзор геофизических методов исследований при решении инженерно-геологических и инженерных задач / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – М.: Изд-во ГДС Продакшен, 1998. – 64 с.
11. Воробьев, К. М. Сравнительный анализ НДС противофильтрационных элементов плотин Гоцатлинской и Нижне-Бурейской ГЭС / К. М. Воробьев, Р. Ю. Лабойко // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей : сб. науч. тр. – Вып. 5. – Ч. 2 / под ред. проф. Г. Л. Гладкова, К. П. Моргунова. – Санкт-Петербург : Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2021. – С. 179–193. – Текст : непосредственный.
12. Воронков, О. К. Динамические характеристики глиноцементобетона в условиях сейсмического воздействия интенсивностью 8 баллов / О. К. Воронков, Л. Ф. Ушакова, П. В. Чернов // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2018. – Т. 290. – С. 55–61. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.
13. Выбор типа противофильтрационного устройства в вариантах плотин из местных материалов Канкунского гидроузла / В. А. Заирова, Е. А. Филиппова, Р. Н. Орищук, А. Д. Созинов // Гидротехническое строительство. – 2010. – № 2. – С. 8–13. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
14. Ганичев, И. А. Новые способы устройства противофильтрационных завес / И. А. Ганичев, А. Н. Мещеряков, В. Б. Хейфец // Гидротехническое строительство. – 1961. – № 2. – С. 14–18. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
15. Гидротехнические сооружения : в 2 ч. Ч. 1 / [М. М. Гришин и др.] ; под ред. М. М. Гришина. – Москва : Высш. школа, 1979. – 615 с. – Текст : непосредственный.
16. Гольдина, Т. М. Использование глиноцементобетона для строительства ГТС при отрицательных температурах / Т. М. Гольдина, Е. Е. Легина, А. С. Величко // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2018. – Т. 289. – С. 30–43. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.

17. Гордиенко, С. Г. Вероятностно-статистический прогноз образования суффозионных воронок в зоне дренажа (на примере Нижегородской ГЭС) / С. Г. Гордиенко, Ю. Ю. Савельева // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2001. – Т. 239. – С. 119–124. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.
18. Гордиенко, С. Г. Методологические принципы оптимизации при проведении ремонта дренажей грунтовых плотин / С. Г. Гордиенко, И. Н. Гусакова // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2001. – Т. 239. – С. 110–118. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.
19. ГОСТ Р 57793-2025. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Гидравлические и гидроаккумулирующие электростанции. Гидротехнические сооружения. Мониторинг и оценка технического состояния в процессе эксплуатации. Основные положения. – Москва : ФГБУ «РСТ», 2025. – Текст : непосредственный.
20. ГОСТ Р 58719-2019. Контрольно-измерительные системы и аппаратура. Условия создания. Нормы и требования. – Москва : Стандартинформ, 2019. – Текст : непосредственный.
21. ГОСТ Р 59873-2021. Гидроэлектростанции. Методика определения критериев безопасности для декларируемых гидротехнических сооружений. – Москва : ФГБУ «РСТ», 2021. – Текст : непосредственный.
22. Гришин, В. А. Опыт использования бентонито-цементного бетона для ремонта ядра грунтовой плотины Курейской ГЭС / В. А. Гришин, Л. М. Дерюгин // Гидротехническое строительство. – 2006. – № 2. – С. 2–8. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
23. Демиденко, А. И. Особенности метода горизонтального направленного бурения установками ГНБ / А. И. Демиденко, А. Б. Летопольский, Ю. А. Ушацкая // Сборник материалов II Национальной научно-практической конференции «Образование. Транспорт. Инновации. Строительство». – 2019. – С. 10–13. – Текст : непосредственный.
24. Денисов, Г. В. Состояние плотины Гоцатлинской ГЭС в процессе наполнения водохранилища по данным натурных наблюдений и численного

моделирования / Г. В. Денисов, О. Ю. Давыдкин, К. М. Воробьев // Гидротехническое строительство. – 2017. – № 3. – С. 54–61. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.

25. Дерюгин, Л. М. Свойства бентонито-цементных литых бетонов для конструкций типа «стена в грунте» из буросекущих свай // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 4. – С. 16–18. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
26. Жиленков, В. Н. О водопроницаемости и критериях суффозионной устойчивости глинистых грунтов и материалов / В. Н. Жиленков // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2011. – Т. 263. – С. 18–37. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.
27. Зверев, А. О. Работоспособность полимерных геомембран как противофильтрационных элементов грунтовых плотин / А.О. Зверев // Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства : сборник тезисов докладов IV Всероссийского научно-практического семинара. – 2021. – С. 34–35. – URL: https://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2021/Sbornik_Problemy-gidravliki__2021.pdf (дата обращения: 13.02.2025). – Текст : электронный.
28. Зубков, Б. М. Подземные сооружения, возводимые способом «стена в грунте» / Б. М. Зубков, Е. М. Перлей, В. Ф. Раюк. – Ленинград : Стройиздат, 1977. – 200 с. – Текст : непосредственный.
29. Иванов, Н. Н. Методика лабораторных опытов по самозалечиваемости трещин в глинистых ядрах и экранах грунтовых плотин / Н. Н. Иванов, Г. Х. Праведный // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. Фильтрационные исследования и расчеты при проектировании гидротехнических сооружений. – 1983. – С. 136–139. – Текст : непосредственный.
30. ИДС «Дедал 2.0» // АО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева». – URL: https://vniig.rushydro.ru/work_services/programmnoe-obespechenie/ids-dedal-2-0/ (дата обращения: 19.03.2026). – Текст : электронный.

31. ИДС БИНГ // ООО НПП «ГЕОС». – URL: https://nppgeos.ru/ids-bing (дата обращения 19.03.2026). – Текст : электронный.
32. Использование инновационных решений при создании противофильтрационной диафрагмы в перемычке Нижне-Бурейской ГЭС / К. П. Кудрин, В. М. Королёв, Э. С. Аргал [и др.] // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 7. – С. 22–28. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
33. Исследование самозалечивания трещин в глиноцементобетонных диафрагмах (на примере земляной плотины Гоцатлинской ГЭС) / С. В. Сольский, Р. Н. Орищук, М. Г. Лопатина, Н. Л. Орлова // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – Т. 283. – С. 19–29. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.
34. Каган, А. А. Мониторинг геологической среды в области влияния гидротехнических сооружений / А. А. Каган, Н. Ф. Кривоногова // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 1999. – Т. 235. – С. 91–94. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.
35. Комплект оборудования «Струна-5» // ООО НПК «Фаза». – URL: https://ntcrmezon.ru/struna-5/ (дата обращения: 19.03.2026). – Текст : электронный.
36. Кондратенко, П. В. Геофизические исследования асфальтобетонной диафрагмы грунтовой плотины методами электроразведки и сейсморазведки / П. В. Кондратенко // Гидротехника. – 2021. – № 3. – С. 75–77. – Текст : непосредственный.
37. Кондратенко, П. В. Использование метода электротомографии для обследования грунтовых гидротехнических сооружений и их оснований / П. В. Кондратенко // В мире неразрушающего контроля. – 2015. – № 2 (68). – С. 22–26. – Текст : непосредственный.
38. Королёв, В. М. Особенности работы глиноцементобетона в противофильтрационных элементах грунтовых плотин при знакопеременных температурах / В. М. Королёв, И. Н. Шишов, Э. С. Аргал // Гидротехническое

строительство. – 2021. – № 2. – С. 9–16. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.

39. Костин, В. В. Грунтовая плотина Ирганайской ГЭС / В. В. Костин, А. А. Нейковский, Б. Н. Юркевич // Гидротехническое строительство. – 2007. – № 6. – С. 60–65. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
40. Котлов, О. Н. Полевые исследования по самозалечиванию трещин в противофильтрационном элементе из буросекущих глиноцементобетонных свай / О. Н. Котлов, Р. Н. Орищук, Ф. И. Гуняшова // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13. – Вып. 3 (114). – С. 322–329. – Текст : непосредственный.
41. Котов, Ф. В. Работоспособность каменно-набросной плотины с центральной бетонной призмой и асфальтобетонной диафрагмой внутри / Ф. В. Котов // Вестник Евразийской науки. – 2020. – Т. 12. – № 1. – URL: https://esj.today/PDF/39SAVN120.pdf (дата обращения: 25.03.2026). ISSN 2588-0101. – Текст : электронный.
42. Круглицкий, Н. Н. Траншейные стенки в грунтах / Н. Н. Круглицкий, С. И. Мильковский, В. М. Шейнблюм. – Киев : Наукова Думка, 1973. – 200 с. – Текст : непосредственный.
43. Кузнецов, В. С. Критерии оценки надежности и безопасности грунтовых плотин / В. С. Кузнецов // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2000. – Т. 238. – С. 20–24. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.
44. Кузнецов, В. С. Техника определения критериев состояния грунтовых плотин / В. С. Кузнецов // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2003. – Т. 242. – С. 83–99. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.
45. Лабойко, Р. Ю. Комплексный подход к оценке напряженно-деформированного состояния грунтовой плотины с глиноцементобетонной диафрагмой из буросекущихся свай / Р. Ю. Лабойко // Молодые учёные России 2025 : сборник статей V Всероссийского научно-исследовательского конкурса. – Пенза : МЦНС «Наука и Просвещение», 2025. – С. 13–18. – Текст : непосредственный.
46. Лабойко, Р. Ю. Мониторинг деформаций грунтовой плотины с глиноцементобетонной диафрагмой из буросекущихся свай / Р. Ю. Лабойко, С.

В. Сольский, А. В. Попов // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2024. – Т. 313. – С. 81–90. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.

47. Лабойко, Р. Ю. Напряженно-деформированное состояние асфальтобетона и глиноцементобетона в качестве материала диафрагмы грунтовой плотины / Р. Ю. Лабойко, К. М. Воробьев // Гидротехническое строительство. – 2023. – № 6. – С. 20–27. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
48. Лабойко, Р. Ю. Особенности мониторинга за состоянием грунтовых плотин с диафрагмой из глиноцементобетонных буросекущихся свай / Р. Ю. Лабойко // Гидротехническое строительство. – 2023. – № 10. – С. 9–15. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
49. Лабойко, Р. Ю. Особенности температурного режима грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС в период начальной эксплуатации / Р. Ю. Лабойко, С. Ю. Ладенко // Водные пути и русловые процессы. Гидротехнические сооружения водных путей : сборник научных трудов. – Вып. 6. – Ч. 2 / под ред. проф. Г. Л. Гладкова, К. П. Моргунова. – Санкт-Петербург : Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2023. – С. 22–28. – Текст : непосредственный.
50. Лабойко, Р. Ю. Проблемы мониторинга грунтовых плотин с глиноцементобетонной диафрагмой из буросекущихся свай / Р. Ю. Лабойко // Проблемы строительства и гидравлики гидротехнических сооружений : сборник материалов научно-практической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения профессора, доктора технических наук, Заслуженного деятеля науки Российской Федерации Колосова Михаила Александровича. – Санкт-Петербург, 2024. – С. 142–147. – Текст : непосредственный.
51. Лабойко, Р. Ю. Расчетные исследования земляной плотины с глиноцементобетонной диафрагмой из буросекущихся свай / Р. Ю. Лабойко // Гидротехническое строительство. – 2025. – № 8. – С. 28–34. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
52. Лабойко, Р. Ю. Совершенствование контроля состояния грунтовой плотины с глиноцементобетонной диафрагмой / Р. Ю. Лабойко, С. В. Сольский //

Гидротехническое строительство. – 2024. – № 3. – С. 45–50. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.

53. Лупачев, О. Ю. Противофильтрационные элементы из геомембран. Опыт применения в гидротехническом строительстве / О. Ю. Лупачев, В. И. Телешев // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – № 6. – С. 35–43. – Текст : непосредственный.
54. Ляпичев, Ю. П. Оценка безопасности строящейся каменно-набросной плотины Богучанской ГЭС / Ю. П. Ляпичев // Природообустройство. – 2008. – № 1. – С. 47–54. – Текст : непосредственный.
55. Малышев, Л. И. Состояние плотины Курейской ГЭС и технические решения по её ремонту / Л. И. Малышев, Л. Н. Рассказов, П. В. Солдатов // Гидротехническое строительство. – 1999. – № 1. – С. 31–36. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
56. Методика оценки состояния грунтовой плотины с учетом данных натурных наблюдений / Е. Н. Беллендир, В. Б. Глаговский, А. А. Готлиф, В. С. Прокопович // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2000. – Т. 238. – С. 25–28. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.
57. Мещеряков, А. Н. Противофильтрационные и несущие стенки в грунте / А. Н. Мещеряков, В. Б. Хейфец. – Москва : Энергия, 1969. – 95 с. – (Библиотека гидротехника и гидроэнергетика ; вып. 10). – Текст : непосредственный.
58. Моисеев, С. Н. Каменно-земляные и каменно-набросные плотины. Основы проектирования и строительство / С. Н. Моисеев. – Москва : Энергия, 1970. – 176 с. – Текст : непосредственный.
59. Набросные плотины (союзные и иностранные) / И. П. Сафронов. – Москва : Главлит, 1936. – 152 с. – Текст : непосредственный.
60. Научное обеспечение безопасной эксплуатации грунтовых плотин Воткинской ГЭС / А. П. Деев, В. Ф. Фисенко, С. В. Сольский [и др.] // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 6. – С. 8–16. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.

61. Ничипорович, А. А. Проектирование и постройка укатанных земляных плотин / А. А. Ничипорович, В. С. Истомина. – Москва ; Ленинград : ОНТИ, 1936. – 336 с. – Текст : непосредственный.
62. Новое в создании противофильтрационного элемента в теле грунтовой плотины / В. М. Королёв, О. Е. Смирнов, Э. С. Аргал, А. В. Радзинский // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 8. – С. 2–9. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
63. Нормативно-правовое обеспечение мониторинга безопасности гидротехнических сооружений / Е. З. Арифуллин, В. И. Деева, А. В. Калач, П. С. Куприенко. – Воронеж : Изд-во ВГТУ, 2016. – Ч. 2. – С. 182–186. – Текст : непосредственный.
64. Носов, И. Д. Технология строительства подземных сооружений. Специальные способы строительства / И. Д. Носов, В. А. Федюкин, М. Н. Шуплик, В. И. Ресин. – Москва : Недра, 1992. – С. 32–59. – Текст : непосредственный.
65. Обоснование конструкции узла сопряжения суглинистого экрана основания и пленочного экрана откоса напорного бассейна Зарагижской МГЭС / С. В. Сольский, М. Г. Лопатина, О. Н. Котлов [и др.] // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2016. – Т. 281. – С. 9–19. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.
66. Обоснование применения глиноцементобетонной противофильтрационной диафрагмы II очереди строительства Ленинградской АЭС-2 / С. В. Сольский, О. Н. Котлов, Р. Н. Орищук, Н. Л. Орлова // Научная жизнь. – 2017. – № 1. – С. 4–13. – Текст : непосредственный.
67. Опыт возведения противофильтрационных устройств из грунтоцементных смесей / В. Г. Радченко, М. Г. Лопатина, Е. В. Николайчук, С. В. Радченко // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 6. – С. 46–54. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
68. Опыт проектирования и строительства грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС с применением в качестве противофильтрационного устройства диафрагмы из буросекущихся свай ГЭС / В. В. Борзунов, Г. В. Денисов, Е. А.

Кадушкина [и др.] // Гидротехническое строительство. – 2019. – № 6. – С. 2–11. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.

69. Орищук, Р.Н. Разработка и обоснование конструкции самозалечивающихся противофильтрационных диафрагм грунтовых плотин из буросекущихся глиноцементобетонных свай: специальность 05.23.07 «Гидротехническое строительство»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Орищук Роман Николаевич. – Санкт-Петербург, 2019. – 18 с. – Текст : непосредственный.
70. Орищук, Р. Н. Новые конструкции грунтовых плотин с глиноцементобетонными диафрагмами / Р. Н. Орищук // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2019. – Т. 292. – С. 21–30. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.
71. Орищук, Р. Н. Оценка состояния грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС / Р. Н. Орищук, Р. Ю. Лабойко // Гидротехническое строительство. – 2021. – № 10. – С. 26–38. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
72. Орищук, Р. Н. Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации глиноцементобетонных диафрагм грунтовых плотин, возводимых методом буросекущихся свай / Р. Н. Орищук // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2018. – Т. 287. – С. 3–13. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.
73. Орищук, Р. Н. Разработка и обоснование конструкции самозалечивающихся противофильтрационных диафрагм грунтовых плотин из буросекущихся глиноцементобетонных свай : специальность 05.23.07 «Гидротехническое строительство» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Орищук Роман Николаевич. – Санкт-Петербург, 2019 – 165 с. – Текст : непосредственный.
74. Осадчук, В. А. Опыт устройства противофильтрационных траншейных завес из различных материалов / В. А. Осадчук // Гидротехническое строительство. – 2004. – № 4. – С. 30–34. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
75. Особенности и перспективы применения глиноцементобетона в противофильтрационных устройствах грунтовых плотин / С. В. Сольский, Р. Н.

Орищук, Е. Е. Легина, А. С. Величко // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2020. – Т. 295. – С. 58–69. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.

76. П 71-2000 Рекомендации по диагностическому контролю фильтрационного режима грунтовых плотин : издание официальное : утвержден и введен в действие письмом РАО «ЕЭС России» № 02-1-03-4/633 от 03.07.98 / разработан ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева». – Санкт-Петербург. – Текст : непосредственный.

77. П 72-2000 Рекомендации по проведению визуальных наблюдений и обследований на грунтовых плотинах : издание официальное : утвержден и введен в действие письмом РАО «ЕЭС России» № 02-1-03-4/631 от 03.07.98 / разработан ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева». – Санкт-Петербург. – Текст : непосредственный.

78. П 92-2001 Рекомендации по обследованию гидротехнических сооружений с целью оценки их безопасности : издание официальное : утвержден и введен в действие Департаментом научно-технической политики и развития РАО «ЕЭС России» 07.10.2000 / разработан ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева». – Санкт-Петербург. – Текст : непосредственный.

