

На правах рукописи



Орищук Роман Николаевич

**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

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в Акционерном обществе «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева» (АО «ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева»)

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник
Сольский Станислав Викторович

Официальные оппоненты: **Куранов Николай Петрович**
доктор технических наук, профессор,
АО «ДАР/ВОДГЕО», председатель
совета директоров

Радзинский Александр Владимирович
кандидат технических наук,
Отдел подготовки строительства
Управления по развитию
имущественного комплекса ФГУП
«НАМИ», заведующий отделом

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Защита состоится «18» декабря 2018 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.138.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26 (9 студия, «Открытая сеть»).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте www.mgsu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бестужева
Александра Станиславовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день в России и за рубежом гидротехнические сооружения всё чаще возводятся в сложных инженерно-геологических условиях, в зонах с высокой сейсмичностью, низкими среднегодовыми температурами, ограниченными ресурсами местных строительных материалов и пр. Указанные факторы накладывают существенные ограничения на конструктивное исполнение сооружений напорного фронта гидроузлов, негативно отражаются на сроках их строительства.

В частности, при дальнейшем освоении гидроэнергетического потенциала Сибири и Дальнего Востока наиболее рациональным, экономически эффективным, с точки зрения строительства и эксплуатации в сложных природно-климатических условиях, является компоновочное решение гидроэнергетического объекта с плотиной из местных материалов. Однако в этих районах, в перспективных створах гидроузлов отмечается недостаток связных грунтов, пригодных для устройства противofильтрационных элементов (ПФЭ).

Эта проблема может быть решена путем устройства противofильтрационного контура, как в теле, так и основании плотины в виде диафрагмы из глиноцементобетона (ГЦБ), возведённой по методу буросекущихся свай (БСС).

Необходимо отметить, что широкому внедрению этого решения, на сегодняшний день, препятствует практически полное отсутствие расчётно-методических и нормативно-справочных документов, опыта проектирования, строительства и эксплуатации плотин с таким типом противofильтрационного устройства (ПФУ). Напряженно-деформированное и фильтрационное состояние плотин с ПФУ из ГЦБ требует дополнительного, более глубокого изучения. Сегодня недостаточно данных о параметрах фильтрационной прочности глиноцементобетона, отсутствуют рекомендации по комплексному обоснованию плотин с ПФЭ данной конструкции, технологические приемы возведения отдельных узлов, а также методы и средства контроля фильтрационного состояния плотин с ПФУ из ГЦБ.

Указанное, а также отсутствие критериев оценки надёжности и безопасности работы, недостаточная проработанность технологии возведения методом БСС противofильтрационных диафрагм из ГЦБ, сдерживает широкое внедрение в практику гидротехнического строительства этого типа ПФУ.

В связи с изложенным научно-техническое, технологическое обоснование конструкции самозалечивающихся противofильтрационных диафрагм грунтовых плотин из глиноцементобетонных буросекущихся свай представляется **актуальным**.

Степень разработанности темы исследований. Изучением и конструированием ПФЭ в гидротехническом строительстве, возводимых способом «стена в грунте» занимались многие отечественные ученые: Рассказов Л.Н., Сольский С. В., Радченко В. Г., Лопатина М.Г., Собкалов П.Ф., Собкалов Ф.П., Федосеев В.И., Бардюков В.Г., Изотов В.И. и др. Изучением их напряженно-деформированного состояния (НДС), прочностными и деформационными характеристиками ГЦБ, подбором составов ГЦБ занимались: Королев В.М., Смирнов О.Е., Аргал Э.С., Радзинский А.В., Дерюгин Л.М., Кривоногова Н.Ф., Легина Е.Е., Саинов М.П., Прокопович В.С., и др. Вопросам самозалечивания ПФЭ посвящены работы: Праведного Г.Х., Иванова Н.Н., Жиленкова В.Н. и др. Однако, в этих

работах недостаточно полно освещена специфика НДС, фильтрационной прочности, возможности самозалечивания, технологических приемов возведения и контроля фильтрации именно для глиноцементобетонных диафрагм (ГЦБД), возведённых методом БСС.

Первый опыт применения «стены в грунте» из ГЦБ относится к 1948 году (Калифорния, США), в Европе этот метод в гидротехническом строительстве используется с начала 50-х гг. прошлого века.

В России такая технология применялась в 80е – 90е годы при ремонтах ПФЭ грунтовых плотин (Курейская и Вилюйская ГЭС). В последнее время, при устройстве ПФЭ в основании Гоцатлинской ГЭС (2011), при возведении грунтовых временных перемычек котлована основных бетонных сооружений Нижне-Бурейской ГЭС (2015) и в грунтовой плотине Нижне-Бурейской ГЭС (2017). В научно-исследовательских работах по обоснованию конструктивных решений для последних трех объектов, автор принимал личное участие. Данные исследования проводились в лаборатории фильтрационных исследований им. академика Н.Н. Павловского АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева».

Цель работы заключалась в создании условий внедрения в отечественную практику гидротехнического строительства грунтовых плотин с новым типом ПФУ из ГЦБ, возведённого по методу БСС, путём проведения расчетно–экспериментального обоснования данного типа конструкции ПФУ, разработки конструктивно-технологических решений по его устройству, решений по мониторингу грунтовых плотин с данным типом ПФУ на этапе эксплуатации.

Задачи исследований были поставлены с учётом необходимости достижения заявленной цели.

1. Провести анализ современного состояния, вопросов и проблем применения буресекущихся ГЦБ свай при создании противofильтрационного устройства грунтовой плотины;
2. Выполнить анализ НДС грунтовых плотин с ПФУ из ГЦБ, сопоставить результаты расчётов при решении задач в плоской и пространственной постановке;
3. Провести лабораторные исследования по определению фильтрационных характеристик ГЦБ (коэффициента фильтрации, фильтрационной прочности, критического градиента и эрозионной устойчивости к размыву потоком воды);
4. Провести комплексные лабораторные и полевые исследования возможности самозалечивания трещин в ГЦБД специально подобранными грунтовыми смесями;
5. Разработать эффективные методы и технологии производства работ по возведению грунтовых плотин с данным типом ПФУ, методы и средства эксплуатационного контроля фильтрационного состояния ГП с ПФУ из ГЦБ.