79. Патент на изобретение № 2628447. Российская Федерация, МПК E02B 7/06, E02B 3/16, Способ контроля глиноцементобетонной диафрагмы в грунтовой плотине / Орищук Р.Н., Сольский С.В., Лопатина М.Г., Арын Б.А.; заявитель и патентообладатель АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» № 2016113003; заявл. 05.04.2016; опубл. 16.08.2017, Бюл. № 23. – Текст : непосредственный

80. Патент на изобретение № 2678535. Российская Федерация, МПК E02B 7/06, E02B 3/16, G01N 27/00, Способ мониторинга состояния диафрагмы из буросекущихся глиноцементобетонных свай в грунтовой плотине методом электротомографии / Орищук Р.Н., Сольский С.В., Кондратенко П.В.; заявитель и патентообладатель АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» № 2018104597; заявл. 06.02.2018; опубл. 29.01.2019, Бюл. № 4. – Текст : непосредственный

81. Патент на изобретение № 2709040. Российская Федерация, МПК E02B 7/06, Способ контроля фильтрационного состояния грунтовой плотины с глиноцементобетонной диафрагмой / Орищук Р.Н., Сольский С.В., Лопатина М.Г., Арын Б.А.; заявитель и патентообладатель АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» № 2019109575; заявл. 01.04.2019; опубл. 13.12.2019, Бюл. № 35. – Текст : непосредственный
82. Патент на изобретение № 2822674. Российская Федерация, МПК E02B 7/06, Способ монтажа дистанционной контрольно-измерительной аппаратуры в буросекущиеся сваи глиноцементобетонной диафрагмы грунтовой плотины / Сольский С.В., Лабойко Р.Ю.; заявитель и патентообладатель АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» № 2023131841; заявл. 29.11.2023; опубл. 11.07.2024, Бюл. № 20. – Текст : непосредственный
83. Патент на изобретение № 2852768. Российская Федерация, МПК E02B 7/06, Способ контроля деформаций с определением наибольших значений раскрытия межсвайных швов глиноцементобетонной диафрагмы из буросекущихся свай в грунтовой плотине / Сольский С.В., Лабойко Р.Ю.; заявитель и патентообладатель АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» № 2025101340; заявл. 23.01.2025; опубл. 15.12.2024, Бюл. № 35. – Текст : непосредственный
84. Патент на полезную модель № 165086. Российская Федерация, МПК E02D 1/00. Устройство для определения характеристик волоконно-оптического датчика при фильтрации в грунте/ Сольский С.В., Лопатина М.Г., Дубок В.В., Макушин А.Л., Арын Б.А.; заявитель и патентообладатель АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» № 2016111787/28; заявл. 29.03.2016; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 28. – Текст : непосредственный
85. Патент РФ на изобретение № 2644964. Российская Федерация, МПК E02B 7/00, E02B 9/00, E02D 1/08. Способ определения местоположения повреждений и их контроль в днище бассейна суточного регулирования/ Орищук Р.Н., Сольский С. В., Лопатина М. Г., Арын Б.А., Макушин А. Л., Агабабян А. В., Дубок В. В., Коних Г. С., Танхилевич Ю. В., Гамаонов А. А.; заявитель и

патентообладатель АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»; № 2017100755; заявл. 10.01.2017; опубл. 15.02.2018, Бюл. № 5. – Текст : непосредственный

86. Подвысоцкий, А. А. Сравнение работоспособности типов грунтовой плотины для условий Муллалакской ГЭС / А. А. Подвысоцкий, М. П. Саинов, А. Ю. Кириченко // Вестник МГСУ. – 2021. – Т. 16. – Вып. 2. – С. 202–219. – Текст : непосредственный.
87. Приказ Ростехнадзора от 08.05.2024 № 151 «Об утверждении федеральных норм и правил в области безопасности гидротехнических сооружений «Требования к обеспечению безопасности гидротехнических сооружений (за исключением судоходных и портовых гидротехнических сооружений)». – Текст : непосредственный.
88. Применение оптоволоконных технологий для контроля фильтрации на гидротехнических сооружениях / А. С. Кузнецов, Е. В. Герасимова, В. В. Дубок, А. Л. Макушин // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2014. – Т. 272. – С. 79–86. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.
89. Производство гидротехнических работ : учебник для вузов. Ч. 1. Общие вопросы строительства. Земляные и бетонные работы / под общ. ред. проф., д.т.н. Телешева В. И. – Текст : непосредственный.
90. Прокопович, В. С. Напряженно-деформированное состояние земляной плотины с глиноцементобетонной диафрагмой на примере земляной плотины Гоцатлинской ГЭС / В. С. Прокопович, А. С. Величко, Р. Н. Орищук // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2016. – Т. 282. – С. 87–98. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.
91. Противофильтрационная стенка в котловане Нижне-Камской ГЭС / А. Д. Бунтман, В. Б. Хейфец, Д. Г. Шнейдер, М. Ф. Хасин // Гидротехническое строительство. – 1973. – № 7. – С. 12–15. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
92. Противофильтрационные завесы гидротехнических сооружений на многолетней мерзлоте / В. И. Федосеев, И. Н. Шишов, В. А. Пехтин [и др.] // Опыт проектирования и производства работ : в 2 т. – Санкт-Петербург :

ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2009. – Т. 2. – С. 303–316. – Текст : непосредственный.

93. Радзинский, А. В. Надёжность грунтовых плотин с противофильтрационным элементом в виде «стены в грунте»: специальность 05.23.07 «Гидротехническое строительство» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Радзинский Александр Владимирович. – Москва, 2014. – 128 с. – Текст : непосредственный.
94. Радченко, В. Г. Каменно-земляные и каменно-набросные плотины / В. Г. Радченко, В. А. Заирова. – Ленинград : Энергия, 1971. – 166 с. – Текст : непосредственный.
95. Разработка программного обеспечения // ООО «МОНСОЛ РУС». – URL: https://monsol.ru/uslugi/razrabotka-programmnogo-obespechenia/ (дата обращения: 19.03.2026). – Текст : электронный.
96. Рассказов, Л. Н. Выбор состава глиноцементобетона при создании «стены в грунте» / Л. Н. Рассказов, А. В. Радзинский, М. П. Саинов // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 3. – С. 16–23. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
97. Рассказов, Л. Н. Плотины с глиноцементобетонной диафрагой. Напряженно-деформированное состояние и прочность / Л. Н. Рассказов, А. В. Радзинский, М. П. Саинов // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 9. – С. 37–44. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
98. Рассказов, Л. Н. Прочность и деформативность глиноцементобетона в сложном напряжённом состоянии / Л. Н. Рассказов, А. В. Радзинский, М. П. Саинов // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 8. – С. 29–33. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
99. РД 153-34.2-21.546-2003 Правила организации и проведения натурных наблюдений и исследований на плотинах из грунтовых материалов : издание официальное : утвержден и введен в действие Департаментом научно-технической политики и развития РАО «ЕЭС России» 01.02.2005 / разработан

ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева». – Санкт-Петербург. – Текст : непосредственный.

100. Результаты лабораторных исследований фильтрационных характеристик глиноцементобетона / С. В. Сольский, М. Г. Лопатина, Е. Е. Легина [и др.] // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 8. – С. 36–40. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.
101. Рекомендации российских нормативных документов по обеспечению надежности грунтовых плотин / Е. Н. Беллендир, Т. Ф. Липовецкая, В. Г. Радченко, Д. Д. Сапегин // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2000. – Т. 238. – С. 5–14. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.
102. Российская Федерация. Законы. О безопасности гидротехнических сооружений : Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 117-ФЗ (ред. от 08.12.2020). – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс» (дата обращения: 26.03.2026). – Текст : электронный.
103. Руководство по проектированию стен сооружений и противофильтрационных завес, устраиваемых способом «стена в грунте» / НИИОСП имени Н. М. Герсеванова. – Москва : Стройиздат, 1977. – 129 с. – Текст : непосредственный.
104. Савич, А. И. Комплексные инженерно-геофизические исследования при строительстве гидротехнических сооружений / А. И. Савич, Б. Д. Куюнджич [и др.]. – Москва : Недра, 1990. – 461 с. – Текст : непосредственный.
105. Саинов, М. П. Исторический обзор применения жёстких диафрагм в конструкциях грунтовых плотин / М. П. Саинов // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14. – № 6. – URL: https://esj.today/PDF/39SAVN622.pdf (дата обращения: 25.03.2026). – ISSN 2588-0101. – Текст : электронный.
106. Саинов, М. П. Оценка надежности диафрагмы из буронабивных свай в плотине средней высоты / М. П. Саинов, Ф. В. Котов // Вестник МГСУ. – 2014. – № 1. – С. 153–163. – Текст : непосредственный.
107. Саинов, М. П. Плотина стометровой высоты с глиноцементобетонной диафрагмой по типу «стена в грунте» / М. П. Саинов, Ф. В. Котов // Вестник МГСУ. – 2014. – Вып. 9. – С. 106–115. – Текст : непосредственный.

108. Саинов, М. П. Пространственная работа противофильтрационной стены / М. П. Саинов // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 5. – С. 20–33. – Текст : непосредственный.

109. Саинов, М. П. Противофильтрационные элементы грунтовых плотин из геосинтетических материалов / М. П. Саинов, А. О. Зверев // Инновации и инвестиции. – 2018. – № 1. – Текст : непосредственный.

110. Саинов, М. П. Работоспособность грунтовой плотины с многоярусной диафрагмой, выполненной методом «стена в грунте» / М. П. Саинов, Ф. В. Котов // Вестник Евразийской науки. – 2018. – № 5. – URL: https://esj.today/PDF/03SAVN518.pdf (дата обращения: 25.03.2026). – ISSN 2588-0101. – Текст : электронный.

111. Саинов, М. П. Сравнение вариантов конструкции высокой каменной плотины в условиях Якутии / М. П. Саинов, Ф. В. Котов // Вестник МГСУ. – 2011. – Вып. 5. – С. 30–35. – Текст : непосредственный.

112. Саинов, М.П. Напряженно-деформированное состояние грунтовых плотин с противофильтрационными элементами из материалов на основе цемента: специальность 05.23.07 «Гидротехническое строительство» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Саинов Михаил Петрович. – Москва, 2017. – 599 с. – Текст : непосредственный.

113. Саинов, М. П. Влияние деформируемости материала противофильтрационной диафрагмы, выполненной в грунтовой плотине методом «стена в грунте», на её прочность / М. П. Саинов, Г. М. Кудрявцев // Вестник МГСУ. – 2017. – № 2. – С. 214–221. – Текст : непосредственный.

114. Смородинов, М. И. Устройство сооружений и фундаментов способом «стена в грунте» / М. И. Смородинов, В. С. Фёдоров. – Москва : Стройиздат, 1986. – 216 с. – Текст : непосредственный.

115. Собкалов, П. Ф. Траншейные стенки в гидротехническом строительстве / П. Ф. Собкалов. – Москва, 1981. – 51 с. – Текст : непосредственный.

116. Соболь, И.С., Ежков А.Н., Горохов Е.Н. Проектирование плотины из грунтовых материалов. Методические указания для выполнения курсовых

проектов и выпускных квалификационных работ студентами направления 270100 – «Строительство» и специальности 270104 – «Гидротехническое строительство» / И. С. Соболь, А. Н. Ежков, Е. Н. Горохов. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2010. – 91 с. – Текст : непосредственный.

117. Создание системы мониторинга и диагностики оборудования эксплуатируемых ГЭС / Е. Н. Беллендир, О. Д. Рубин, А. С. Антонов, Н. П. Караблин // Гидротехническое строительство. – 2021. – № 2. – С. 2–8. – ISSN 0016-9714 – Текст : непосредственный.
118. Сольский, С. В. Анализ влияния компонентов глиноцементобетона на его характеристики / С. В. Сольский, Е. Е. Легина, Р. Н. Орищук [и др.] // Вестник МГСУ. – 2016. – № 10. – С. 83–90. – Текст : непосредственный.
119. Сольский, С. В. Метод управления напряженно-деформированным состоянием глиноцементобетонной диафрагмы грунтовой плотины / С. В. Сольский, А. С. Величко // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2024. – Т. 313. – С. 106–116. – ISSN 0368-0738. – Текст : непосредственный.
120. Сольский, С. В. Применение глиноцементобетона в практике гидротехнического строительства / С. В. Сольский, Р. Н. Орищук, А. С. Величко. – Санкт-Петербург : Изд-во АО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2023. – 260 с. – Текст : непосредственный.
121. Сольский, С. В. Совершенствование контрольно-измерительной аппаратуры гидротехнических сооружений на основе оптоволоконных технологий / С. В. Сольский, А. Л. Макушин, В. В. Дубок // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. – 2021. – Т. 300. – С. 31–42. – Текст : непосредственный.
122. Сорокин, А. Л. Основные аспекты строительства методом «стена в грунте» / А. Л. Сорокин, Л. И. Малянова // Научно-образовательный журнал для студентов и преподавателей «StudNet». – 2020. – № 6. – С. 619–623. – Текст : непосредственный.
123. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть VI. Правила производства геофизических исследований = Engineering geological site investigations for construction : свод правил : издание

официальное : утвержден 17.02.2004 : введен в действие 2004-07-01 / разработан ФГУП «ПНИИИС». – Москва : ФГУП «ПНИИИС» Госстроя России, 2004. – Текст : непосредственный.

124. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81* = Seismic building design code : свод правил : издание официальное : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 мая 2018 N 309/пр : дата введения 2018-11-25 / разработан АО «НИЦ «Строительство» – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – Москва : Стандартинформ, 2018. – Текст : непосредственный.

125. СП 23.13330.2018. Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85 = Foundation of hydraulic structures : свод правил : издание официальное : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 13 августа 2018 N 513/пр : дата введения 2019-02-14 / разработан АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». – Москва : Стандартинформ, 2019. – Текст : непосредственный.

126. СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов = Rock fill dams : свод правил : издание официальное : утвержден Приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 29 декабря 2011 г. N 635/18 : дата введения 2013-01-01 / разработан ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». – Москва : Минрегион России, 2012. – Текст : непосредственный.

127. СП 58.13330.2019 Гидротехнические сооружения. Основные положения = Hydraulic structures. Basic statements : свод правил : издание официальное : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2019 г. N 811/пр : дата введения 2020-06-17 / разработан ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». – Москва : Стандартинформ, 2020. – Текст : непосредственный.

128. СТО 17330282.27.140.004-2008. Контрольно-измерительные системы и аппаратура гидротехнических сооружений ГЭС. Условия создания. Нормы и требования : стандарт организации : издание официальное : утвержден приказом РАО «ЕЭС России» от 20.03.2008 N 140 : введен впервые : дата введения 2008-04-15 / разработан НП «Гидроэнергетика России», ОАО «НИИЭС». – Москва : ОАО РАО «ЕЭС России», 2008. – Текст : непосредственный.

129. СТО 17330282.27.140.021-2008. Контрольно-измерительные системы и аппаратура гидротехнических сооружений ГЭС. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования : стандарт организации : издание официальное : утвержден приказом РАО «ЕЭС России» от 30.06.2008 N 316 : введен впервые : дата введения 2008-07-30 / разработан НП «Гидроэнергетика России», ОАО «НИИЭС». – Москва : ОАО РАО «ЕЭС России», 2008. – Текст : непосредственный.

130. СТО 70238424.27.140.035-2009. Мониторинг и оценка технического состояния гидротехнических сооружений в процессе эксплуатации. Нормы и требования : стандарт организации : издание официальное : утвержден приказом НП «ИНВЭЛ» от 04.12.2009 N 88 : введен впервые : дата введения 2009-12-31 / разработан НП «Гидроэнергетика России», ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». – Москва : НП «ИНВЭЛ», 2008. – Текст : непосредственный.

131. СТО ВНИИГ 04.12.04-2.2023. Рекомендации по проектированию противофильтрационного элемента из глиноцементобетона / АО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева». – URL: https://vniig.rushydro.ru/activities/izdatelskaya-deyatelnost/normativnye-dokumenty/sto-vniig-04-12-04-2-2023-rekomendatsii-po-proektirovaniyu-protivofiltratsionnogo-elementa-iz-glinots/ (дата обращения: 26.03.2026). – Текст : электронный.

132. СТО РусГидро 02.03.131-2015. Гидроэлектростанции. Методика определения критериев безопасности для декларируемых гидротехнических сооружений / ПАО «РусГидро». – Москва, 2015. – URL: https://storage.yandexcloud.net/storage.rushydro.ru/iblock/eb1/eb170ae59e9a30c0af

707eccddedc16a/103_STO-RusGidro-02.03.131-2015_Kriterii-bezopasnosti-GTS.pdf (дата обращения: 26.03.2026). – Текст : электронный.

133. Технические решения и результаты первоочередных работ по сооружению противофильтрационной стены в грунте в ядре и основании плотины Курейской ГЭС / Л. И. Малышев, И. Н. Шишов, К. П. Кудрин, В. Г. Бардюков // Гидротехническое строительство. – 2001. – № 3. – С. 31–37. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.

134. Ткачев, А. А. Анализ методов исследования и борьба с фильтрацией с применением глиноцементобетонного материала / А. А. Ткачев, Д. В. Прочий // Вестник мелиоративной науки. – 2020. – Вып. 1. – С. 32–39. – Текст : непосредственный.

135. Федоров, Б. С. Стена в грунте – прогрессивный способ строительства / Б. С. Федоров, М. И. Смородинов. – Москва : Стройиздат, 1975. – 33 с. – Текст : непосредственный.

136. Шайтанов, А. М. Геомембраны в строительстве плотин / А. М. Шайтанов // Материалы и методы инновационных исследований и разработок : сборник статей международной научно-практической конференции : в 3 ч. – Челябинск, 2016. – Ч. 1. – С. 123–127. – Текст : непосредственный.

137. Шайтанов, А. М. Применение комбинированного противофильтрационного элемента в составе ограждающей дамбы золошлакоотвала Аксуской электрической станции / А. М. Шайтанов, Н. С. Талалаев // Гидротехническое строительство. – 2024. – № 1–2. – С. 8–12. – ISSN 0016-9714. – Текст : непосредственный.

138. Шайтанов, А. М. Противофильтрационные конструкции каналов с использованием геомембран / А. М. Шайтанов // Развитие инструментов управления научной деятельностью : сборник статей международной научно-практической конференции. – 2017. – Ч. 2. – С. 124–128. – Текст : непосредственный.

139. Balian, S. Cut-off wall construction / S. Balian // International Water Power and Dam Construction. – 2007. – Vol. 59, No. 2. – P. 42–44. – Текст : непосредственный.

140. Bellport, B. P. Bureau of reclamation experience in stabilizing embankment of Fontenelle earth dam / B. P. Bellport // 9-th ICOLD Congress. – 1967. – Q. 32, R. 5. – P. 67–79. – Текст : непосредственный.

141. Brown, A. J. Arminou Dam, Cyprus, and construction joints in diaphragm cut-off walls / A. J. Brown, D. A. Bruggemann // Géotechnique. – 2002. – Vol. 52, No. 1. – P. 3–13. – Текст : непосредственный.

142. Bruce, D. A. Cutoff Walls for Dams and Levees / D. A. Bruce // New Zealand Society of Large Dams (NZSOLD) and the Australian National Committee on Large Dams (ANCOLD) Conference. – Rotura, New Zealand, 2013. – 7 p. – Текст : непосредственный.

143. Cazzuffi, D. Geomembrane barrier systems for construction and rehabilitation of embankment dams / D. Cazzuffi, D. Gioffrè // Smart Geotechnics for Smart Societies. – 2023. – P. 164–179. – DOI 10.1201/9781003299127-15. – Текст : непосредственный.

144. Chakole, P. Study of the secant pile wall technique, its application and sustainable construction using the non-biodegradable waste as partial replacement for concrete materials / P. Chakole, Sh. Date // International Conference on Advances in Mechanical Engineering. – 2022. – Vol. 1259, No. 1. – P. 1–8. DOI 10.1088/1757-899X/1259/1/012007. – Текст : непосредственный.