Научная новизна работы заключается в:

1. Систематизации основных выявленных проблем и управляющих воздействий по обеспечению надежности ГЦБД, возведённой методом БСС, при проектировании, строительстве и эксплуатации грунтовых плотин;
2. Разработке методики по расчётно-экспериментальному обоснованию параметров переходных зон грунтовой плотины, обеспечивающих самозалечивание трещин при их образовании в противofильтрационном элементе из глиноцементобетонных буресекущихся свай.

Теоретическую и практическую значимость работы составляют:

1. Результаты лабораторных и полевых исследований по определению фильтрационных характеристик ГЦБ;
2. Обоснование возможности самозалечивания трещин в глиноцементобетонной диафрагме, возникающих как в процессе строительства, так и эксплуатации;
3. Усовершенствованная технология строительства ГЦБД; разработанные решения по отдельным конструктивным узлам ГЦБД - грунтовая плотина - бетонные сооружения напорного фронта (береговые примыкания); методы контроля фильтрационного состояния грунтовых плотин с ГЦБД, ряд которых защищен патентами РФ.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались: методики лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость, фильтрационную прочность и эрозионную устойчивость; расчётные программные средства для определения НДС ГЦБД и расчёта установившейся фильтрации путём численного моделирования методом конечных элементов.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты комплексных лабораторных и полевых исследований фильтрационных характеристик ГЦБ: коэффициентов фильтрации, критических градиентов и размывающих скоростей, а также определение условий обеспечивающих самозалечивания возможных трещин в ГЦБД.
2. Методика расчетно-экспериментального обоснования, определяющая порядок исследований при проектировании грунтовой плотины с ГЦБД, возведённой методом БСС, обеспечивающая надёжную и безопасную работу сооружения.
3. Конструктивно-технологические решения по строительству грунтовых плотин с ГЦБД, повышающие технологичность и качество производства работ, и обеспечивающие контроль их фильтрационного состояния при эксплуатации.

Степень достоверности экспериментальных исследований подтверждается использованием поверенных приборов и оборудования, стандартизированных методик проведения экспериментов и обработки полученных данных, а также сопоставлением результатов теоретических исследований с опытными данными, полученными на строительстве Гоцатлинской и Нижне-Бурейской ГЭС. Численное моделирование проводилось с использованием лицензионных программных комплексов (ABAQUS, FEFLOW, PlaxFlow).

Личный вклад. При проведении лабораторных исследований автором разработаны все планы экспериментов и проведён ряд экспериментов по определению фильтрационных характеристик ГЦБ. Анализ результатов лабораторных экспериментов, подготовка заключений и выводов по результатам работ выполнены автором лично.

При выполнении численного моделирования автором выполнена постановка задачи, определены начальные и граничные условия эксперимента, разработаны планы численных экспериментов, как при расчетах НДС, так и при расчетах фильтрации. Анализ результатов численного моделирования и формулирование выводов выполнены автором лично.

Автором разработана методика расчетно-экспериментального обоснования, определяющая порядок проведения исследовательских работ при проектировании грунтовой плотины с ГЦБД.

При конструировании новых и усовершенствованных элементов конструкции центральной зоны грунтовых плотин с ГЦБД, узлов примыкания скальным бортам и бетонным примыканиям, технологии системы мониторинга на основе многосекционной дрены, оптоволоконной технологии и геофизических методов, диссертант принимал участие в каждой из разработок и является автором всех технологических схем их строительства. Диссертант является соавтором патентов на изобретения по тематике работы.

Внедрение результатов. Результаты исследований автора использованы в проектах Гоцатлинской ГЭС (вариант грунтовой плотины с ГЦБД), Нижне-Бурейской ГЭС, вошли в «Рекомендации по проектированию, расчетам и возведению противодиффузионного элемента из глиноцементобетонных буросекущихся свай – СТП 310.02.НТ-2017», получены 1 свидетельство на изобретение и один приоритетный номер на Заявку на изобретение.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: 9-ая и 10-ая научно-технические конференции «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии» (АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», СПб., 2015, 2016), Молодежная научно-техническая конференция «Наука и проектирование» (АО «Институт Гидропроект», Москва, 2016), III Всероссийская научно-практическая конференция «Гидроэлектростанции в XXI веке» (Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета, Республика Хакасия, г. Саяногорск, 2016), III-я научно-практическая конференция с международным участием «Экологическая безопасность АЭС» (Калининград, 2016), секция ГТС НТС РусГидро (Москва, 2016), Ученый Совет АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» (СПб, 2016), XVII Dam Monitoring International Conference (Польша, 2017), Seventh International Conference on Water Resource and Renewable Energy Development in Asia (Вьетнам, 2018), секция «Основания, грунтовые и подземные сооружения» Ученого Совета АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» (СПб, 2017, 2018), Научно – практическая конференция «Проблемы и задачи развития водного хозяйства России» Академии проблем водохозяйственных наук (Москва, 2018), кафедра гидротехнического строительства ФГБОУ ВПО МГУП им. К.А. Тимирязева (Москва, 2018).

Публикации. По материалам работы опубликовано 12 печатных работ, в том числе 8 статей в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ и один патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и трех приложений. Общий объем работы составляет 171 страницу машинописного текста, включая 68 рисунков, 32-х таблиц, список литературы из 214 наименований, в том числе 62 иностранных источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы диссертации, поставлена цель и сформулированы основные задачи исследований, которые необходимо было решить для достижения поставленной цели, сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также методы исследований и достоверность, приведены результаты внедрения и апробации основных результатов диссертационной работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор современного состояния вопроса использования метода БСС при устройстве ГЦБД грунтовых плотин и дано обобщение зарубежного и отечественного опыта применения ГЦБ при устройстве противофильтрационного контура ГТС. Установлено, что ранее такое техническое решение было использовано только для малых плотин высотой менее 15 м, применялось для ремонтов ПФУ для плотин с напорами до 70 м. На сегодняшний день существуют основные технические предпосылки для устройства глубоких БСС в качестве ПФЭ грунтовых плотин (машины и механизмы, оборудование, средства контроля, заводы по приготовлению ГЦБ смесей).

Выполнен анализ нормативно-методической документации по устройству ПФУ грунтовых плотин из ГЦБД методом БСС и наиболее близких к ним по конструкции «стенок в грунте» создаваемых другими методами (траншейным, панельным); анализ опубликованных в открытой печати исследований по проблемам проектирования, строительства, ремонтов и эксплуатации ГЦБД БСС; анализ влияния компонентов глиноцементобетона на его характеристики, на основании чего выявлены основные проблемы в проектировании, строительстве и эксплуатации ГЦБД грунтовых плотин возводимых методом БСС, поставлены и обоснованы задачи диссертационной работы и разработан план исследований.

Во второй главе дано решение задачи по определению и анализу НДС грунтовых плотин с ПФЭ из ГЦБ на примере Гоцатлинской ГЭС. Разработана трехмерная конечно-элементная модель Гоцатлинской ГЭС с использованием ПК ABAQUS с учетом совместной работы плотины с вмещающим грунтовым массивом, в вариантах с одно- и двухъярусной диафрагмой и с различными режимами наполнения водохранилища. Для всех расчетных вариантов получены поля распределения сжимающих и растягивающих напряжений, осадки и смещения диафрагмы.

При моделировании было выявлено:

– Максимальные сжимающие напряжения, как для одноярусной, так и для двухъярусной диафрагмы соответствуют допустимым проектным напряжениям для ГЦБ.

– При пространственной постановке задачи определены зоны растяжения, приуроченные к бортовым примыканиям (области потенциального трещинообразования).

– Распределение осадок диафрагмы существенно зависит от способа ее возведения. Расчеты показали, что максимальные осадки в случае устройства ГЦБД в один ярус составляют 0,14 м, в два яруса – 0,35 м.

– Перемещение диафрагмы в сторону НБ характеризуется формированием в нижней центральной ее части зоны максимальных деформаций, с отклонением от вертикальной оси до 0,25 м (область потенциального трещинообразования) и небольшим смещением в сторону ВБ пригребневой части до 0,08 м.

Анализ полученных результатов позволил наметить зоны, требующие дополнительных конструктивных усовершенствований системы «грунтовая плотина – ГЦБД – бортовые примыкания». Сопоставления результатов показали удовлетворительные соответствия расчетам, полученным в пространственной постановке и поверочного расчета НДС в плоской постановке, выполненного с использованием ПК ABAQUS для расчетных сечений.

Сделан вывод, что в целом, напряжения, возникающие в ГЦБД ГП на примере Гоцатлинской ГЭС, не превышают допустимых для принятого состава ГЦБ и по полученным результатам расчетов данный тип ПФУ может быть рекомендован для проектной вариантной проработки с целью дальнейшего внедрения на плотинах высотой до 70 м. При этом, необходимо особое внимание уделять этапности возведения плотины и диафрагмы, условиям постановки сооружения под напор, так как это существенным образом влияет на дальнейшую надёжность сооружения.

В третьей главе приведены результаты лабораторных исследований по определению фильтрационных характеристик ГЦБ. Работы выполнены с целью обоснования возможности использования ГЦБ для устройства диафрагм грунтовых плотин, возводимых по методу БСС. По результатам проведённых работ также были сформулированы направления дальнейших исследований с целью последующего развития нормативно-методической базы, обеспечения качества строительства, повышения надёжности работы грунтовых плотин с данным типом ПФУ.

Исследовались и определялись: коэффициент фильтрации; фильтрационная прочность; критический градиент напора и эрозионная устойчивость (размываемость) ГЦБ. Исследования выполнялись на протяжении 2011-2017 гг. при обосновании технических решений в проектах строительства Гоцатлинской ГЭС и Нижне-Бурейской ГЭС.

Проведение лабораторных исследований по определению коэффициента фильтрации образцов ГЦБ осуществлялось согласно «Рекомендациям по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость» профессора В.Н. Жиленкова.

Для определения коэффициента фильтрации ГЦБ использовался прибор дивергентной осе-симметричной фильтрации (рис. 1). Испытания по схеме осе-симметричной фильтрации полностью соответствуют условиям фильтрации в сформированном ПФЭ, где фильтрация происходит вдоль горизонтальных слоев. Использование данного прибора позволяет сохранить первоначальную структуру твердых по консистенции образцов, в составе которых содержится много гравийно-щебенистых фракций. Также, определение коэффициента фильтрации образцов ГЦБ с Нижне-Бурейской ГЭС проводилось в фильтрационно-компрессионных приборах (ФКП) конструкции ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева.

На основе анализа различных составов ГЦБ, условий производства и технологии производства работ был разработан план лабораторных экспериментов, который включал в себя исследование показателей, представленных в таблице 1.

а)



б)



Рисунок 1 - Приборы для определения коэффициента фильтрации образцов:
 а) прибор дивергентной осе-симметричной фильтрации;
 б) фильтрационно-компрессионный прибор конструкции ВНИИГ

Таблица 1 - Варианты исследованных образцов ГЦБ

| ГЦБ элемент | | без пластификатора | с пластификатором | дополнительное увлажнение | естественная влажность | с фиброй | без фибры |
|----------------|------|---------------------|-------------------|---------------------------|------------------------|----------|-----------|
| в теле плотины | свая | Гоцатлинская ГЭС | + | + | + | + | — |
| | | Нижне-Бурейская ГЭС | — | + | + | + | — |
| | шов | Гоцатлинская ГЭС | + | + | + | + | + |
| | | Нижне-Бурейская ГЭС | — | + | + | + | — |
| в основании | свая | Гоцатлинская ГЭС | + | + | + | — | + |
| | | Нижне-Бурейская ГЭС | — | — | — | — | — |
| | шов | Гоцатлинская ГЭС | + | + | + | — | + |
| | | Нижне-Бурейская ГЭС | — | — | — | — | — |

Образцы ГЦБ для фильтрационных исследований отбирались на стройплощадке плотины и на опытном полигоне Гоцатлинской ГЭС, а также на временных перемычках Нижне-Бурейской ГЭС.