145. Chijioke, C. Effect of clay on the compressive strength of concrete / C. Chijioke, E. U. Chukwudi // Nnamdi Azikiwe University Journal of Civil Engineering (NAUJCVE). – 2023. – Vol. 1, Issue 3. – P. 74–82. – Текст : непосредственный.

146. Cracking and erosion of the rolled clay core of Balderhead dam and the remedial works adopted for its repair / P. P. Vaughan, D. J. Kluth [et al.] // 10-th ICOLD Congress. – 1970. – Q. 36, R. 5. – P. 73–93. – Текст : непосредственный.

147. Dascal, O. Peculiar behaviour of the Manicouagan 3 Dam’s core / O. Dascal // Proc., Int. Conf. Case Histories in Geotechnical Engineering. – 1984. – Vol. II. – Rolla, Mo. : Univ. of Missouri-Rolla. – P. 561–567. – Текст : непосредственный.

148. Design and performance of the Quxue asphalt-core rockfill dam / S. Feng, W. Wang, W. Hu [и др.] // Soils and Foundations. – 2020. – Vol. 60. – P. 1036–1049. – Текст : непосредственный.

149. Dynamic Earthquake Modeling with GeoStudio / Geo-Slope International Ltd. – June 2017 edition. – Calgary, Alberta, Canada : Geo-Slope International Ltd., 2017. – Текст : непосредственный.

150. Effects of a clay additive on the properties of no-slump concrete / H. Budelmann, K. Hariri, H.-W. Krauss, T. Malonn // Advances in Construction Materials. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2007. – P. 731–739. ISBN 978-3-540-72447-6. – Текст : непосредственный.

151. Feizi-Khankandi, S. Cyclic triaxial tests on asphalt concrete as a water barrier for embankment dams / S. Feizi-Khankandi [et al.] // Soils and Foundations. – 2008. – Vol. 48, No. 3. – P. 319–332. – DOI 10.3208/sandf.48.319. – Текст : непосредственный.

152. Hansen, K. D. Soil-Cement for Embankment Dams / K. D. Hansen. – Paris : International Commission on Large Dams, 1986. – (ICOLD Bulletin ; 54). – URL: https://damsafety.org/content/soil-cement-embankment-dams (дата обращения: 26.03.2026). – Текст : электронный.

153. Hellgren, R. Book on Dams – The Swedish Experience / R. Hellgren, M. Bartsch. – ICOLD’s 91st annual, 2023. – 218 p. – Текст : непосредственный.

154. Huang, R.-Y. Optimizing construction sequences for secant pile walls / R.-Y. Huang, P.-F. Chen, J.-H. Chen // 2015 10th International Joint Conference on Software Technologies (ICSOFT). – Colmar, France, 2015. – P. 145–150. – DOI 10.5220/0005553201450150. – Текст : непосредственный.

155. Impervious wall in the foundation pit of the Lower Kama HPP / A. D. Buntman, V. B. Kheifets, D. G. Shreider, M. F. Khasin // Gidrotekhnicheskoe stroitel’stvo. – ISSN 0016-9714. – 1973. – No. 7. – P. 12–15. – Текст : непосредственный.

156. Ishibashi, I. Unified Dynamic Shear Moduli and Damping Ratios of Sand and Clay / I. Ishibashi, X. Zhang // Soils and Foundations. – 1993. – Vol. 33, No. 1. – P. 182–191. – DOI 10.3208/sandf1972.33.182. – Текст : непосредственный.

157. Kramer, S. L. Geotechnical Earthquake Engineering / S. L. Kramer, J. P. Stewart. – 2nd ed. – Boca Raton : CRC Press, 2024. – 1060 p. – DOI: 10.1201/9781003512011. – Текст : электронный.

158. Lyapichev, Yu. Safety problem of the Boguchansk rockfill dam with asphaltic concrete core / Yu. Lyapichev // Presentation on Q. 84. 22-nd International Congress on Large Dams. – Vol. 5. – Paris : ICOLD Publ., 2006. – P. 125–137. – Текст : непосредственный.

159. Manicouagan 3 / O. Dascal, M. Smith [et al.] // 10-th ICOLD Congress. – 1970. – Q. 37, R. 34. – P. 607–630. – Текст : непосредственный.

160. Mirghasemi, A. A. The world's largest cutoff wall at Karkheh dam / A. A. Mirghasemi, M. Pakzad, B. Shadravan // Hydropower & Dams. – 2005. – Issue 2. – P. 2–6. – Текст : непосредственный.

161. Mousavi, S. S. Clay as a Sustainable Binder for Concrete—A Review / S. S. Mousavi, C. Bhojaraju, C. Ouellet-Plamondon // Construction Materials. – 2021. – Vol. 1. – P. 134–168. DOI 10.3390/constrmater1030010. – Текст : непосредственный.

162. Noguera, G. Diaphragm cut off wall for Colbun main dam / G. Noguera // 15-th ICOLD Congress. – 1985. – Q. 58, R. 63. – P. 1049–1060. – Текст : непосредственный.

163. Orishchuk, R. N. Clay-cement-concrete diaphragm – justifying calculation for new-built constructions / R. N. Orishchuk // Magazine of Civil Engineering. – 2019. – Vol. 89, No. 5. – P. 16–25. – DOI 10.18720/MCE.89.2. – Текст : непосредственный.

164. Sainov, M. P. Asphalt Concrete Cores of Embankment Dams: a Review / M. P. Sainov, Yu. A. Poslykhalin // AlfaBuild. – 2021. – Vol. 18. – Article No. 1801. – DOI: 10.34910/ALF.18.1. – URL:

https://alfabuild.spbstu.ru/userfiles/files/AlfaBuild/AlfaBuild_2021_18/1801.pdf (дата обращения: 26.03.2026). – Текст : электронный.

165. Sivakumar Babu, G. L. Analysis of stability of earthen dams in Kachchh region, Gujarat, India / G. L. Sivakumar Babu, A. Srivastava, V. Sahana // Engineering Geology. – 2007. – Vol. 94, No. 3–4. – P. 123–136. – DOI: 10.1016/j.enggeo.2007.05.007. – Текст : электронный.
166. SODIS M. Мониторинг конструкций и технического состояния зданий в режиме реального времени // СОДИС Лаб. – URL: https://www.sodislab.com/ru/sodisbuilding_shm (дата обращения: 26.03.2026). – Текст : электронный.
167. Solsky, S. Model of crack self-healing in clay-cement concrete diaphragm of embankment dam / S. Solsky, R. Orischuk, N. Orlova // Budowle piętrzące eksploatacja i monitoring / Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Państwowy Instytut Badawczy. – Warszawa, 2017. – P. 341–349. – Текст : непосредственный
168. Steffen, H. Bituminous cores for earth and rockfill dams / H. Steffen. – Paris : International Commission on Large Dams, 1982. – (ICOLD Bulletin ; 42). – URL: https://damsafety.org/content/bituminous-cores-earth-and-rockfill-dams (дата обращения: 26.03.2026). – Текст : электронный.
169. Stress deformation analysis of plastic concrete cut-off wall for the first stage cofferdam of Shawan hydropower station / H. Xiong [et al.] // Journal of Hydroelectric Engineering. – 2010. – Vol. 2. – P. 35. – Текст : непосредственный.
170. Strobl, T. Wadi Hawashinah dam. Oman. Ground Water recharge dam to stop salt water intrusion / T. Strobl, R. Shmid // Strabag. Dam engineering in Kenya, Nigeria, Oman and Turkey. – Cologne, 1997. – No. 52. – P. 67–68. – Текст : непосредственный.
171. Study and application of a new type of cement paste / W. Zhao [et al.] // Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research. – 2008. – Vol. 1. – P. 13. – Текст : непосредственный.
172. Tolstikov, V. Stress-strain state of earth dams with a clay cement-concrete diaphragm / V. Tolstikov, A. Gogin // IOP Conference Series: Materials Science and

Engineering. – 2018. – Vol. 365. – Article ID 042074. – 9 p. – URL: https://www.researchgate.net/publication/325714270_Stress-strain_state_of_earth_dams_with_a_clay_cement-concrete_diaphragm (дата обращения: 26.03.2026). – DOI:10.1088/1757-899X/365/4/042074. – Текст : электронный.

173. Ulaby, F. T. Microwave Remote Sensing. Active and Passive. Vol. 3. From Theory to Applications / F. T. Ulaby, R. K. Moore, A. K. Fung. – 1986. – P. 1065–2162. – ISBN 0 89006 192 0. – Текст : непосредственный.

174. Vernon-Harcourt, L. V. Sanitary Engineering with respect to water-supply and sewage disposal / L. V. Vernon-Harcourt. – New York : Longmans, Green, and Co, 1907. – 419 p. – Текст : непосредственный.

175. Wooten, R. Lee, Spangenberg, Peter L., Salomaa, William C., Misslin, Michael. The Williamsburg Reservoir Dam Failure of 1874 // Association of State Dam Safety Officials (ASDSO) Annual Conference. – 2014. – URL: https://damfailures.org/sites/default/files/wp-pdf/OR_Wooten_WilliamsburgReservoir.pdf (дата обращения: 26.03.2026). – Текст : электронный.

176. Zheng, S. Stress-deformation Analysis of Plastic Concrete Diaphragm Wall in Dam Foundation Earth-rockfill Dam / S. Zheng, C. Yaolong, L. Shouyi // Water Power. – 2008. – Vol. 2. – P. 14. – Текст : непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А.

Графические материалы по результатам расчетных исследований грунтовой плотины с ГЦБД из БСС

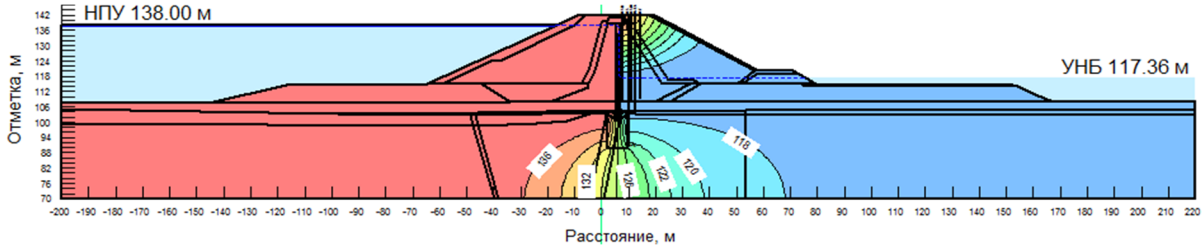


Рисунок А.1 – Расчетное положение депрессионной поверхности и линий равных отметок пьезометрических уровней в теле плотины в створе 2, первый основной расчетный случай

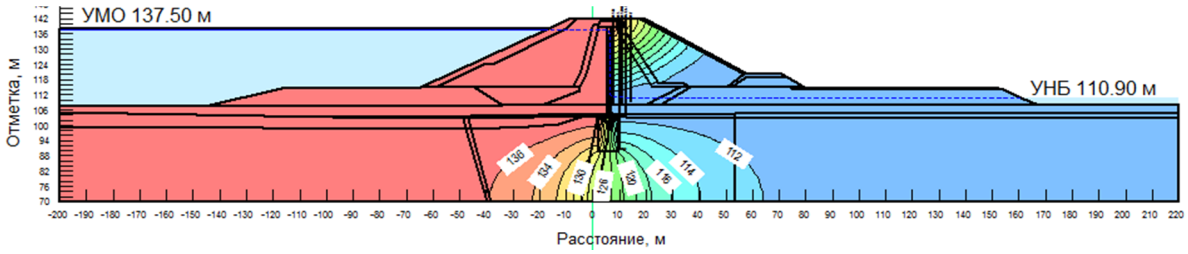


Рисунок А.2 – Расчетное положение депрессионной поверхности и линий равных отметок пьезометрических уровней в теле плотины в створе 2, второй основной расчетный случай

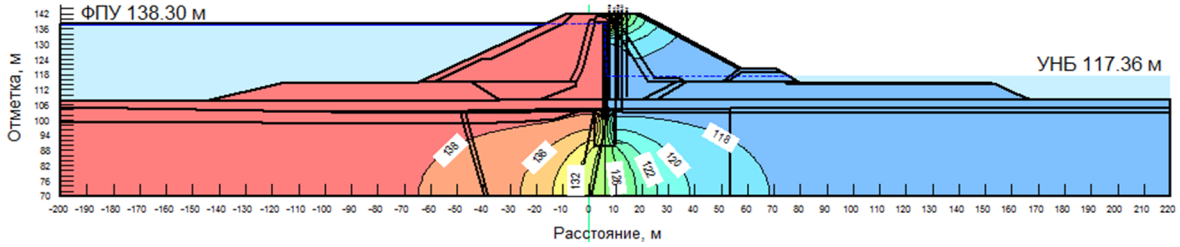


Рисунок А.3 – Расчетное положение депрессионной поверхности и линий равных отметок пьезометрических уровней в теле плотины в створе 2, первый особый расчетный случай

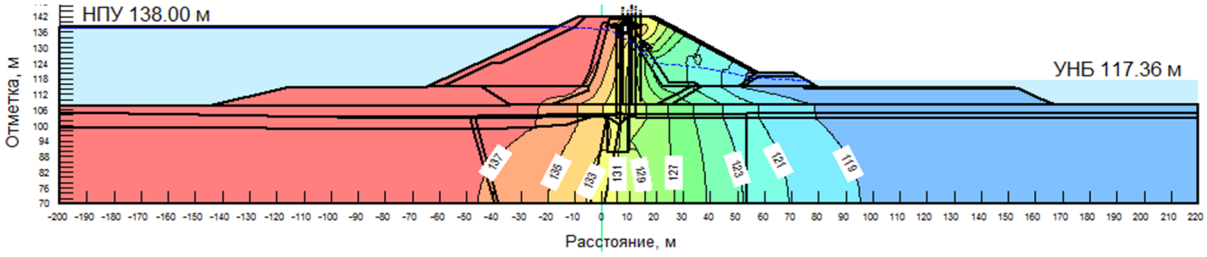


Рисунок А.4 – Расчетное положение депрессионной поверхности и линий равных отметок пьезометрических уровней в теле плотины в створе 2, второй особый расчетный случай

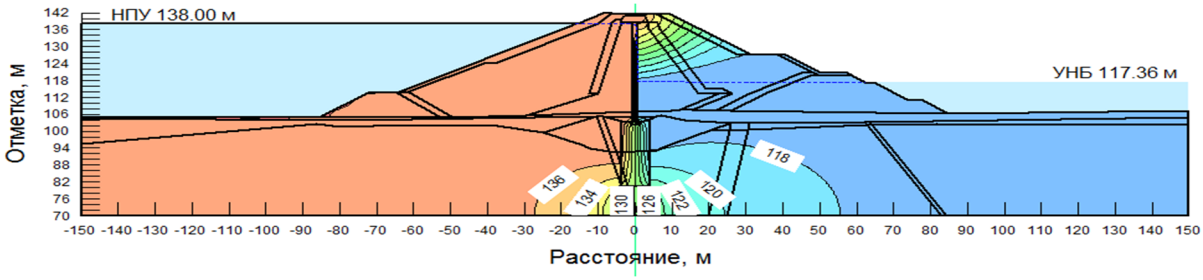


Рисунок А.5 – Расчетное положение депрессионной поверхности и линий равных отметок пьезометрических уровней в теле плотины в створе 3, первый основной расчетный случай

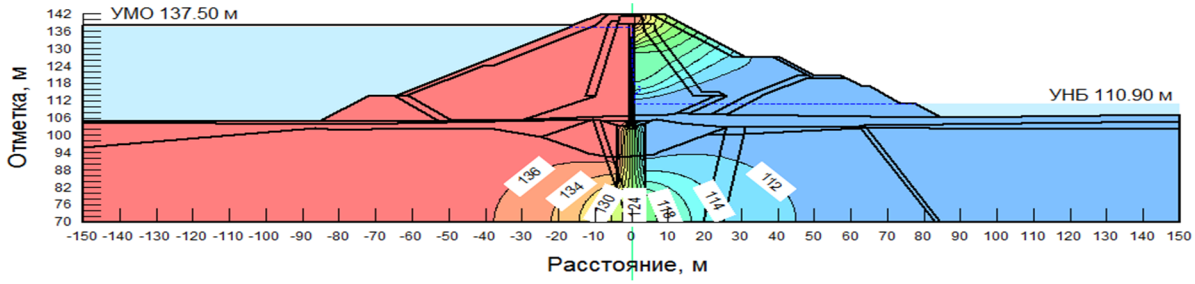


Рисунок А.6 – Расчетное положение депрессионной поверхности и линий равных отметок пьезометрических уровней в теле плотины в створе 3, второй основной расчетный случай

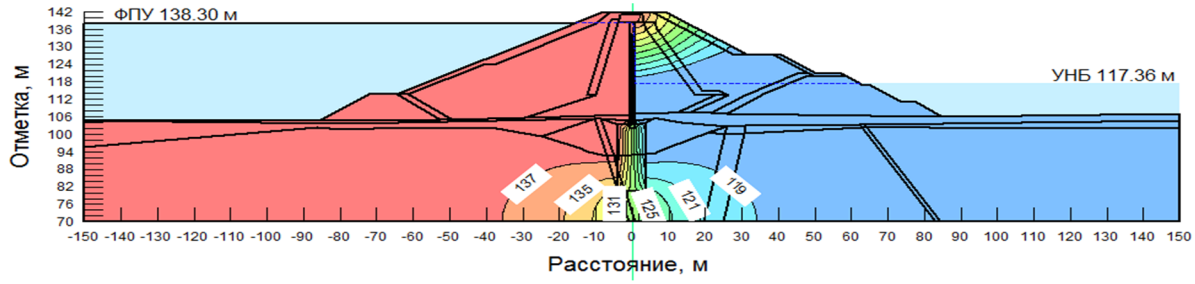


Рисунок А.7 – Расчетное положение депрессионной поверхности и линий равных отметок пьезометрических уровней в теле плотины в створе 3, первый особый расчетный случай

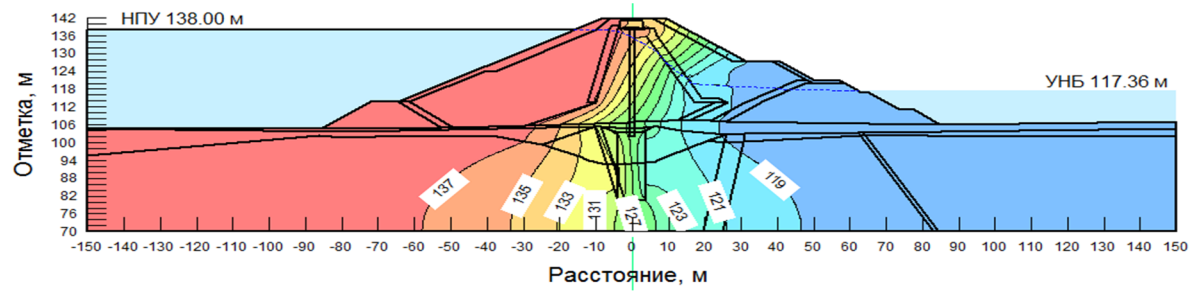


Рисунок А.8 – Расчетное положение депрессионной поверхности и линий равных отметок пьезометрических уровней в теле плотины в створе 3, второй особый расчетный случай