Результаты выполненных комплексных исследований фильтрационно-суффозионных свойств глиноцементобетона различных рецептур показали, что данный материал обладает высоким потенциалом в качестве противофильтрационного элемента грунтовых плотин. В ходе исследований коэффициенты фильтрации образцов ГЦБ составляли порядка $A \times 10^{-4}$ м/сут. ГЦБ материал не разрушался при градиентах напора до $J = 151$.

Также было определено, что на фильтрационные свойства ГЦБ образцов существенно влияют условия твердения, в частности влажность вмещающего грунта.

Образцы, которые твердели в грунте с естественной влажностью, обладают более низкими фильтрационными свойствами по сравнению с участками, на которых проводилось дополнительное увлажнение. На основании чего, можно сделать вывод, о необходимости учёта данного фактора при подборе состава ГЦБ. Дополнительно было выявлено, что более высокую проницаемость показали образцы, имитирующие зону сопряжения свай по сравнению с цельными образцами. Можно констатировать, что именно участки сечения свай будут являться лимитирующими зонами по обеспечению фильтрационной прочности ГЦБД.

Испытания ГЦБ образцов на эрозионную устойчивость при воздействии потока воды в полый трещине проводились в лабораторных условиях в суффозионном щелевом лотке (рисунок 2).



Рисунок 2 - Испытания образцов на эрозионную устойчивость в суффозионном щелевом лотке

В процессе опытов определялись градиент – скоростные характеристики потока воды в трещине заданного раскрытия $\delta = 2$ мм.

Определение устойчивости к размыву проводилось для образцов, отобранных из ГЦБ свай опытного полигона Гоцатлинской ГЭС, образцов ГЦБ, выбуренных из временных перемычек котлована Нижне-Бурейской ГЭС, и образцов изготовленных в лабораторных условиях по рецептуре ООО «Гидроспецпроект» для Нижне-Бурейской ГЭС. Всего было испытано более 150 образцов.

По результатам исследований можно констатировать, что ГЦБ обладает высокой эрозионной устойчивостью, не размывается при скорости потока 200 см/с.

Суммируя результаты выполненных фильтрационных исследований в части определения коэффициентов фильтрации, критических градиентов напора, исследований на эрозионную устойчивость, ГЦБ можно уверенно рекомендовать как материал пригодный для создания ПФЭ грунтовых плотин. При этом необходимо отметить, что на надёжность работы ГЦБД как противофильтрационного элемента оказывает существенное влияние качество производства работ, строгое соблюдение технологии приготовления ГЦБ в соответствии с подобранной рецептурой, а также условия твердения ГЦБ в теле плотины.

В четвертой главе представлены результаты лабораторных и полевых исследований по изучению возможности самозалечивания трещин в ГЦБД специально подобранными грунтовыми материалами. Граничные условия для постановки лабораторного эксперимента по значениям градиентов, действующих на контактах «переходная зона – раскрытая (замытая) трещина - переходная зона» получены автором методами численного моделирования.

Общий анализ структуры фильтрационного потока в теле и основании грунтовой плотины с ПФЭ в виде ГЦБД выполнен на основе моделирования установившейся фильтрации в двухмерной постановке на примере плотины Гоцатлинской ГЭС с использованием программного модуля Plax Flow (рисунок 3).

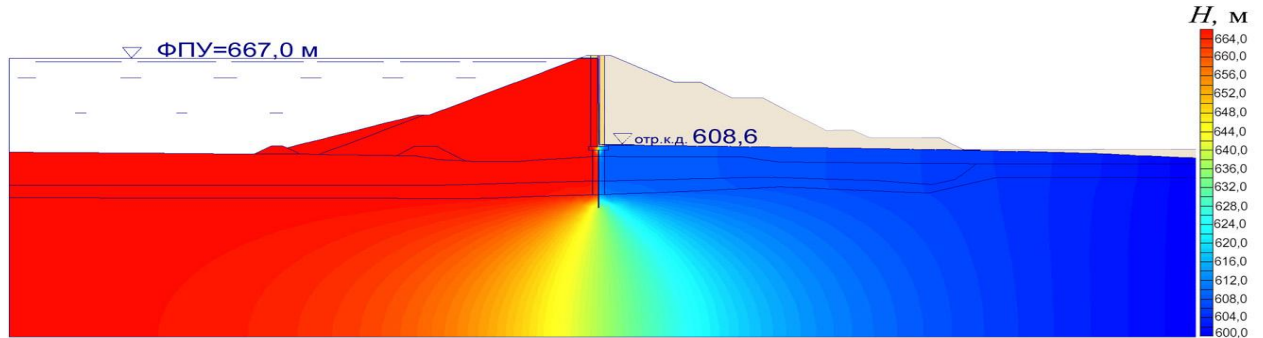


Рисунок 3 - Линии равных пьезометрических напоров грунтовой плотины Гоцатлинской ГЭС

По результатам анализа проведенных расчётов следует, что в исследуемой конструкции наибольший фильтрационный расход наблюдается через тело плотины и составляет 25,0 м³/сут. на 1 п.м, и большая часть потерь напора (до 78%) происходит на диафрагме. В случае образования трещины в ГЦБД и ее заполнения грунтом «залечивающего» слоя ожидается возрастание удельного фильтрационного расхода через тело плотины на 25% с одновременным небольшим (не более 3%) снижением потерь напора на ПФУ за счет повышения на 5,5 м поверхности депрессии в низовом клине плотины.

При полном разрушении (деградации) диафрагмы следует ожидать увеличения фильтрационных потерь из водохранилища в 28 раз, что составит 704,6 м³/сут. на 1 п.м, и подъема депрессионной поверхности более чем на 50 м до отметки 661,9 м.