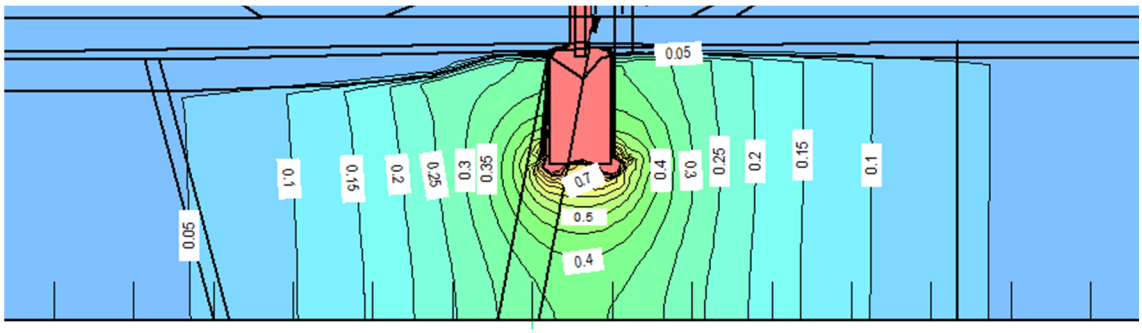


Рисунок А.9 – Картины распределения расчетных градиентов напора в основании плотины в створе 2, первый основной расчетный случай

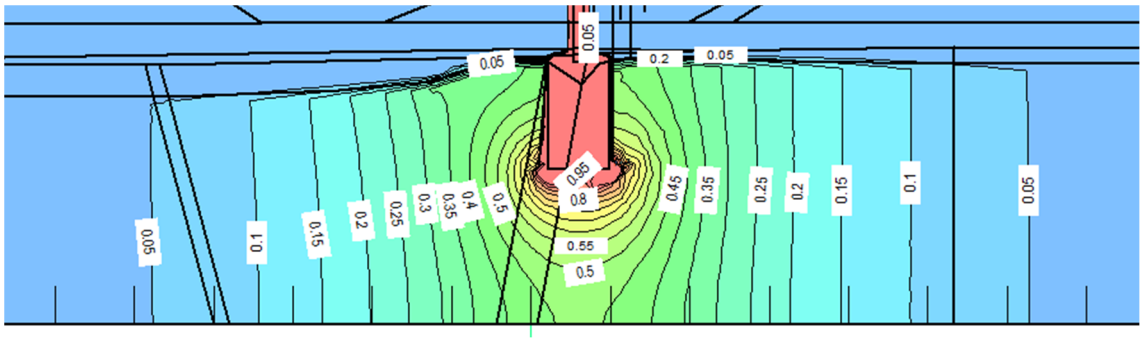


Рисунок А.10 – Картины распределения расчетных градиентов напора в основании плотины в створе 2, второй основной расчетный случай

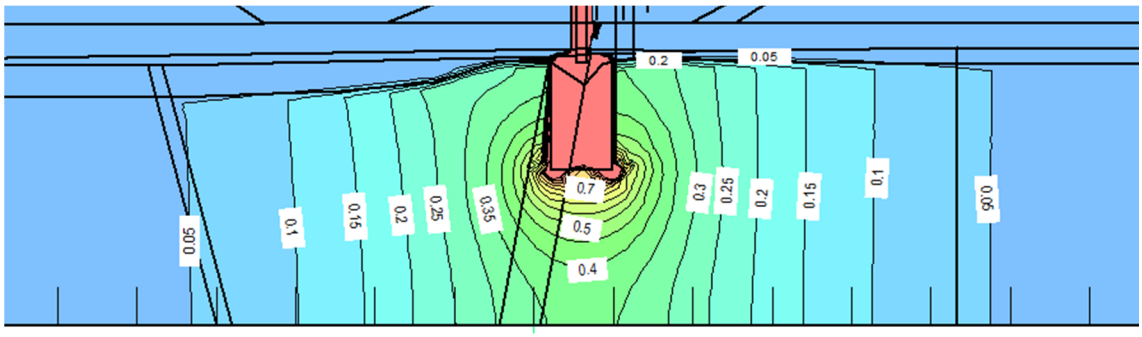


Рисунок А.11 – Картины распределения расчетных градиентов напора в основании плотины в створе 2, первый особый расчетный случай

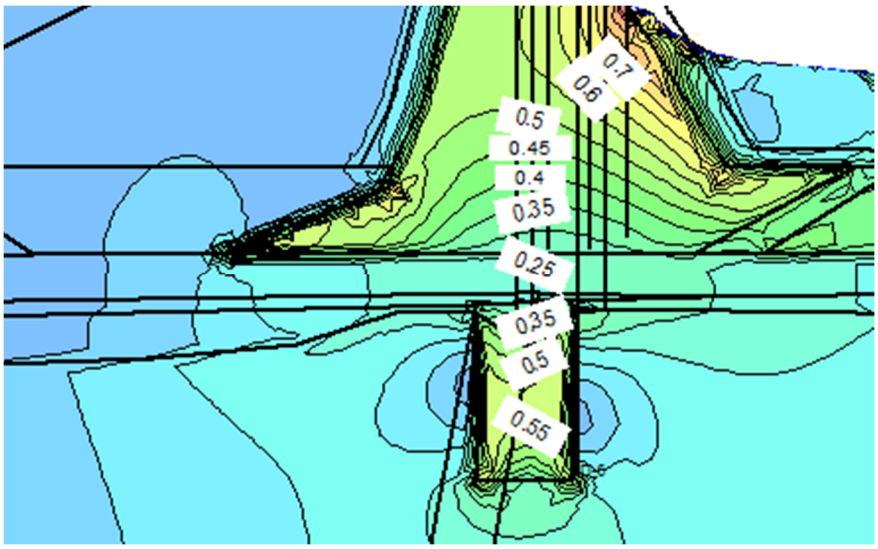


Рисунок А.12 – Картины распределения расчетных градиентов напора в ядре и основании плотины в створе 2, второй особый расчетный случай

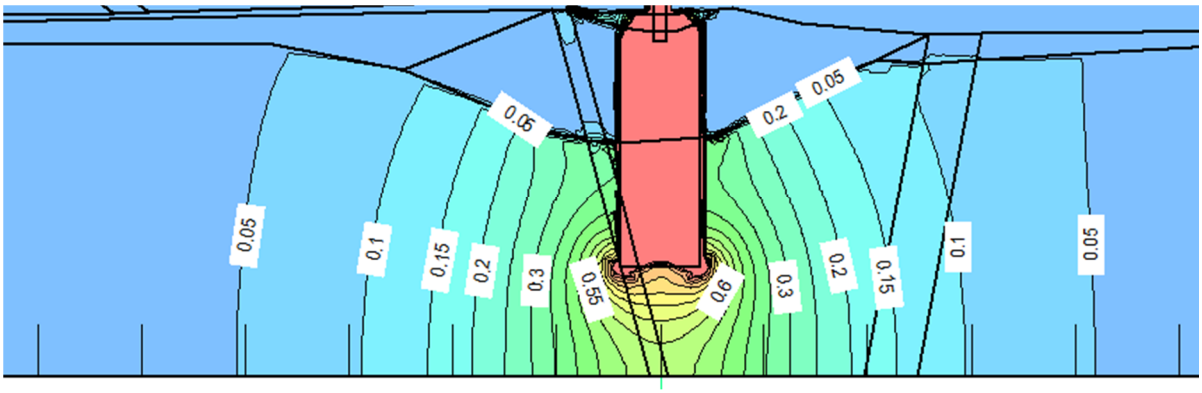


Рисунок А.13 – Картины распределения расчетных градиентов напора в основании плотины в створе 3, первый основной расчетный случай

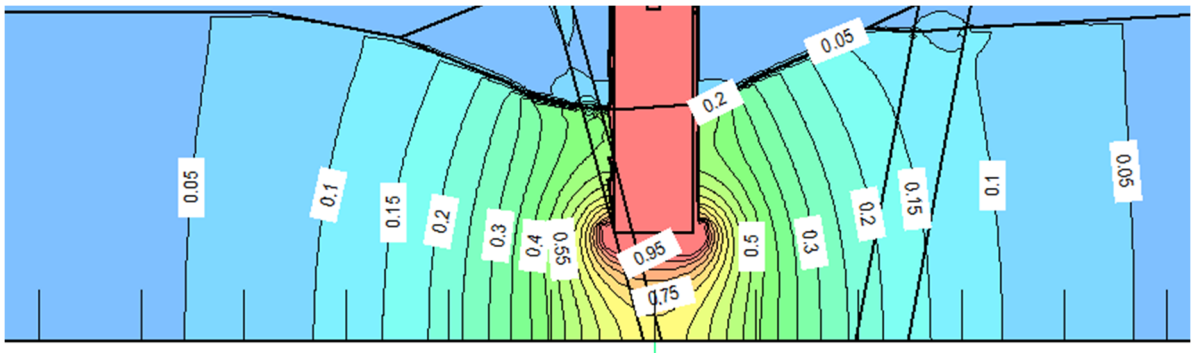


Рисунок А.14 – Картины распределения расчетных градиентов напора в основании плотины в створе 3, второй основной расчетный случай

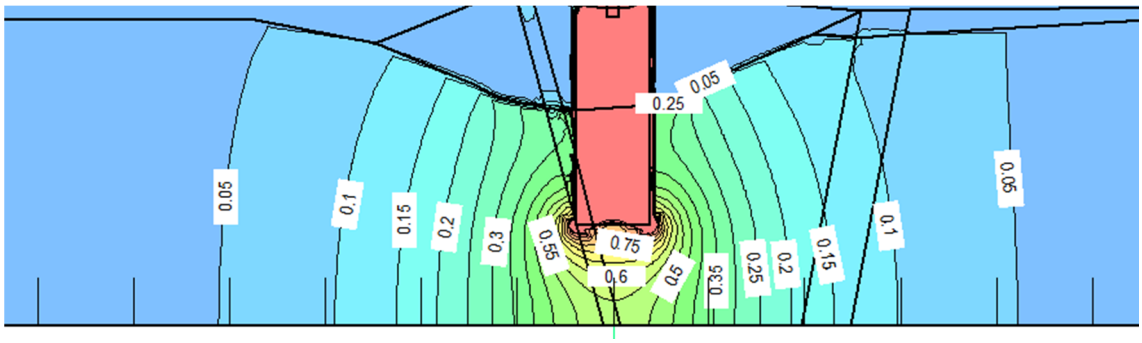


Рисунок А.15 – Картины распределения расчетных градиентов напора в основании плотины в створе 3, первый особый расчетный случай

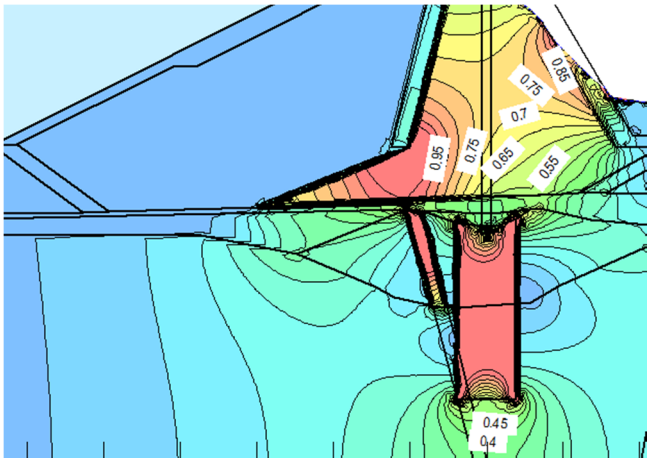


Рисунок А.16 – Картины распределения расчетных градиентов напора в ядре и основании плотины в створе 3, второй особый расчетный случай

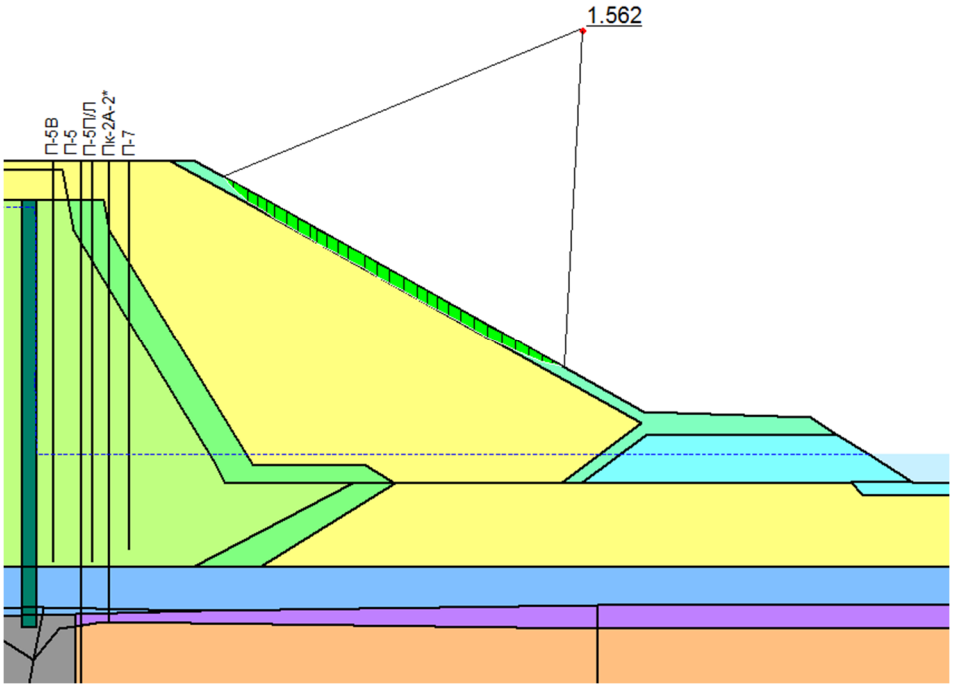


Рисунок А.17 – Поверхность обрушения низового откоса плотины в створе 2, 1-й основной расчетный случай, k_s=1,562

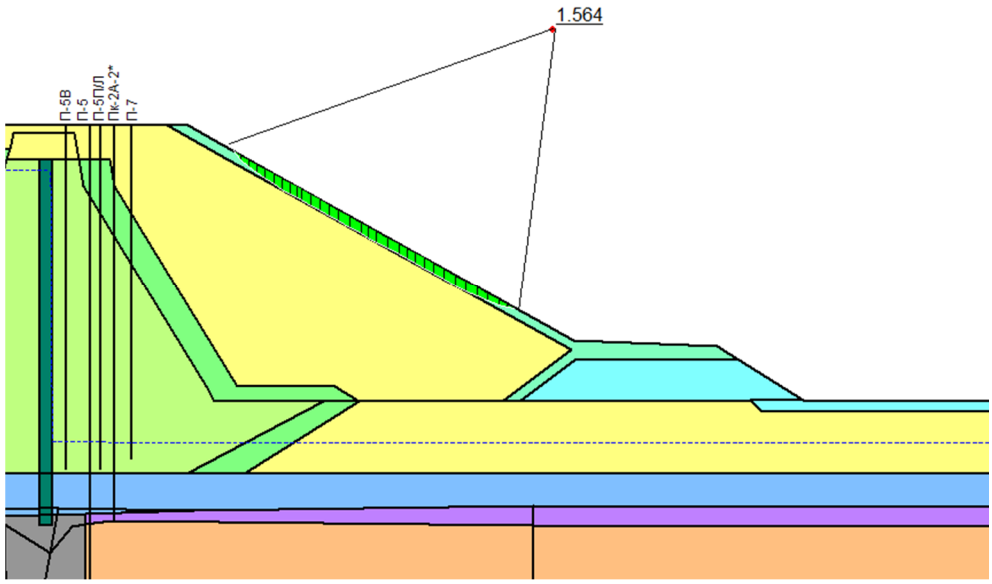


Рисунок А.18 – Поверхность обрушения низового откоса плотины в створе 2, 2-й основной расчетный случай, k_s=1,564

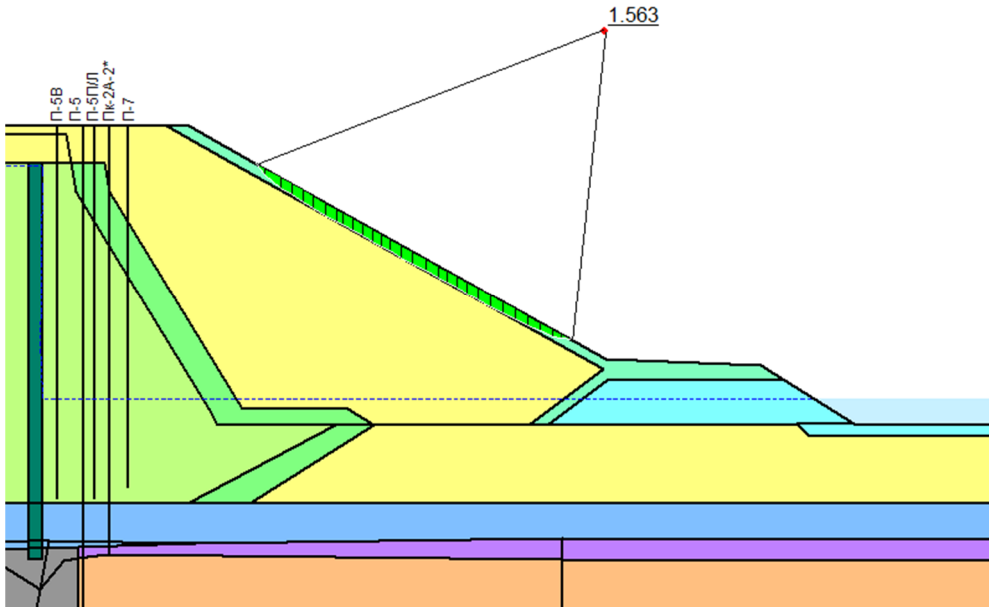


Рисунок А.19 – Поверхность обрушения низового откоса плотины в створе 2, 1-й особый расчетный случай, k_s=1,563