Для анализа фильтрационного режима и определения характеристик фильтрационного потока в теле грунтовой плотины при развитии процесса трещинообразования в ГЦБД и проверки способности переходного слоя к кольматированию трещин выполнено 3D-моделирование с применением конечно-элементного программного пакета FEFLOW6.2. Целью расчетов было определение максимальных градиентов напора вдоль оси трещин различной ориентации: на входе, на выходе, а также внутри замытой трещины.

В результате моделирования получены значения градиентов напоров в трещинах вертикальной и горизонтальной ориентации с различной шириной раскрытия, с различным расположением по высоте диафрагмы и установлены закономерности влияния на значения градиентов напора в исследованных диапазонах этих параметров. Согласно результатам выполненных расчётов, определено следующее:

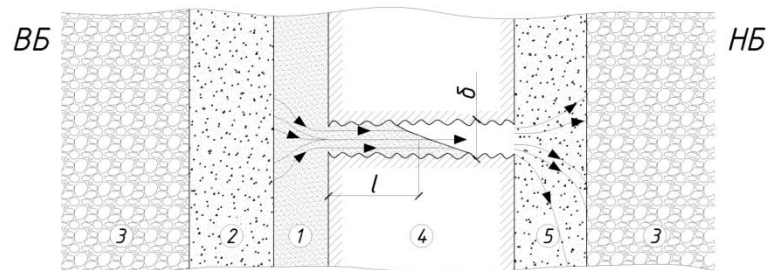
– При расширении не замкнутой трещины входные и выходные градиенты напора быстро растут до некоторого предельного значения δ_0 (для рассмотренной задачи получено $\delta_0=16\div 32$ мм), после чего начинают более медленное снижение. Максимальные значения градиента напора при раскрытии δ_0 составили:

– на входе в вертикальную трещину $J_{вх} = 170$, в горизонтальную – $J_{вх} = 304$;

– на выходе из вертикальной трещины $J_{вых} = 3,8$, из горизонтальной – $J_{вых} = 12,8$.

– При кольматировании трещин, возникающих в ГЦБД в процессе эксплуатации специально подобранным грунтом верховой переходной зоны, будет соблюдено условие недопущения превышения предельно допустимых градиент-скоростных характеристик фильтрационного потока по отношению к ГЦБ при условии обеспечения начала процесса самозалечивания трещины при её раскрытии не более $\delta=3,0$ мм.

Таким образом, для обеспечения фильтрационной прочности плотины при возможном образовании трещин в ГЦБД в конструкции переходных зон с верховой стороны ПФЭ необходимо предусматривать специальный слой, обеспечивающий гарантированное заполнение (кольматацию) трещин. Механизм самозалечивания следующий: при образовании и раскрытии в ГЦБ трещины на контакте с защитным слоем возникают входные (в сторону полости трещины) градиенты напора J , превышающие критические значения градиента напора для защитного слоя (рисунок 4). Грунтовый материал защитного слоя в зоне контакта с ГЦБ ПФЭ, за счет временной утраты собственной фильтрационной прочности увлекается фильтрационным потоком в образовавшиеся в ГЦБ трещины, в результате чего они заполняются материалом собственно защитного слоя, восстанавливая сплошность ПФЭ плотины.



1 - залечивающий слой; 2 - верховой переходный слой; 3 - призма плотины;
4 - ГЦБД; 5 - низовой переходный слой (обратный фильтр)

Рисунок 4 - Схема залечивания (кольматации) трещин в ГЦБД защитным материалом

Лабораторно-экспериментальное исследование возможности кольматажа трещины залечивающим слоем выполнялось в горизонтальном фильтрационном лотке конструкции ВНИИГ. Применяя модифицированную методику испытаний, данная лабораторная установка позволила фрагментарно воспроизвести условия формирования процессов кольматирования щелевидных повреждений диафрагмы. Экспериментальным путем в лабораторных условиях установлено, что для различных песчаных грунтов вовлечение в трещину и ее полное заполнение происходит при градиентах фильтрационного потока 0,2 – 1,3.

Лабораторно-экспериментальное исследование контакта грунтов «залечивающий слой – низовой переходный слой – упорная призма» выполнялось в геогидравлическом приборе конструкции ВНИИГ на трехслойной модели переходных зон ГЦБД «слой песка,

обеспечивающего кольматаж трещины – низовой переходный слой – упорная призма». Цель исследований заключалась в определении водопроницаемости и суффозионной устойчивости системы защиты диафрагмы. По итогам, проведённых лабораторных исследований были определены основные требования, предъявляемые к материалам, применяющимся к формированию переходных слоёв и залечивающего слоя, обеспечивающих фильтрационную прочность ГЦБД и узлов примыкания.

С целью определения в натуральных условиях возможности применения местного песчаного строительного материала в качестве защитного слоя, обеспечивающего залечивание трещин в случае их образования в теле ГЦБД плотины Нижне-Бурейской ГЭС были проведены экспериментально-полевые исследования. Данные исследования были выполнены на участке временных перемычек строительного котлована основных сооружений.

Схема проведения опытов заключалась в замыве искусственных отверстий/трещин песчаным материалом организованных в ГЦБ сваях временных перемычек. В теле ГЦБ сваи создавалась вертикальная цилиндрическая полость ($\text{Ø}180\text{-}400$ мм), которая заполнялась местным песком и имитировала залечивающий слой. В нижней части сваи из шурфа создавались горизонтальные отверстия, имитирующие трещину (рисунок 5).

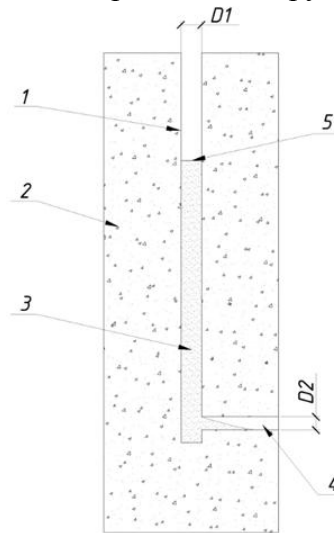


Рисунок 5 - Схема проведения суффозионных исследований на опытном полигоне:

1 – скважина; 2 – ГЦБ свая; 3 – песок залечивающего слоя; 4 – горизонтальное отверстие в теле ГЦБ; 5 – уровень песка в скважине

Результаты полевых экспериментов позволяют прийти к заключению, что при использовании разведанных местных песков сквозные трещины в диафрагме плотины Нижне-Бурейской ГЭС будут на всю глубину гарантированно кольматироваться грунтом залечивающего слоя при градиентах напора от 1,5 до 2,4 (рисунок 6).

Выполненные экспериментально-полевые исследования возможности самозалечивания трещин в ГЦБД на опытном полигоне Нижне-Бурейской ГЭС местным песком, показали высокую сходимость с полученными результатами в лабораторных условиях и доказывают корректность выполненных расчётов и принятых решений.



Рисунок 6 - Вынос песчаного грунта из скважины

В целом, по результатам выполненных лабораторно-экспериментальных и полевых исследований доказана возможность обеспечения фильтрационной прочности грунтовой плотины с ГЦБД высотой до 70 м в случае возникновения в ней трещин как горизонтальной, так и вертикальной ориентации при правильно подобранном материале переходных зон и залечивающего слоя.

Полученные результаты выполненных исследований позволили сформулировать требования к конструкции верховой и низовой переходных зон и разработать методику расчета грунтовой плотины с ГЦБД по обеспечению её фильтрационной прочности, представленную на блок-схеме (рисунок 7).

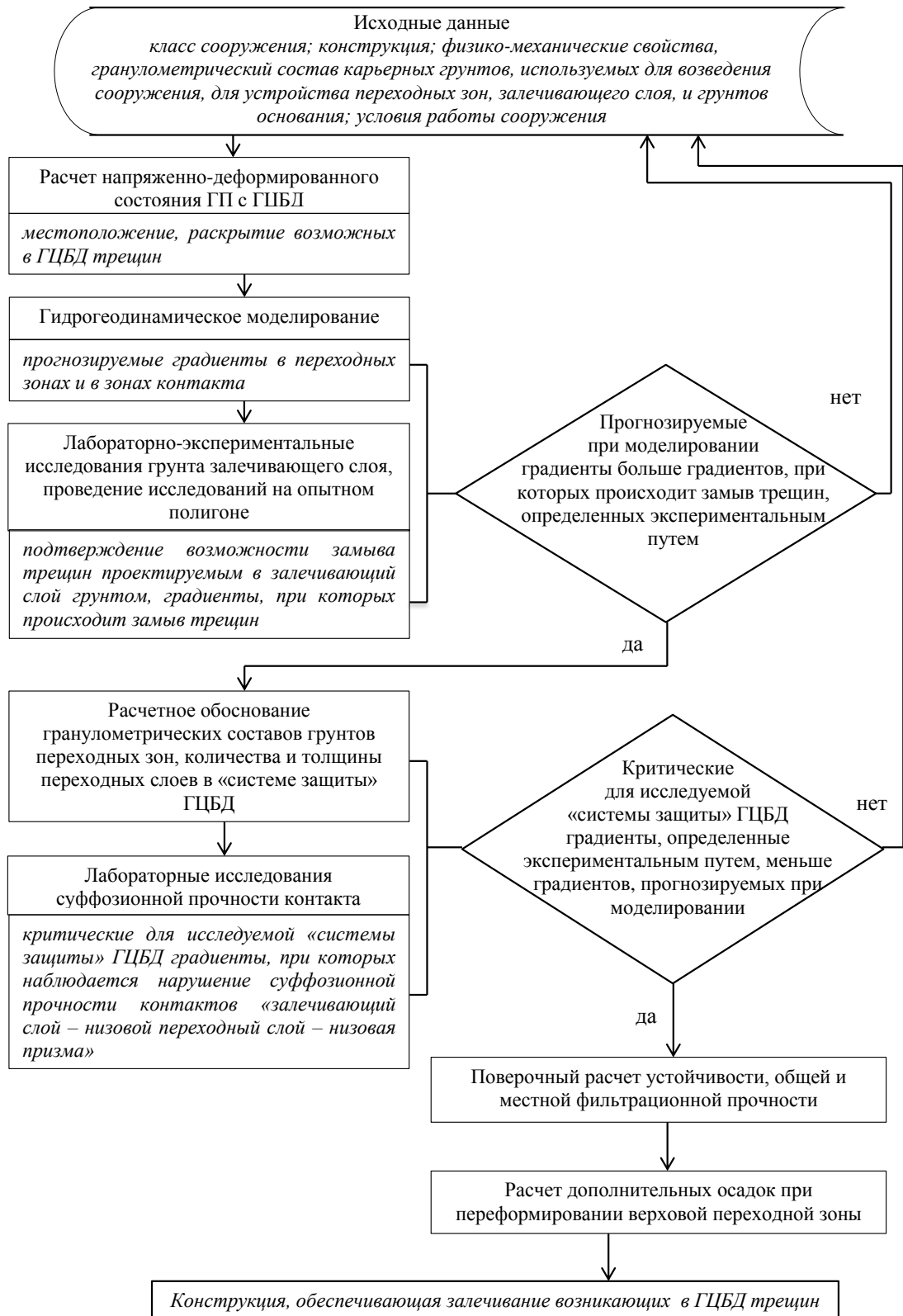


Рисунок 7 - Блок-схема расчетно-экспериментального обоснования параметров переходных зон грунтовой плотины, обеспечивающих самозалечивание трещин

В пятой главе автором приведены результаты разработок по усовершенствованию конструктивных узлов, элементов технологии строительства и мониторинга ПФУ грунтовой плотины с ГЦБД возведённой методом БСС.