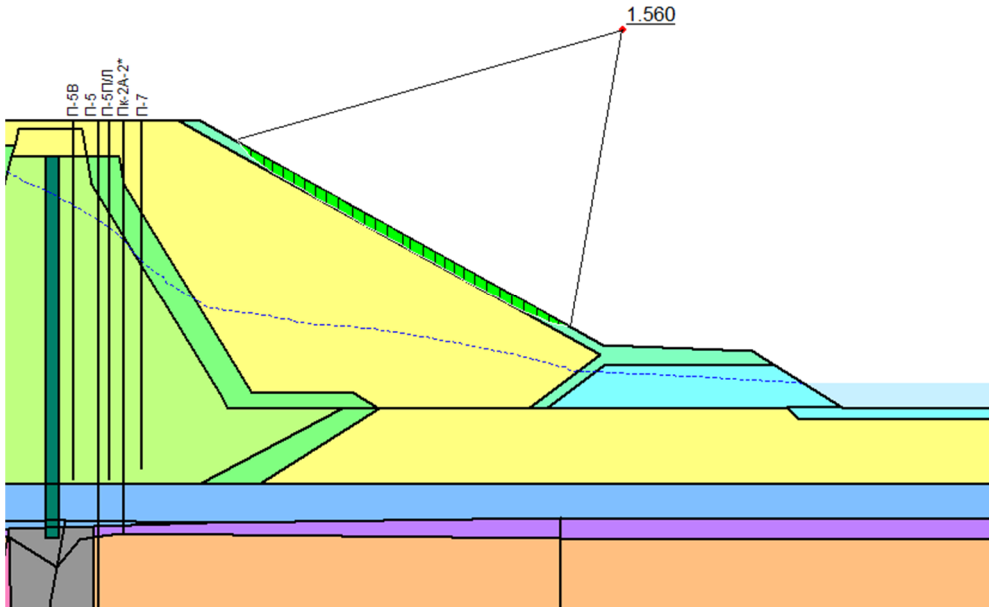


Рисунок А.20 – Поверхность обрушения низового откоса плотины в створе 2, 2-й особый расчетный случай, k_s=1,560

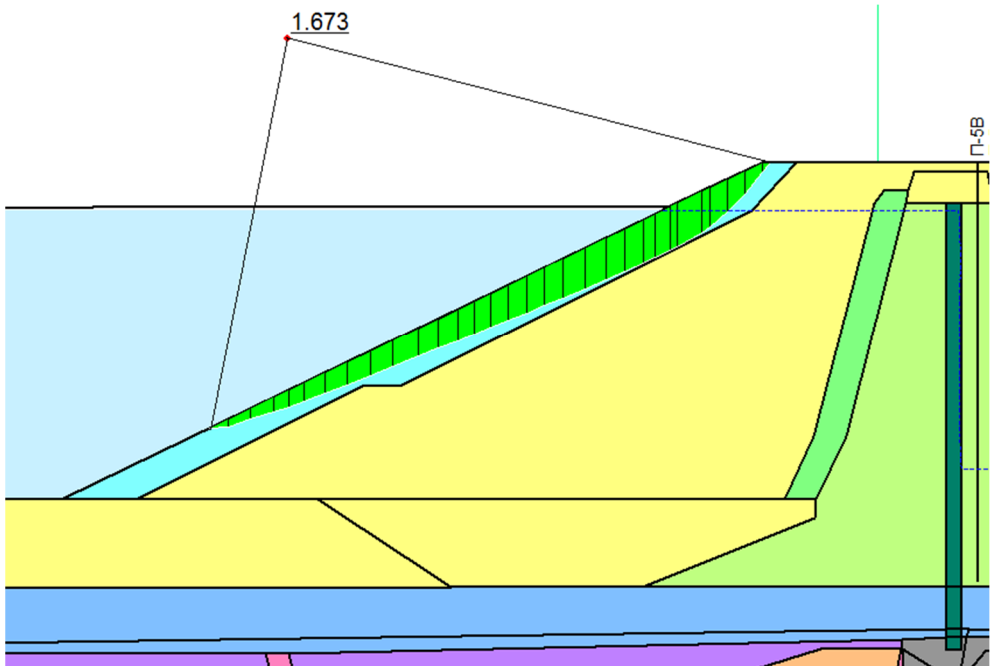


Рисунок А.21 – Поверхность обрушения верхового откоса плотины в створе 2, 1-й основной расчетный случай, k_s =1,673

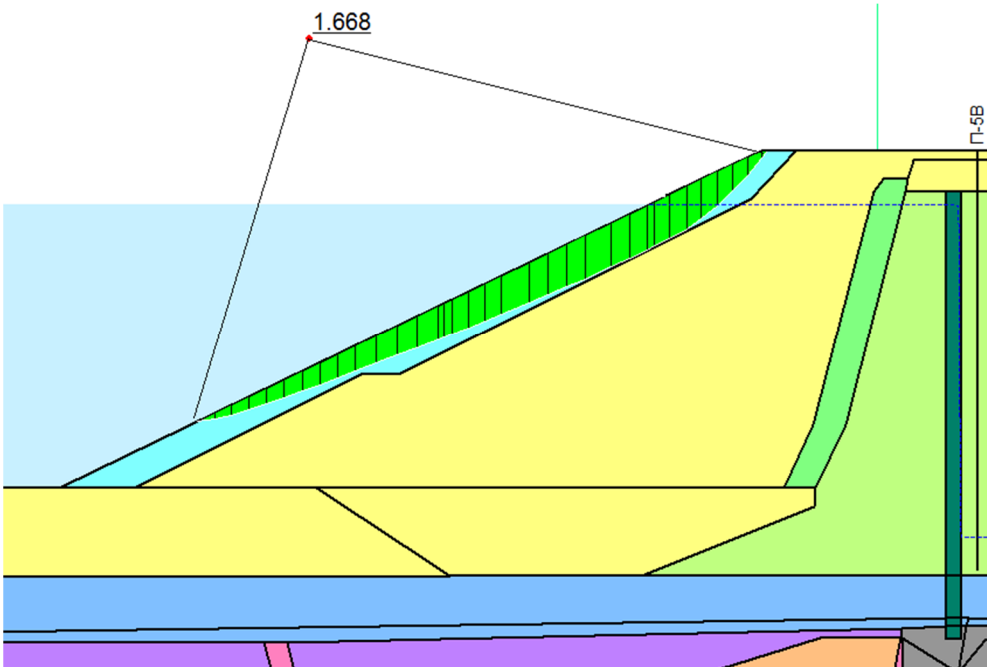


Рисунок А.22 – Поверхность обрушения верхового откоса плотины в створе 2, 2-й основной расчетный случай, k_s =1,668

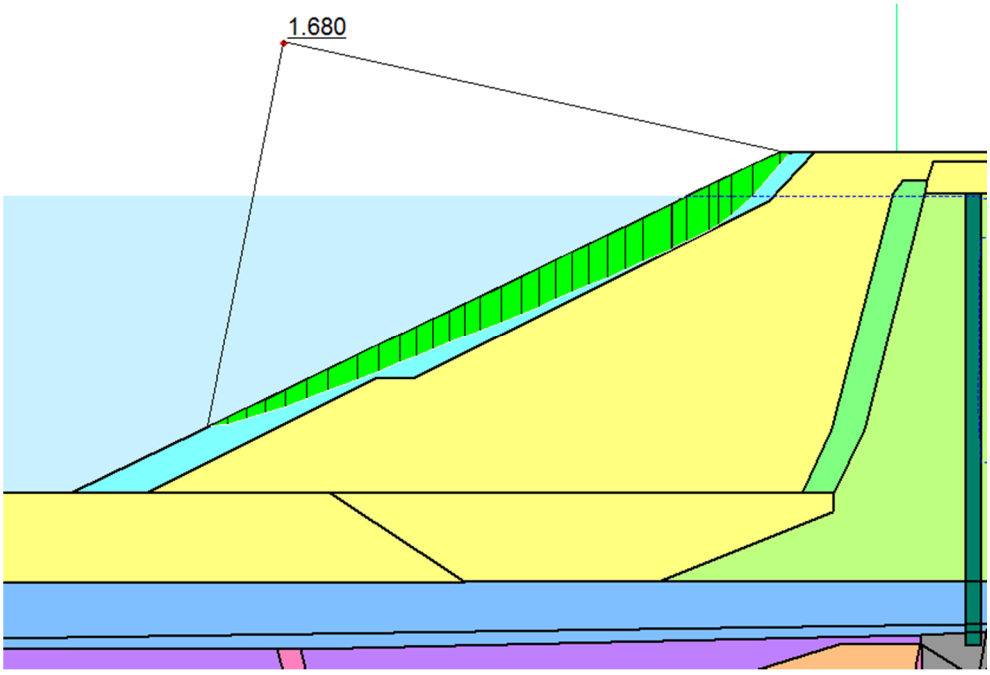


Рисунок А.23 – Поверхность обрушения верхового откоса плотины в створе 2, 1-й особый расчетный случай, k_s =1,680

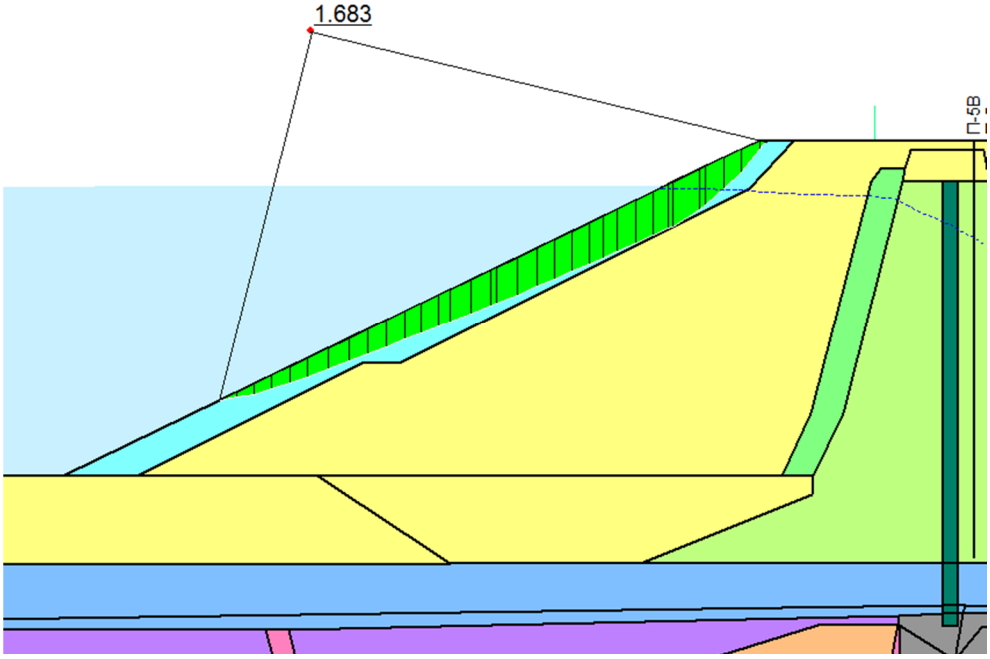
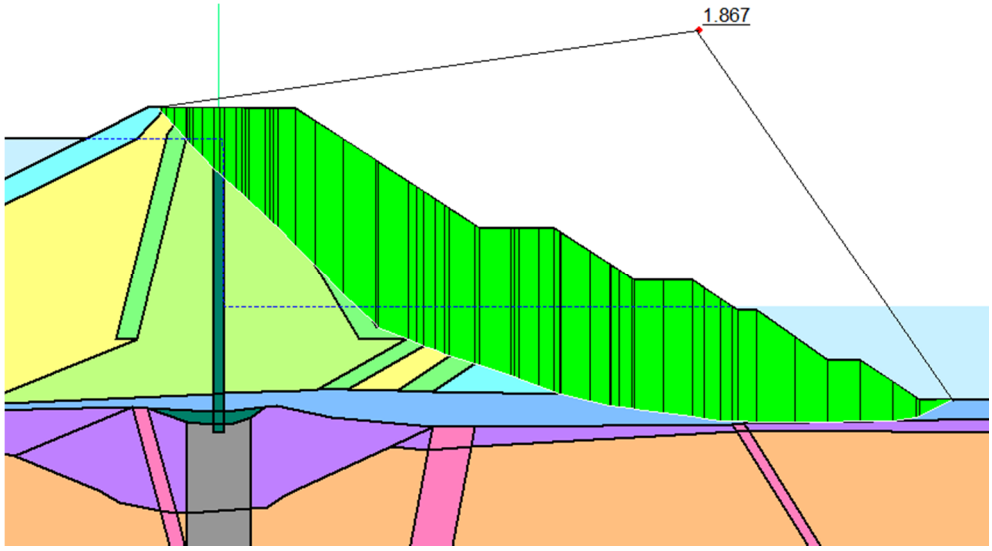


Рисунок А.24 – Поверхность обрушения верхового откоса плотины в створе 2, 2-й особый расчетный случай, k_s =1,683

а)



б)

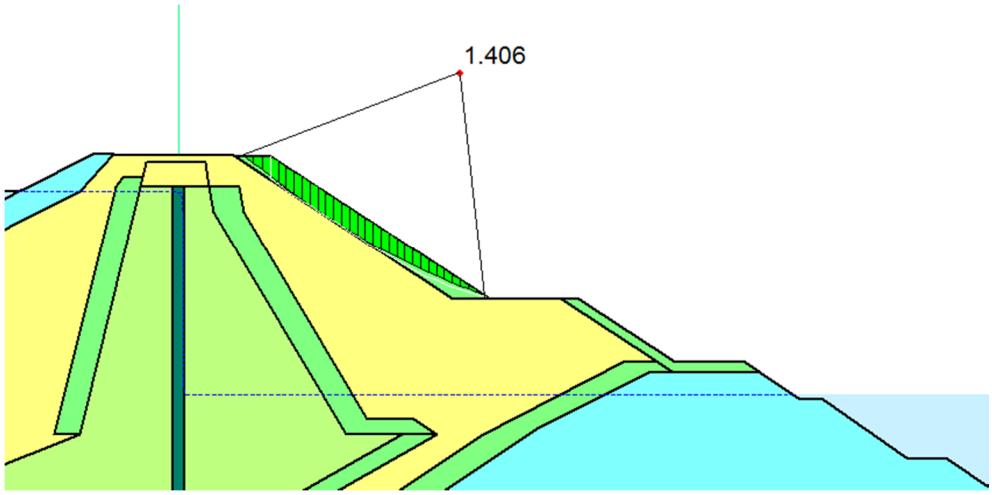
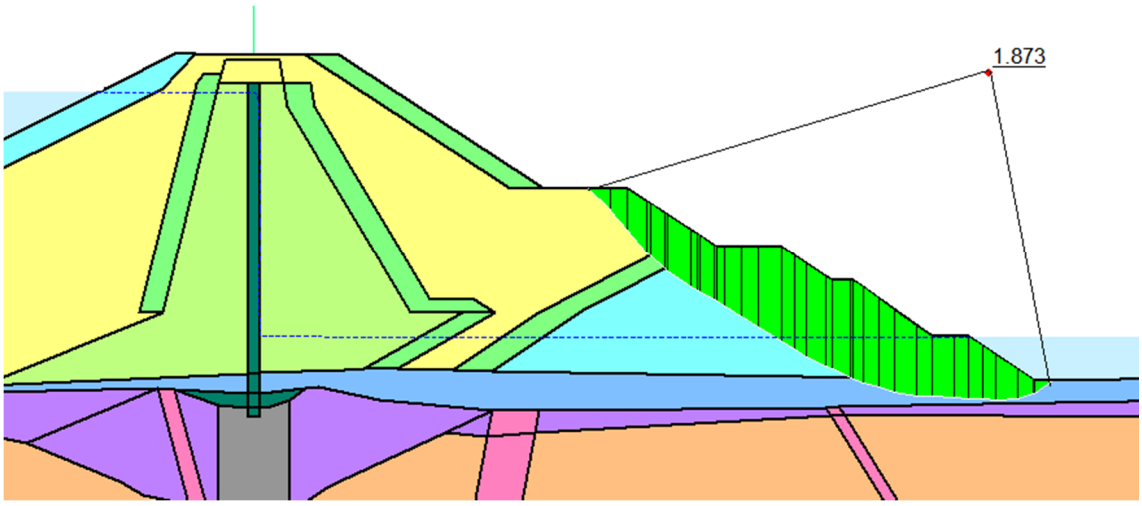


Рисунок А.25 – Поверхность обрушения низового откоса плотины в створе 3, 1-й основной расчетный случай: а) общая устойчивость ks =1,867; б) местная устойчивость ks =1,406

а)



б)

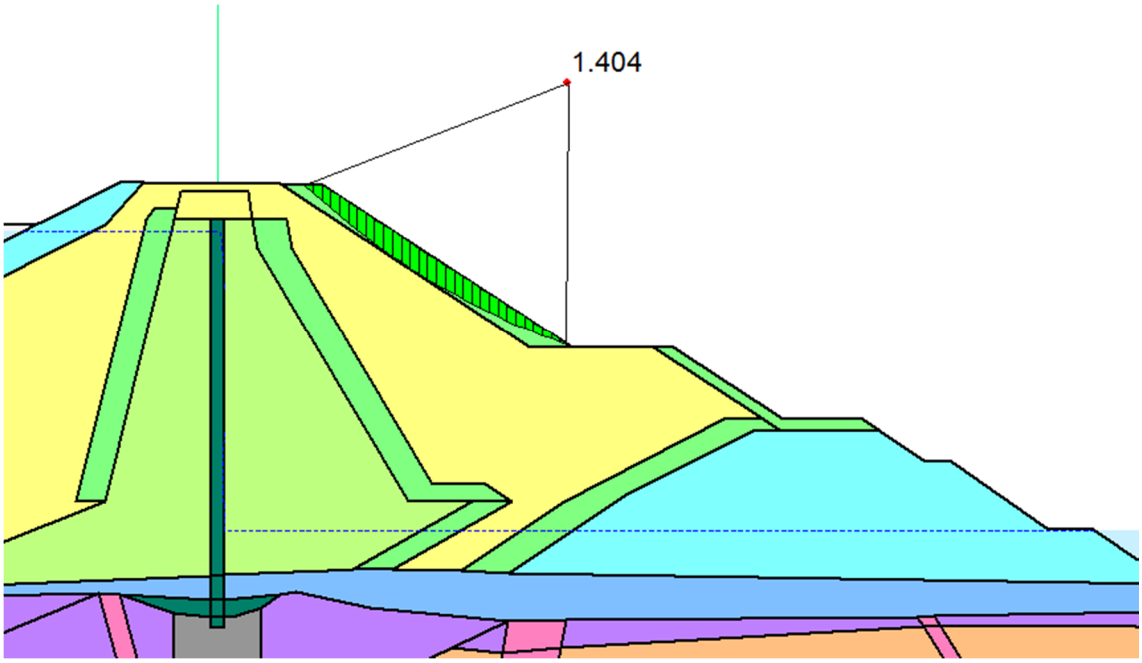
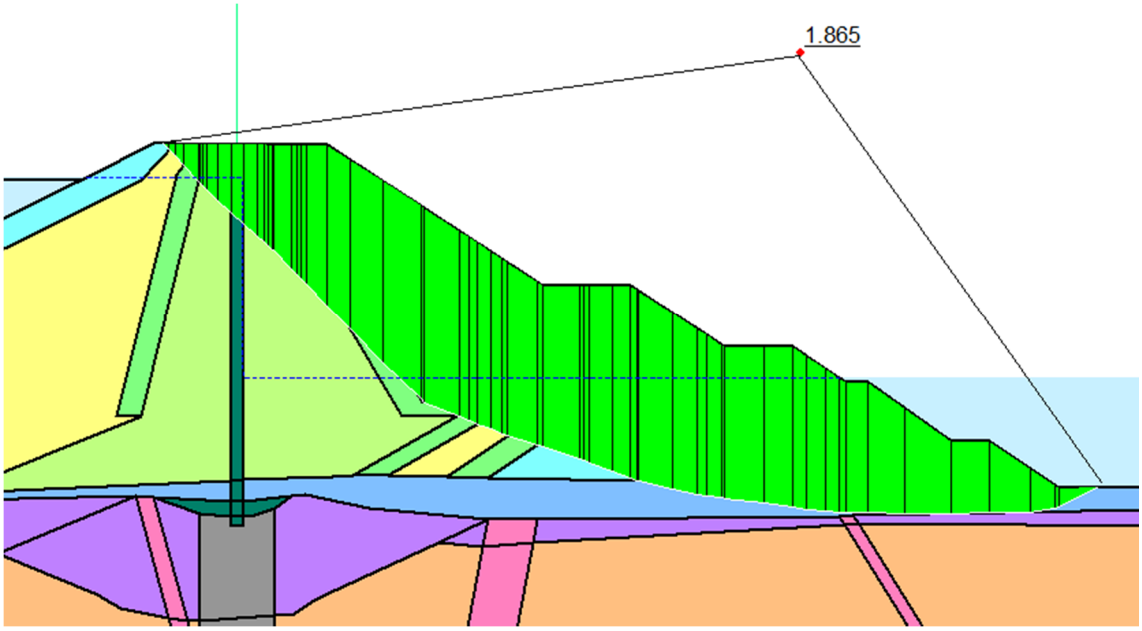