По результатам выполненных в предыдущих главах исследований установлен ряд проблемных факторов, влияющих на надежное и безопасное состояние ГЦБД в конструкции грунтовых плотин, не нашедших в настоящее время должных научно-обоснованных технических решений и конструктивно-технологических проработок в проектной практике. А именно:

- решение вопросов с компенсацией деформаций ГЦБД, возникающих как в теле самого ПФУ, так и в бортовых примыканиях и примыканиях к бетонным сооружениям напорного фронта;
- обеспечение условий фильтрационной прочности грунтовой плотины при любых проектных условиях эксплуатации, в т.ч. при сейсмических воздействиях;
- обеспечение возможности оперативного управления характеристиками ГЦБ смеси в зависимости от условий и технологии строительства, как на этапе её приготовления, так и в процессе твердения уже в теле плотины;
- поиск новых методов и технических средств мониторинга фильтрационного состояния ГП в процессе её эксплуатации, т.к. существующие методы не позволяют локализовать места возможной сосредоточенной фильтрации.

Для решения указанных проблемных факторов были разработаны:

1. Усовершенствованные конструктивные узлы, а именно: конструкция и технология устройства многослойного обратного фильтра с учётом технологии устройства ГЦБД; конструкция и технология устройства усовершенствованного примыкания ГЦБД к бортовому примыканию или бетонному устою.
2. Конструкция и технология устройства системы поддержания оптимального влажностного режима в зоне твердения ГЦБ.
3. Новая система мониторинга фильтрационного состояния ГП с ГЦБД возведённой по методу БСС.

В главе представлены как само конструктивное решение, так и технологические схемы производства работ, сводка которых приведена в таблице 2.

Таблица 2 - Сводная таблица новых технических решений по повышению надежности грунтовых плотин с ГЦБД, строящихся методом БСС

| <i>№ п/п</i> | <i>Воздействие</i> | <i>Объект</i> | <i>Решение</i> | <i>Примечание</i> |
|------------------|---|--|--|--|
| <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> |
| 1 | Повышение надежности грунтовой плотины | Грунтовая плотина | Многослойный обратный фильтр в зоне устройства ГЦБД | Технология строительства, разработанная для варианта проектного решения ГП Гоцатлинской ГЭС |
| 2 | Повышение надежности грунтовой плотины | Примыкания (сопряжение) ГЦБД с сооружениями напорного фронта | Новый узел сопряжения ГЦБД к бортовому примыканию или бетонным сооружениям | Разработано новое техническое решение |
| 3 | Повышение надежности грунтовой плотины | ГЦБД | Система увлажнения вмещающего ГЦБД грунта на период твердения ГЦБ | Разработано новое техническое решение |
| 4 | Мониторинг фильтрационного состояния | Грунтовая плотина | Многосекционная контрольная дрена | Разработано новое техническое решение |
| 5 | Мониторинг фильтрационного состояния | Грунтовая плотина | Волоконно-оптическая система контроля фильтрационного состояния | Разработано новое техническое решение и технология строительства. Оформлен патент №2628447 |
| 6 | Мониторинг фильтрационного состояния | Грунтовая плотина | Применение геофизического метода наведенного поля | Разработано новое техническое решение. Предложено для Нижне-Бурейской ГЭС. Подана заявка на оформление патента №2018104597 |
| 7 | Мониторинг фильтрационного состояния грунтовой плотины с ГЦБД | Грунтовая плотина | Применение геофизического метода сейсмического просвечивания | Разработано новое техническое решение. Предложено для Нижне-Бурейской ГЭС |

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнено комплексное исследование по выявлению проблем, сдерживающих внедрение в практику проектирования и строительства грунтовых плотин с новым типом противофильтрационного устройства из ГЦБ, возведённого способом буросекущихся свай и обзор современного состояния применения метода БСС при устройстве ГЦБД грунтовых плотин, обобщён зарубежный и отечественный опыт применения ГЦБ при устройстве противофильтрационного контура ГТС.

2. Выполнен анализ нормативно-методической документации по устройству ПФУ грунтовых плотин из ГЦБД методом буросекущихся свай и наиболее близких к ним по конструкции «стенок в грунте» создаваемых другими методами (траншейным, панельным); анализ опубликованных в открытой печати исследований по проблемам проектирования, строительства, ремонтов и эксплуатации ГЦБД; анализ влияния компонентов глиноцементобетона на его характеристики. На основании чего

сформулированы задачи настоящей диссертационной работы и разработан план исследований.

3. Для уточнения НДС системы плотина – ГЦБД на примере Гоцатлинской ГЭС выполнены расчёты в вариантах с одно – и двухъярусной диафрагмой и с различными режимами наполнения водохранилища. Для всех расчетных вариантов получены и проанализированы поля распределения сжимающих и растягивающих напряжений, осадки и смещения диафрагмы, что позволило выделить зоны, требующие дополнительных конструктивных усовершенствований системы «ГП – ГЦБД – бортовые примыкания». Сопоставление результатов показали достаточную сходимость расчетов, полученных в пространственной постановке и поверочного расчета НДС в плоской постановке.

4. Результаты комплексных исследований фильтрационно-суффозионных свойств ГЦБ, выполненных для различных рецептур при обосновании технических решений по возведению ГЦБД на примере конструкций грунтовых плотин Гоцатлинской и Нижне-Бурейской ГЭС показали, что данный материал обладает высоким потенциалом применения в качестве противофильтрационного элемента грунтовых плотин.

5. С целью обеспечения возможности постановки лабораторного эксперимента по подбору гранулометрического состава залечивающего слоя и обратных фильтров было выполнено численное моделирование фильтрационного потока на примере грунтовой плотины с ГЦБД Гоцатлинской ГЭС, получена характеристика общих закономерностей движения фильтрационного потока в теле и основании ГП, как с исправно работающей диафрагмой, так и с ГЦБД в нарушенном состоянии до и после кольматации горизонтальных и вертикальных трещин. Получены закономерности изменения расчётных значений максимальных действующих градиентов. Установлено, что ГЦБ может сопротивляться действующему градиент-скоростному воздействию водного потока в случае раскрытия трещин любой ориентации при создании условий их кольматации.

6. В результате экспериментальных исследований процессов кольматирования щелевидных повреждений диафрагмы, выполненных в лабораторных условиях, установлена возможность кольматации трещины в ГЦБД в широком диапазоне действующих градиентов напора.