Рисунок А.26 – Поверхность обрушения низового откоса плотины в створе 3, 2-й основной расчетный случай: а) общая устойчивость ks =1,873; б) местная устойчивость ks =1,404

а)



б)

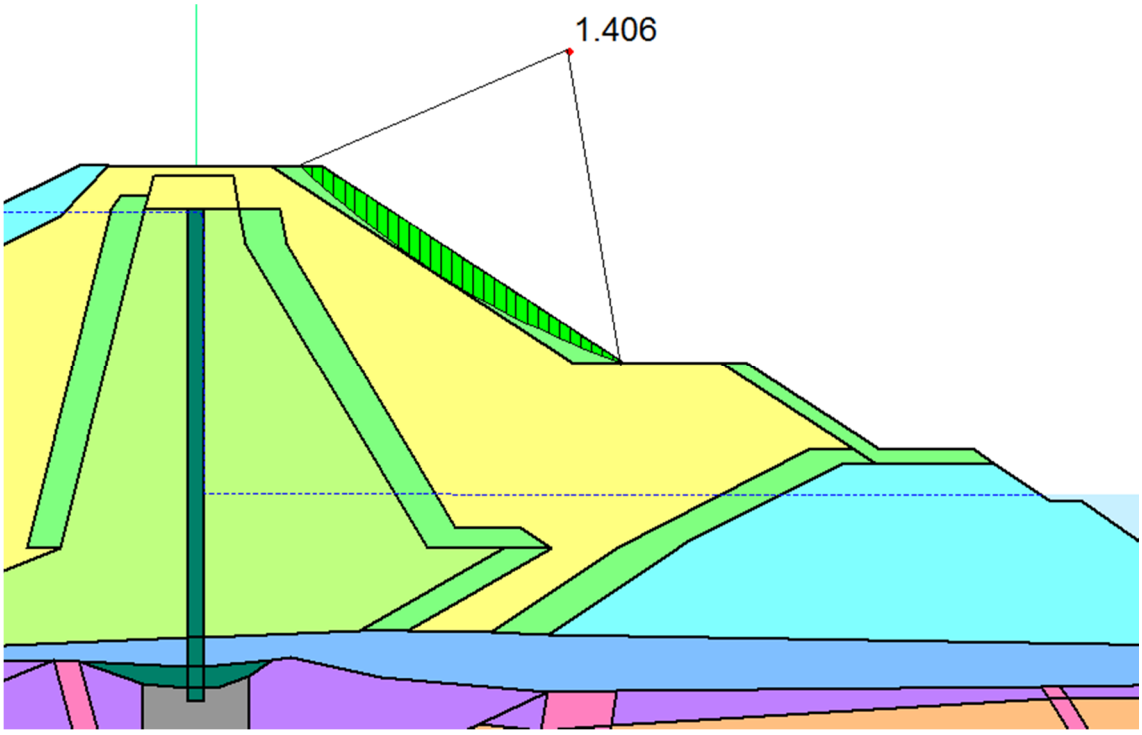
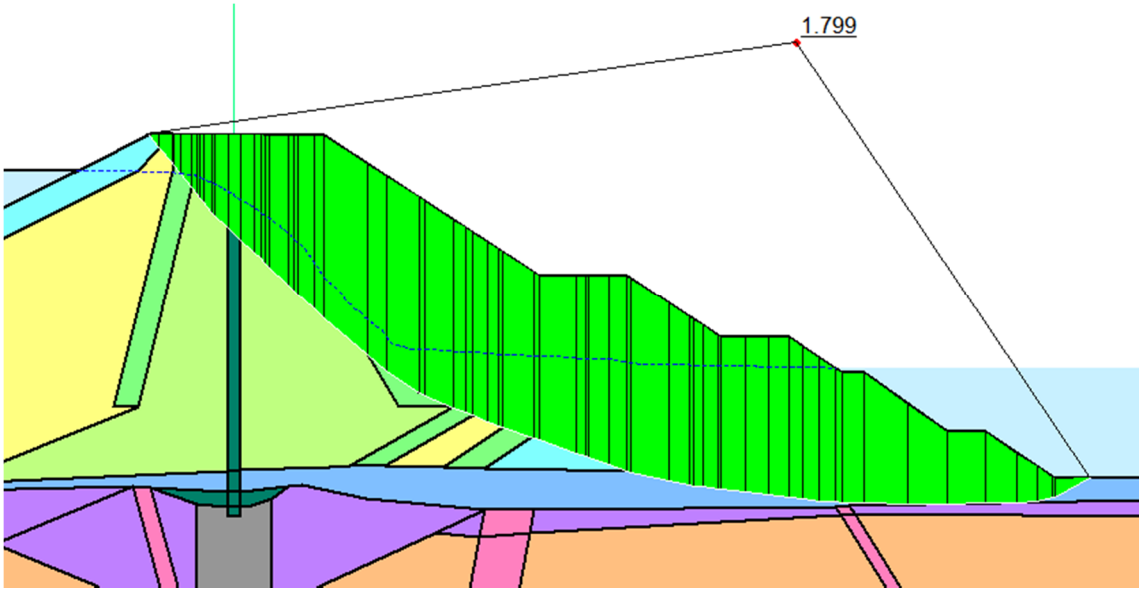


Рисунок А.27 – Поверхность обрушения низового откоса плотины в створе 3, 1-й особый расчетный случай: а) общая устойчивость k_s =1,865; б) местная устойчивость k_s =1,406

а)



б)

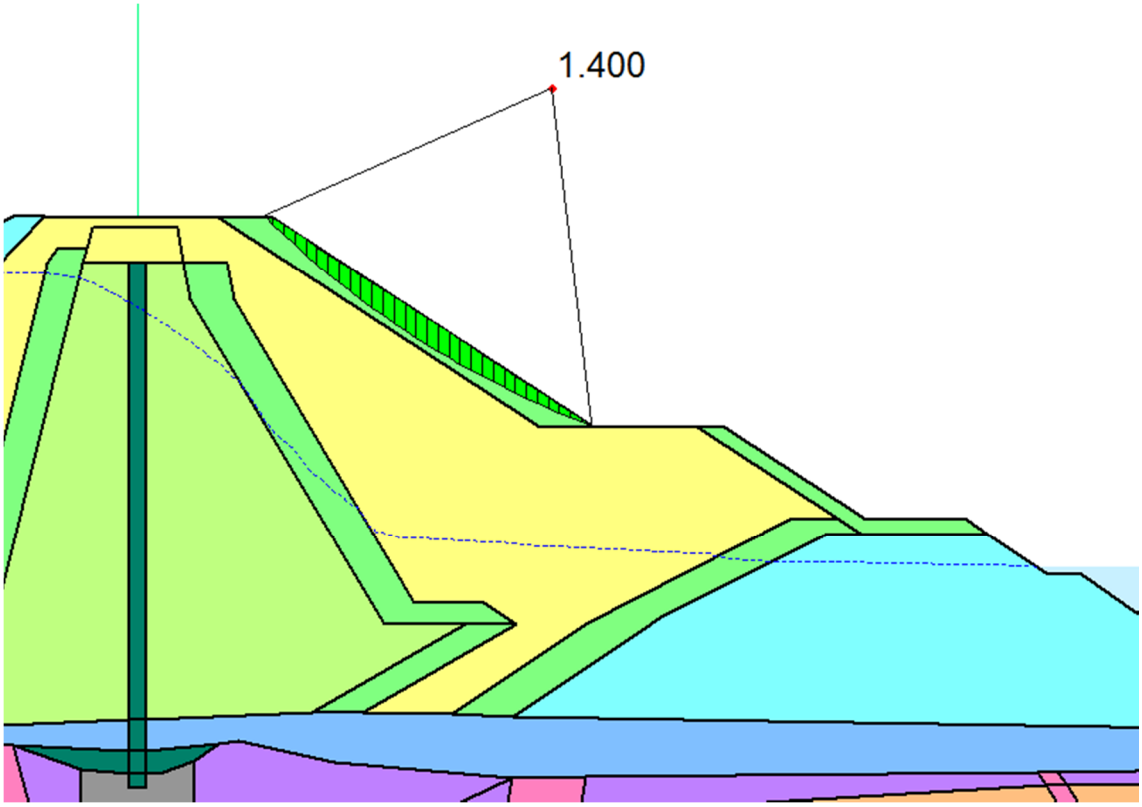


Рисунок А.28 – Поверхность обрушения низового откоса плотины в створе 3, 2-й особый расчетный случай: а) общая устойчивость k_s =1,799; б) местная устойчивость k_s =1,400

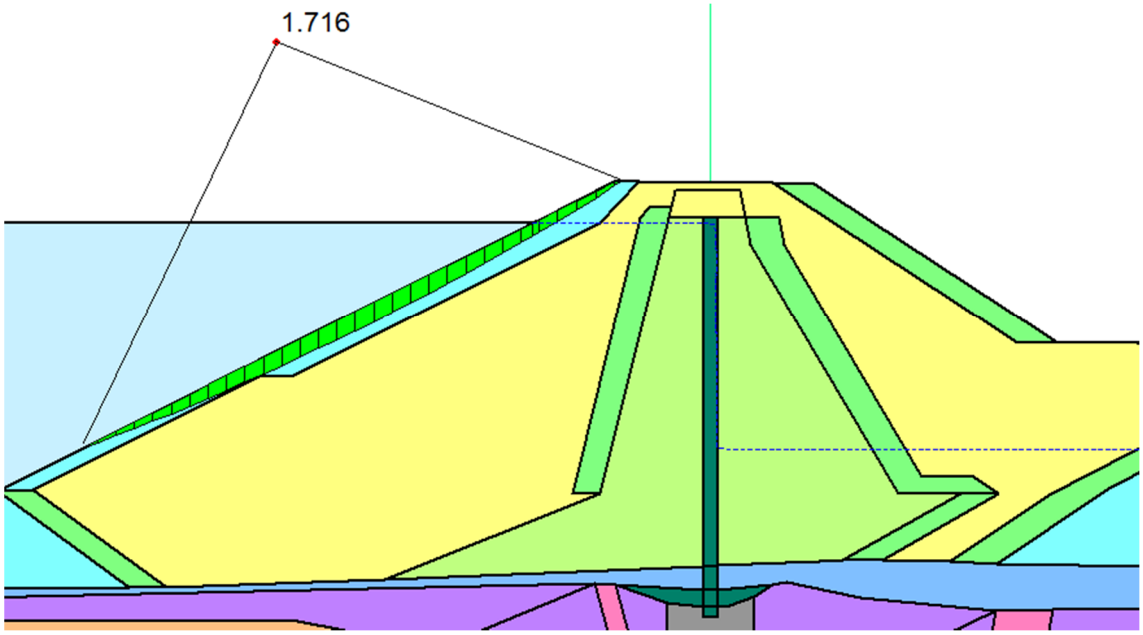


Рисунок А.29 – Поверхность обрушения верхового откоса плотины в створе 3, 1-й основной расчетный случай, k_s =1,716

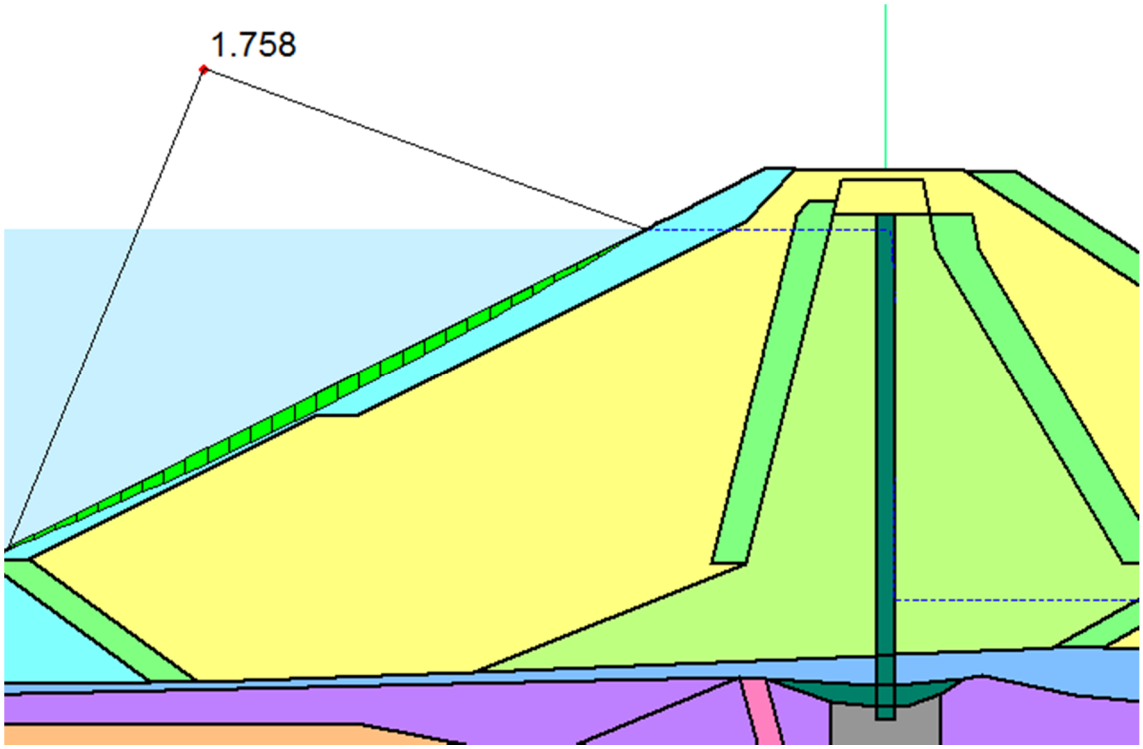


Рисунок А.30 – Поверхность обрушения верхового откоса плотины в створе 3, 2-й основной расчетный случай, k_s =1,758

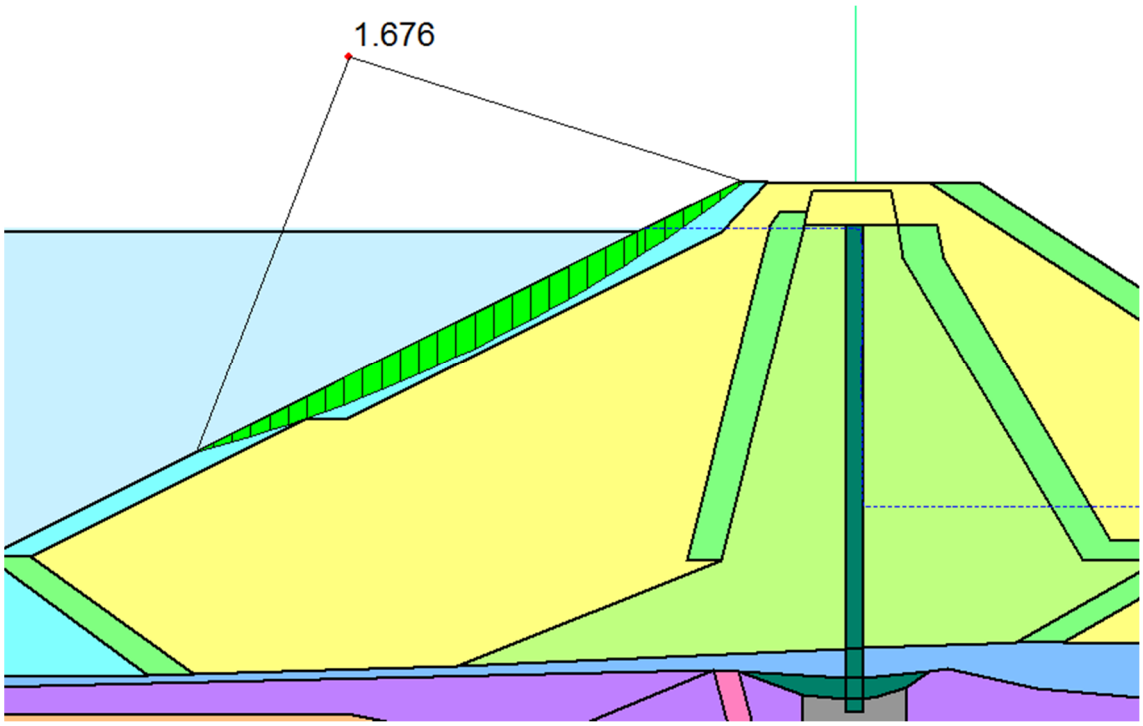


Рисунок А.31 – Поверхность обрушения верхового откоса плотины в створе 3, 1-й особый расчетный случай, k_s =1,676

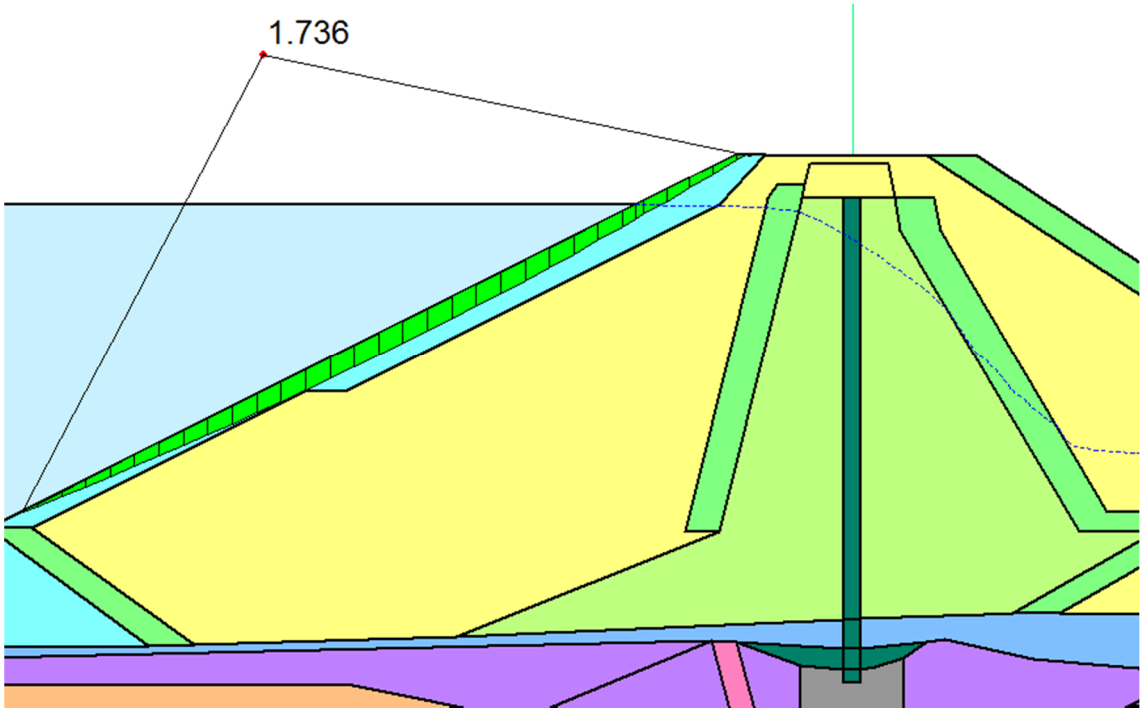


Рисунок А.32 – Поверхность обрушения верхового откоса плотины в створе 3, 2-й особый расчетный случай, k_s=1,736

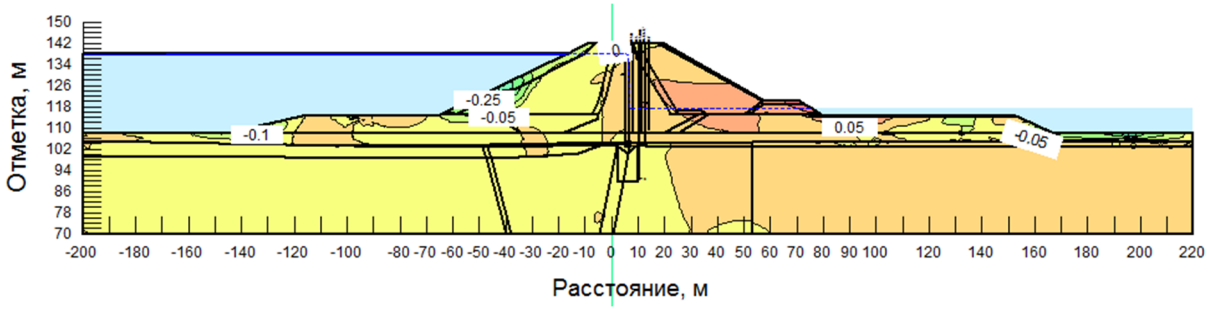


Рисунок А.33 – Картина распределения остаточных горизонтальных смещений тела плотины, вызванных сейсмическим воздействием уровня ПЗ, створ 2



Рисунок А.34 – Картина распределения остаточных вертикальных смещений тела плотины, вызванных сейсмическим воздействием уровня ПЗ, створ 2

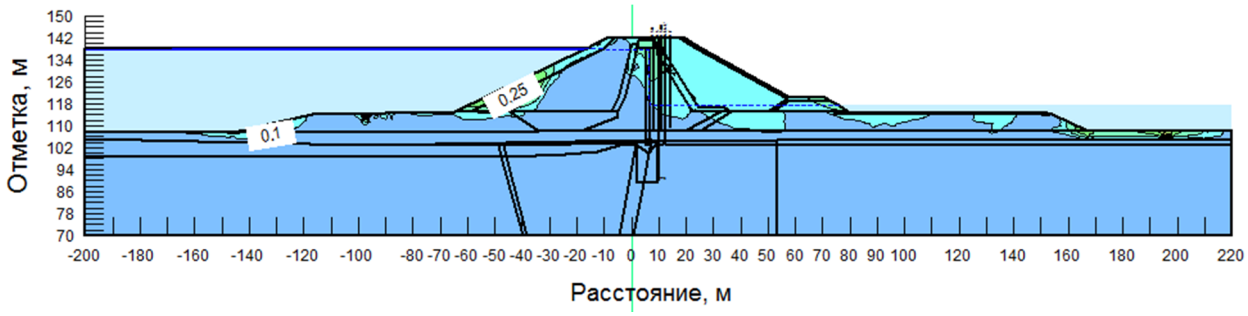
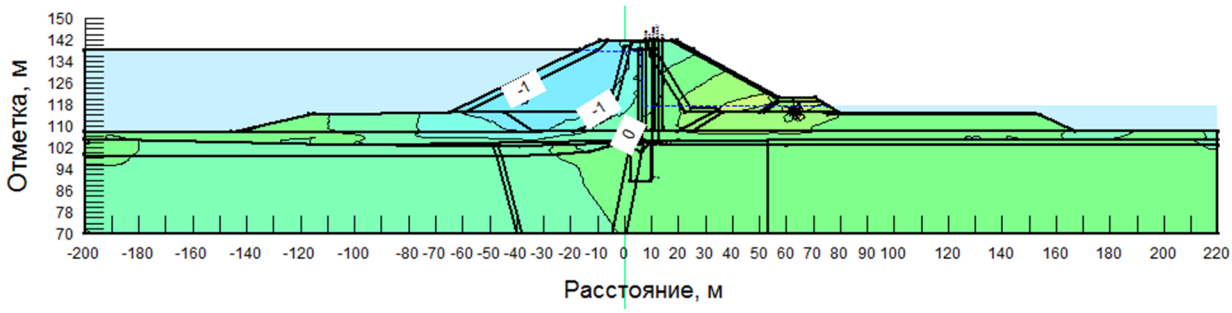


Рисунок А.35 – Картина распределения суммарных остаточных смещений тела плотины, вызванных сейсмическим воздействием уровня ПЗ, створ 2

а)



б)

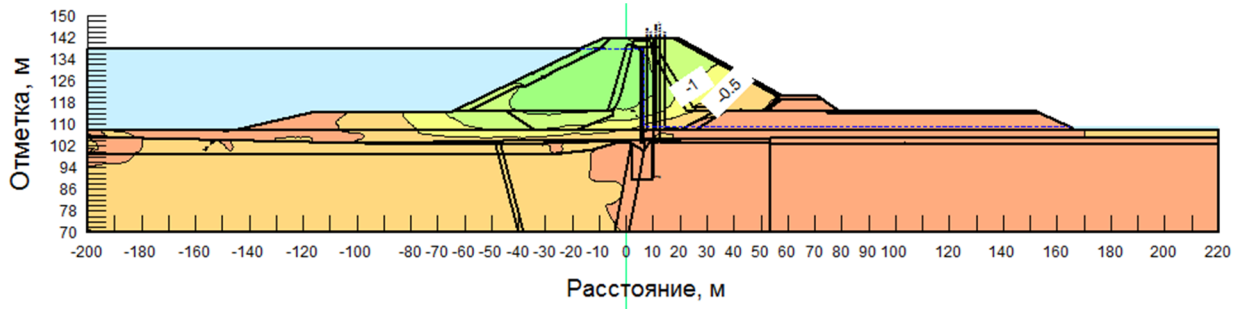
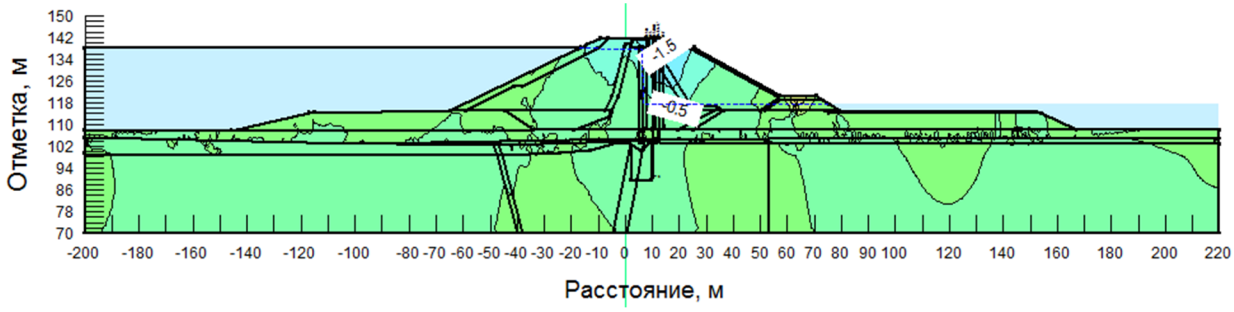


Рисунок А.36 – Картина распределения остаточных горизонтальных смещений тела плотины, вызванных сейсмическим воздействием уровня МРЗ: при максимальной (а) и минимальной (б) отметках УНБ, створ 2

а)



б)

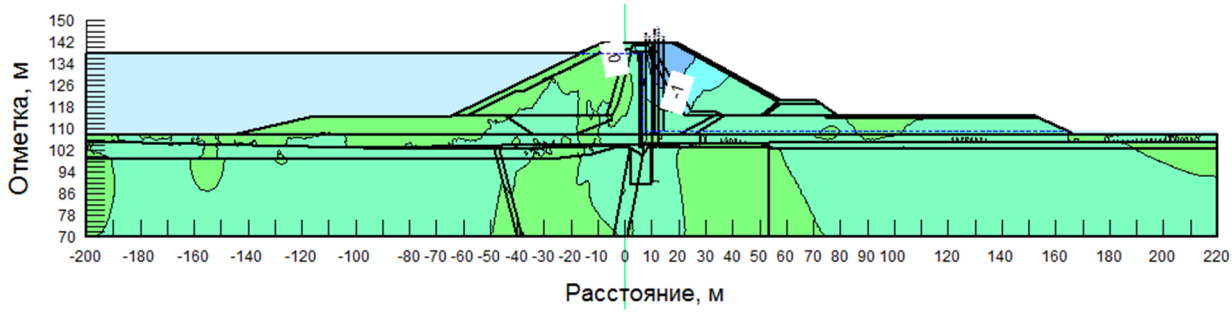
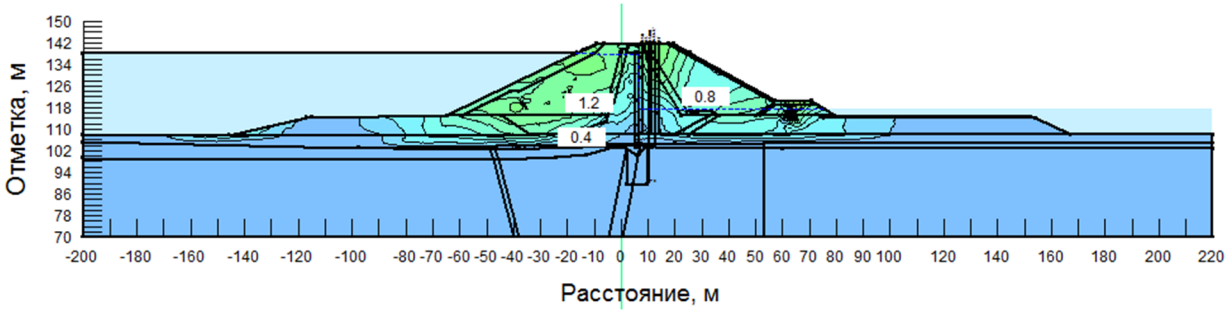


Рисунок А.37 – Картина распределения остаточных вертикальных смещений тела плотины, вызванных сейсмическим воздействием уровня МРЗ: при максимальной (а) и минимальной (б) отметках УНБ, створ 2

а)



б)

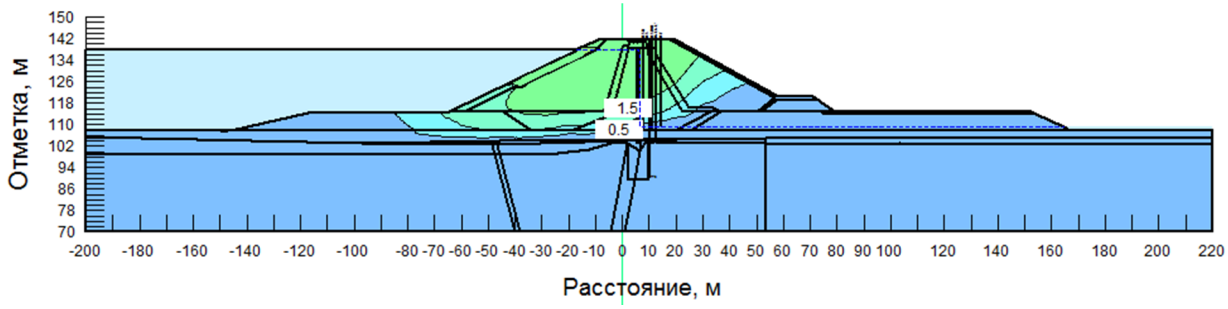


Рисунок А.38 – Картина распределения суммарных остаточных смещений тела плотины, вызванных сейсмическим воздействием уровня МРЗ: при максимальной (а) и минимальной (б) отметках УНБ, створ 2

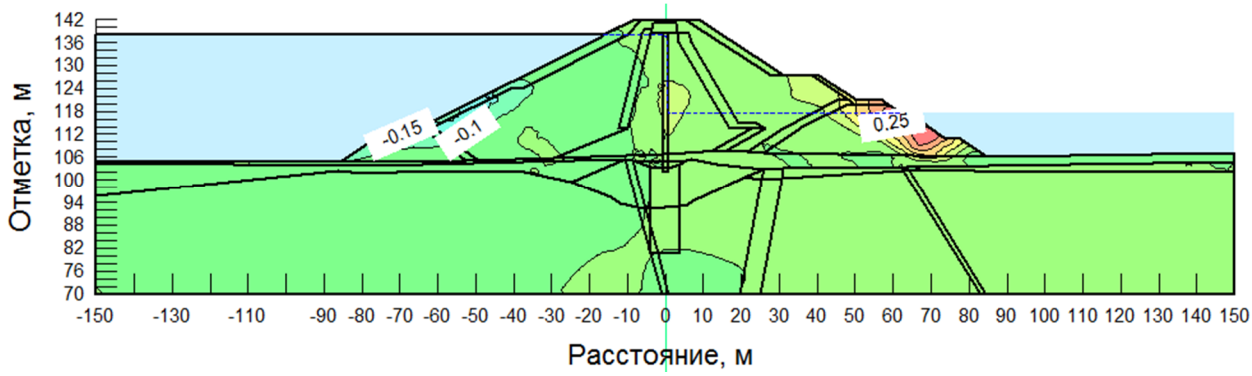


Рисунок А.39 – Картина распределения остаточных горизонтальных смещений тела плотины, вызванных сейсмическим воздействием уровня ПЗ, створ 3

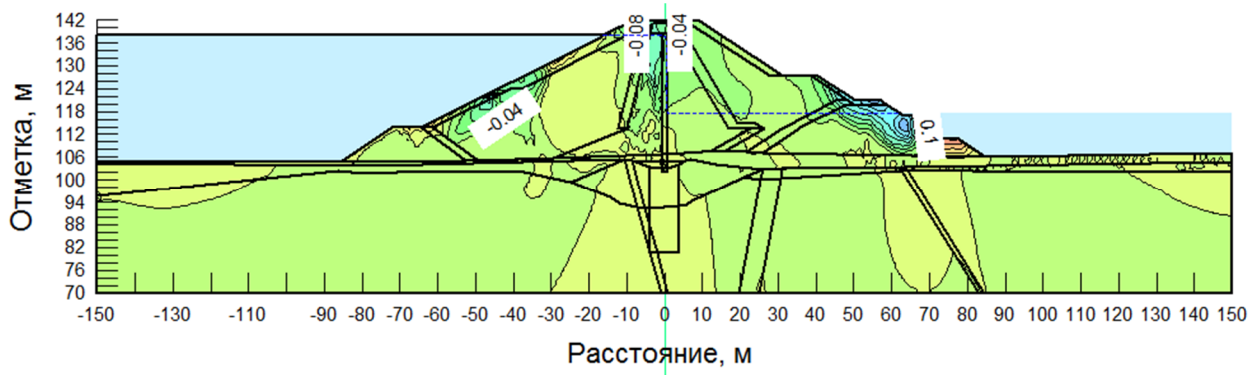


Рисунок А.40 – Картина распределения остаточных вертикальных смещений тела плотины, вызванных сейсмическим воздействием уровня ПЗ, створ 3

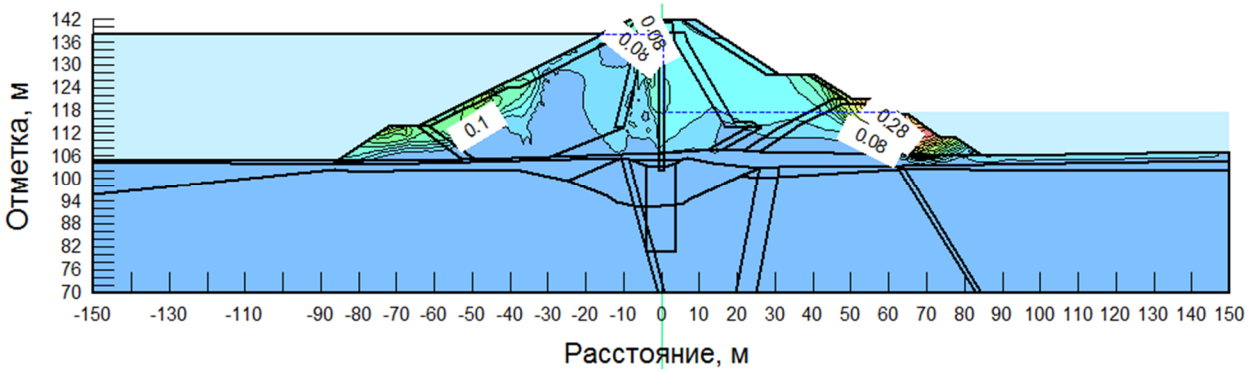


Рисунок А.41 – Картина распределения суммарных остаточных смещений тела грунтовой плотины, вызванных сейсмическим воздействием уровня ПЗ, створ 3

а)

б)