7. При проведении исследований эффективности системы защиты ГЦБД на примере Гоцатлинской ГЭС установлено, что критический градиент напора в зоне контакта «залечивающий слой – низовой переходной слой» при наличии сквозной трещины в ГЦБД не превышает допустимого по условию суффозионной устойчивости. Таким образом, обеспечивается условие суффозионной устойчивости грунтов правильно подобранных в качестве обратных фильтров и «залечивающего» слоя. По результатам лабораторно-экспериментальных исследований были сформулированы требования к переходным зонам, обеспечивающие фильтрационную прочность грунтовой плотины в случае раскрытия трещин в ПФУ.

8. Полученные в лабораторных условиях результаты по обеспечению фильтрационной прочности грунтовой плотины по факту были подтверждены в полевых условиях на опытных участках.

9. Разработана методика расчетно-экспериментального обоснования конструкции грунтовой плотины с ГЦБД, обеспечивающей самозалечивание возможных трещин в противofильтрационном элементе.

10. Разработаны элементы конструкции грунтовых плотин с ГЦБД - конструкция и технология устройства многослойного обратного фильтра в зоне устройства ГЦБД и усовершенствованного примыкания ГЦБД к скальному примыканию или бетонному устою, повышающие конструктивную надежность и живучесть грунтовой плотины с ГЦБД. Разработана конструкция и предложена технология устройства системы поддержания оптимального влажностного режима в зоне твердения глиноцементобетона.

11. Разработаны новые и усовершенствованы существующие системы мониторинга фильтрационного состояния ГП, с целью возможности их применения для контроля фильтрационного состояния ГЦБД, возведённой способом буросекущихся свай.

Результаты исследований, изложенные в настоящей работы, были использованы в проекте строительства грунтовой плотины Нижне-Бурейской ГЭС и использованы при разработке СТП АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» и АО «Ленгидропроект» «Рекомендации по проектированию, расчетам и возведению противofильтрационного элемента из глиноцементобетонных буросекущихся свай». Осуществлённое внедрение разработок настоящей работы позволяет сделать заключение о состоятельности сделанных выводов и создаёт условия для дальнейшего тиражирования предложенного технического решения. Возможным направлением дальнейших исследований по тематике представленной диссертации, является совершенствование нормативно-методической базы проектирования и строительства ГП с ГЦБД способом БСС.

По теме диссертационного исследования опубликованы следующие работы:

В журналах рекомендуемых ВАК для опубликования материалов диссертации:

1. Орищук, Р.Н. Выбор типа противofильтрационного 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.
2. Орищук, Р.Н. Результаты лабораторных исследований фильтрационных характеристик глиноцементобетона/ С.В. Сольский, М.Г. Лопатина, Е.Е. Легина, Н.Л. Орлова, Р.Н. Орищук// Гидротехническое строительство. - 2016. - № 8. - С. 36-42.
3. Орищук, Р.Н. Анализ влияния компонентов глиноцементобетона на его характеристики/ С.В. Сольский, Е.Е. Легина, Р.Н. Орищук, З.Г. Васильева, А.С. Величко // Вестник МГСУ. - 2016. - Т. 10. - С. 80-93.
4. Орищук, Р.Н. 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.
5. Орищук Р.Н. Исследование самозалечивания трещин в глиноцементобетонных диафрагмах (на примере земляной плотины Гоцатлинской ГЭС) // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2017. Т. 283. С. 19-29.
6. Орищук, Р.Н. Анализ структуры фильтрационного потока в грунтовой плотины с глиноцементобетонной диафрагмой (на примере Гоцатлинской ГЭС) / С.В. Сольский,

М.Г. Лопатина, Р.Н. Орищук, Л.А. Фролова, Ю.Ю. Савельева // Гидротехническое строительство. - 2017. - № 7. - С. 14-21.

7. Орищук, Р.Н. Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации глиноцементобетонных диафрагм грунтовых плотин, возводимых методом буресекущихся свай/ Р.Н. Орищук // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. - 2018. - Т. 287. - С. 3-13.

8. Орищук, Р.Н. Полевые исследования по самозалечиванию трещин в противодиффузионном элементе из буресекущихся глиноцементобетонных свай/ О.Н. Котлов, Р.Н. Орищук, Ф.И. Гунышова // Вестник МГСУ. - 2018. - Т. 13. - Вып. 3(114). - С. 322-329.

Патенты на изобретения РФ

1. Орищук Р.Н. [и др.]. Способ контроля глиноцементобетонной диафрагмы в грунтовой плотине/ Патент РФ № 2628447 от 16.08.17.

2. Орищук Р.Н. и др. Способ мониторинга состояния диафрагмы из буресекущихся глиноцементобетонных свай в грунтовой плотине методом электротомографии// Заявка № 2018104597, приоритет от 06.02.18.

Научные работы, опубликованные в других изданиях:

1. Орищук, Р.Н. Глиноцементобетонная противодиффузионная диафрагма 3 и 4 блока Ленинградской АЭС-2/ С.В. Сольский, О.Н. Котлов, Р.Н. Орищук, Н.Л. Орлова // Труды III-ей научно-практической конференции с международным участием «Экологическая безопасность АЭС». – Калининград: Аксиос, 2016, - С. 158-162.

2. Stanislav, V. Solskyi, Roman, N. Orischuk, Natalia, L. Orlova. Model of crack self-healing in clay-cement concrete diaphragm of embankment dam// Budowle piętrzące eksploatacja i monitoring / Instytut Meteorologii I Gospodarki Wodnej. Panstwowy Instytut Badawczy. Warszawa. - 2017. - P. 341-349.

3. Орищук, Р.Н. Обоснование применения глиноцементобетонной противодиффузионной 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.

4. Рекомендации по проектированию, расчетам и возведению противодиффузионного элемента из глиноцементобетонных буресекущихся свай. Под редакцией В.Л. Мильцина, Р.Н. Орищука, С.В. Сольского // СТП 310.02.НТ-2017. - СПб.: АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». - 2017. - 117 с.