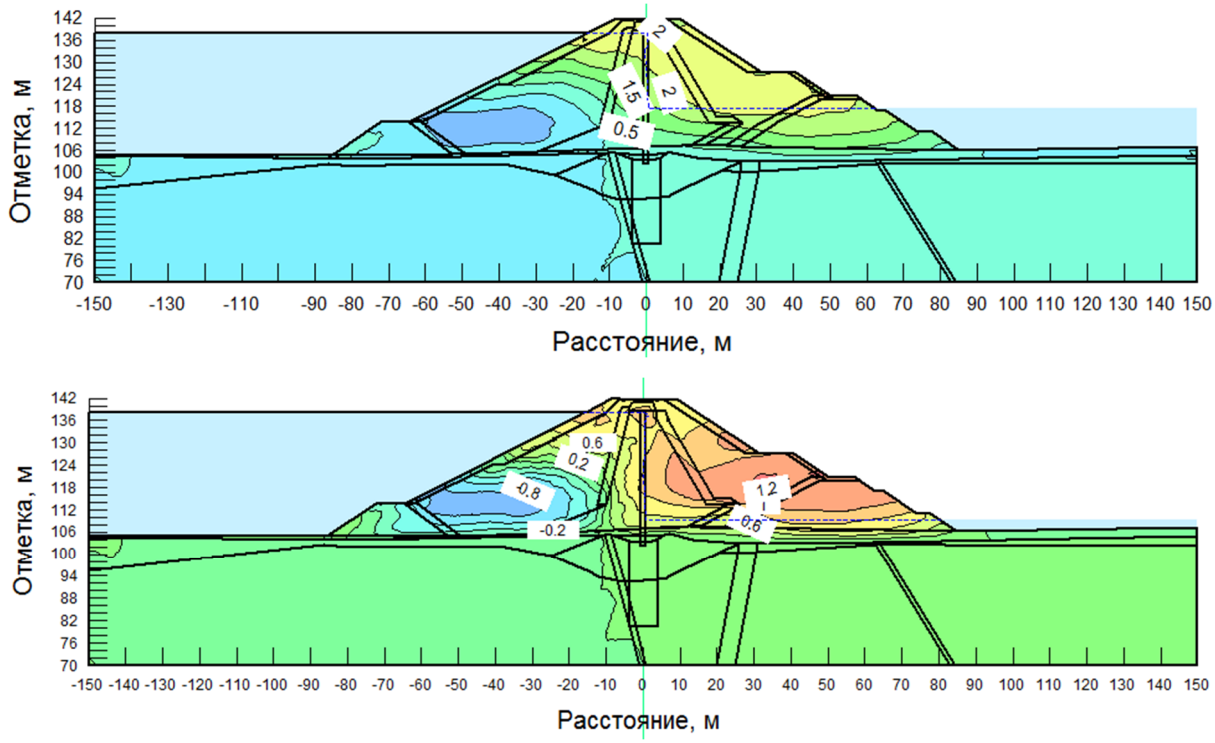
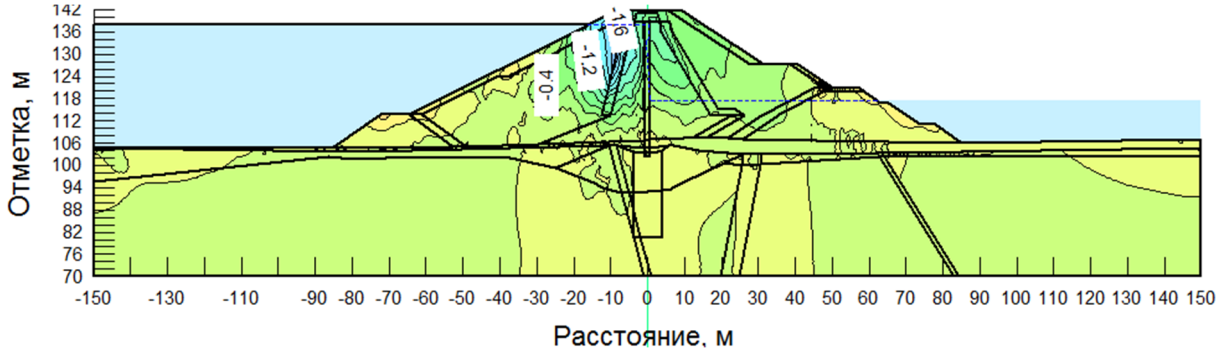


Рисунок А.42 – Картина распределения остаточных горизонтальных смещений тела плотины, вызванных сейсмическим воздействием уровня МРЗ: при максимальной (а) и минимальной (б) отметках УНБ, створ 3

а)



б)

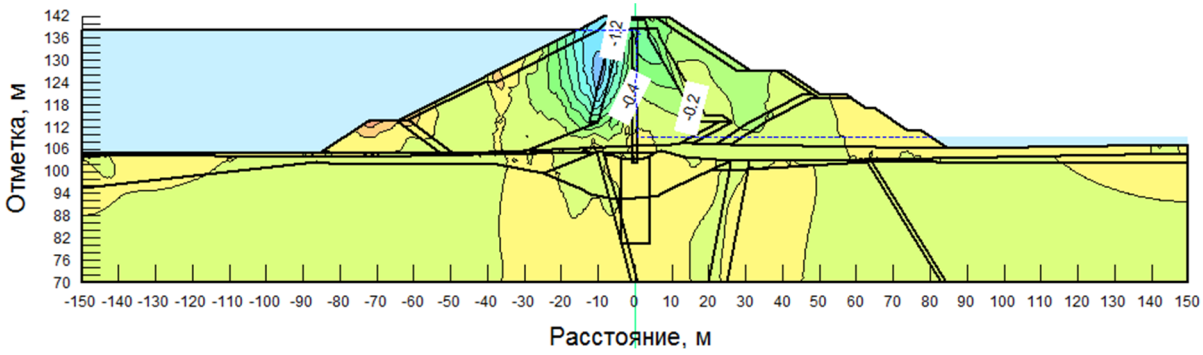
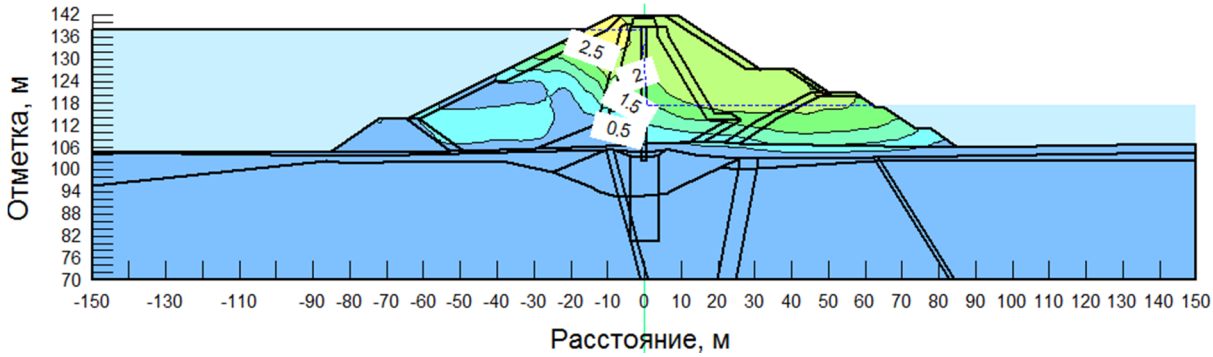


Рисунок А.43 – Картина распределения остаточных вертикальных смещений тела плотины, вызванных сейсмическим воздействием уровня МРЗ: при максимальной (а) и минимальной (б) отметках УНБ, створ 3

а)



б)

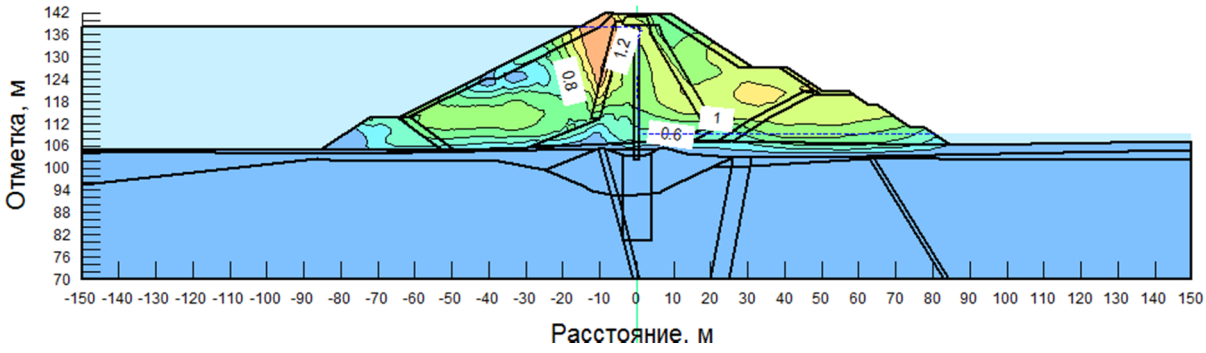


Рисунок А.44 – Картина распределения суммарных остаточных смещений тела плотины, вызванных сейсмическим воздействием уровня МРЗ: при максимальной (а) и минимальной (б) отметках УНБ, створ 3

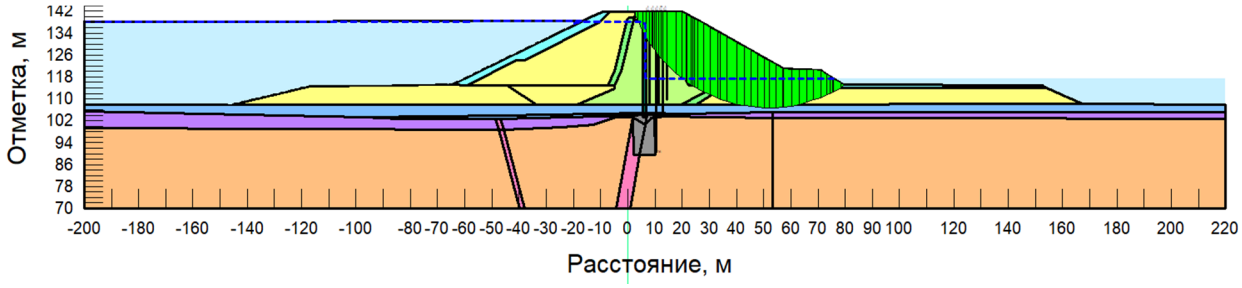


Рисунок А.45 – Поверхность обрушения, полученная при расчете по методу Ньюмарка при сейсмическом воздействии уровня МРЗ, створ 2

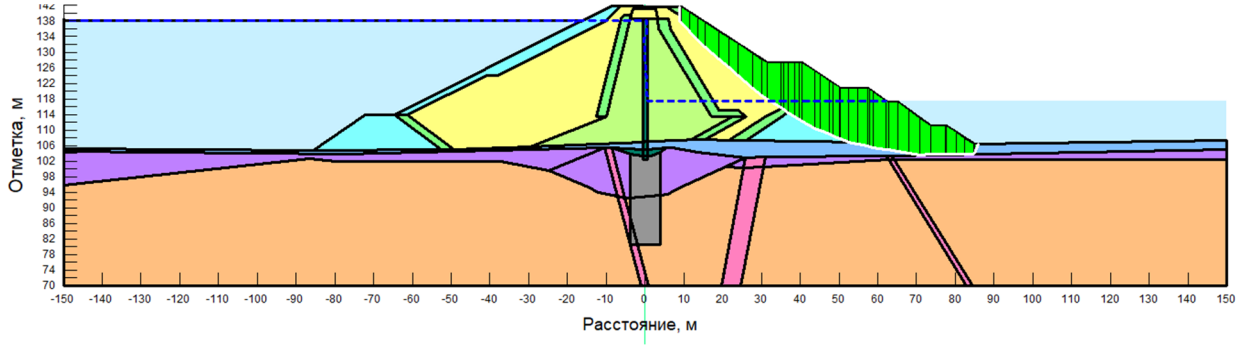


Рисунок А.46 – Поверхность обрушения, полученная при расчете по методу Ньюмарка при сейсмическом воздействии уровня МРЗ, створ 3

Приложение Б.

Патент РФ № 282267 «Способ монтажа дистанционной контрольно-измерительной аппаратуры в буросекущиеся сваи глиноцементобетонной диафрагмы грунтовой плотины»



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2822674

Способ монтажа дистанционной контрольно-измерительной аппаратуры в буросекущиеся сваи глиноцементобетонной диафрагмы грунтовой плотины

Патентообладатель: ***Акционерное общество "Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева" (RU)***

Авторы: ***Сольский Станислав Викторович (RU), Лабойко Роман Юрьевич (RU)***

Заявка № **2023131841**
Приоритет изобретения **29 ноября 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **11 июля 2024 г.**
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **29 ноября 2043 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Приложение В.

Патент РФ № 2852768 «Способ контроля деформаций с определением наибольших значений раскрытия межсвайных швов глиноцементобетонной диафрагмы из буросекущихся свай в грунтовой плотине»



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2852768

Способ контроля деформаций с определением наибольших значений раскрытия межсвайных швов глиноцементобетонной диафрагмы из буросекущихся свай в грунтовой плотине

Патентообладатель: ***Акционерное общество "Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева" (RU)***

Авторы: ***Сольский Станислав Викторович (RU), Лабойко Роман Юрьевич (RU)***

Заявка № **2025101340**
Приоритет изобретения **23 января 2025 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **15 декабря 2025 г.**
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **23 января 2045 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Приложение Г.

Справки о внедрении результатов исследований

РусГидро
Бурейская ГЭС

По месту требования

Филиал ПАО «РусГидро»-
«Бурейская ГЭС»

а/я 52, пгт. Талакан, Бурейский р-н,
Амурская область, Российская Федерация, 676730

т.: 8 (800) 333 8000 / +7 (495) 122 0555
т.: +7 (41634) 28333
ф.: +7 (41634) 28499

burges@rushydro.ru
www.rushydro.ru

Справка

о внедрении результатов диссертационной работы Р.Ю. Лабойко

Настоящей справкой подтверждаю внедрение результатов, полученных в ходе выполнения диссертационной работы Р.Ю. Лабойко на соискание ученой степени кандидата технических наук, при строительстве и эксплуатации Нижне-Бурейской ГЭС.

В 2016 г. Р.Ю. Лабойко участвовал в подготовке (сборке конструкций «гирлянд» контрольно-измерительной аппаратуры) и монтаже контрольно-измерительной аппаратуры в скважины глиноцементобетонной диафрагмы из буросекущихся свай. В ходе выполнения работ Р.Ю. Лабойко были даны рекомендации по совершенствованию конструкции и технологии монтажа, позволившие обеспечить ее сохранность при строительно-монтажных работах и работоспособное состояние при дальнейшей эксплуатации.

Эффективность выбранного решения подтверждена успешной эксплуатацией контрольно-измерительной аппаратуры в противофильтрационном элементе грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС с момента установки по настоящее время.

Директор А.В. Попов

Ленгидропроект

АО «Ленгидропроект»

проспект Испытателей, д. 22, литера А,
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, 197349

т.: +7 (812) 395 2901
ф.: +7 (812) 394 4426

office@lhp.ru
www.lhp.rushydro.ru

от №

на № от

Справка
о внедрении результатов диссертационной работы Р.Ю. Лабойко

Настоящей справкой подтверждается внедрение результатов, полученных в ходе выполнения диссертационной работы Р.Ю. Лабойко на соискание ученой степени кандидата технических наук, при строительстве и эксплуатации Нижне-Бурейской ГЭС.

В 2016-2018 гг. по заказу генерального проектировщика Нижне-Бурейской ГЭС АО «Ленгидропроект» выполнялась работа «Организация и проведение натурных наблюдений (мониторинга) за состоянием основных сооружений НБГЭС в период строительства и наполнения водохранилища», включающая:

- методическое и техническое сопровождение монтажа КИА;
- научно-техническое сопровождение нагружения плотины в процессе наполнения водохранилища;
- анализ и оценку технического состояния грунтовой и бетонной плотин в строительный период и на стадии постановки их под напор.

В рамках сопровождения монтажа КИА был предложен и впоследствии реализован генеральным проектировщиком вариант установки датчиков перемещений на контакте «бетон–глиноцементобетон», предусматривающий плоскопараллельное смещение датчика и контроль за раскрытием шва (письмо № 3970-300 от 17.08.15 г.). При монтаже КИА в скважины глиноцементобетонной диафрагмы были скорректированы конструкция

и технология монтажа КИА, обеспечившие работоспособность КИА в створах №№3, 4 и получение достоверных данных инструментальных наблюдений.

С целью оценки технического состояния грунтовой плотины Р.Ю. Лабойко осуществлял обработку, оформление и анализ данных наблюдений, необходимые для всесторонней оценки технического состояния плотины. В результате исследований были выявлены особенности формирования фильтрационных и деформационных процессов.

В результате выполнения комплекса работ определена эффективность выполненных исследований и предложений, обеспечивающих необходимую работоспособность КИА и высокое качество контроля за состоянием грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС.

Заместитель Генерального директора – главный инженер

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 02795C0301E2B1AC9A47A4834DF7859F3A
Владелец: Петров Вадим Вячеславович
Действителен: с 05.09.2024 по 05.09.2025

В.В. Петров

ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева

АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»

Гжатская ул., д. 21, Санкт-Петербург,
Российская Федерация, 195220

т.: +7 (812) 535 54 45
ф.: +7 (812) 535 67 20

vniig@vniig.ru
www.vniig.rushydro.ru

от _____ № _____
на № _____ от _____

По месту требования

Справка

о внедрении результатов диссертационной работы Р.Ю. Лабойко

Настоящей справкой подтверждается, что результаты исследований Романа Юрьевича Лабойко, выполненные при разработке диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук, нашли практическое применение при эксплуатации, мониторинге и оценке технического состояния грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС.

АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» при непосредственном участии Р.Ю. Лабойко были выполнены следующие комплексные работы:

– «Исследование грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС на фильтрационную прочность и устойчивость», 2019 г.;

– «Анализ состояния ГТС Нижне-Бурейской ГЭС по результатам натурных наблюдений», 2021 г.;

В ходе выполнения работ были проведены всесторонние исследования фильтрационного и температурного режимов тела плотины, напряженно-деформированного состояния глиноцементобетонной диафрагмы из буросекущихся свай, деформаций грунта тела плотины в процессе эксплуатации, позволившие получить достоверные данные о работе сооружения.

Применяемый подход к обработке данных мониторинга состояния ГТС, к анализу и оценке технического состояния грунтовой плотины подтвердил работоспособность и безопасность грунтовой плотины. На основе полученных результатов сформулированы рекомендации по оптимизации системы мониторинга, что значительно повышает качество контроля за состоянием ГТС и способствует своевременному выявлению потенциальных рисков.

Практическая значимость выполненных исследований заключается в повышении надежной и безопасной эксплуатации ГТС, снижении рисков аварийных ситуаций. Полученные результаты способствуют развитию современных методов диагностики и мониторинга состояния ГТС, что имеет важное значение для обеспечения долгосрочной безопасной эксплуатации ГТС.

Первый заместитель Генерального
директора – технический директор  А.Д. Созинов

Приложение Д.

СТО РусГидро 01.01.153-2025 «Методические указания по созданию противофильтрационных элементов гидротехнических сооружений с использованием местных полиминеральных глин»

РусГидро

ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ФЕДЕРАЛЬНАЯ ГИДРОГЕНЕРИРУЮЩАЯ КОМПАНИЯ-
РУСГИДРО»
(ПАО «РУСГИДРО»)

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО СОЗДАНИЮ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕСТНЫХ ПОЛИМИНЕРАЛЬНЫХ ГЛИН

СТО РусГидро 01.01.153-2025

Издание официальное

Москва – 2025