

на правах рукописи



Саинов Михаил Петрович

**НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ
ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН С ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫМИ
ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТА**

05.23.07 – Гидротехническое строительство

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Официальные оппоненты:

Беллендир Евгений Николаевич,

доктор технических наук,
АО «Институт Гидропроект»,
генеральный директор

Болдырев Геннадий Григорьевич,

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный
университет архитектуры и строительства»,
кафедра «Геотехника и дорожное строительство»,
профессор

Горохов Евгений Николаевич,

доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный
архитектурно-строительный университет»,
кафедра «Оснований, фундаментов и инженерной
геологии», заведующий кафедрой

Ведущая организация:

**Акционерное общество «Всероссийский
научно-исследовательский институт
гидротехники имени Б.Е.Веденеева»**

Защита состоится «**18**» сентября 2018 г. в 14:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета Д 212.138.03, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, 9 студия «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте www.mgsu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



(подпись)

Бестужева
Александра Станиславовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена исследованиям напряжённо-деформированного состояния противофильтрационных элементов, выполненных из материалов на основе цемента, в основании и теле грунтовых плотин, а также анализу работоспособности их конструкций. Исследования проведены путём численного моделирования.

Актуальность темы исследования обусловлена расширением применения негрунтовых противофильтрационных элементов (далее – ПФЭ) в конструкциях грунтовых плотин и потребностью в создании новых, более совершенных и надёжных ПФЭ для высоких грунтовых плотин. Основными преимуществами негрунтовых ПФЭ являются возможность применения в любых климатических условиях и возможность регулирования свойств их материалов. Для устройства негрунтовых ПФЭ грунтовых плотин часто применяются материалы на основе цемента – бетон, глиноцементобетон, грунтоцементные смеси и др. Это железобетонные экраны каменно-набросных плотин, диафрагмы (стены), выполненные в основании или теле грунтовых плотин методом «стена в грунте», а также цементационные завесы и другие виды ПФЭ.

Каменно-набросные плотины с железобетонным экраном в настоящий момент являются одним из наиболее перспективных типов грунтовых плотин, они часто строятся в странах Азии и Латинской Америки, могут достигать значительной высоты и применяться в самых различных условиях. Актуальным является вопрос о возможности применения каменно-набросных плотин с железобетонным экраном (далее – ЖБЭ) для строительства крупных гидроузлов на востоке России, в слабо освоенных районах с суровым климатом.

Конструкции, возводимые методом «стена в грунте», также очень активно применяются для создания ПФЭ плотин. Этим способом устраиваются противофильтрационные стенки (завесы) для борьбы с фильтрацией в основании плотин, а также в теле тех грунтовых плотин, которые требуют ремонта. Актуальным является вопрос о возможности устройства методом «стена в грунте» противофильтрационных диафрагм во вновь строящихся высоких грунтовых плотинах.

Однако применение каменно-набросных плотин с железобетонным экраном, грунтовых плотин с диафрагмами, устроенными методом «стена в грунте», плотин с цементационными завесами сдерживается недостаточной изученностью условий работы этих ПФЭ, а также отсутствием гарантий обеспечения их прочности и трещиностойкости. В частности, в железобетонных экранах ряда современных сверхвысоких плотин образовывались трещины, которые могли привести к разрушению этих плотин. Актуальным является вопрос о выявлении причин возможного нарушения прочности в тонкостенных негрунтовых ПФЭ.

Цель работы заключается в научном обосновании конструкций грунтовых плотин с негрунтовыми ПФЭ, в формулировании принципов их проектирования, а также создании методики их расчётного обоснования.

Степень разработанности темы. Научное обоснование проектирования негрунтовых ПФЭ в составе грунтовых плотин, его методология в настоящее время разработаны недостаточно. В настоящий момент для расчётов и исследований грунтовых плотин с негрунтовыми ПФЭ применяются разнообразные вычислительные программные комплексы с широкими возможностями (DIANA, PLAXIS, ANSYS и др.). Путём численного моделирования (методом конечных элементов) они позволяют решать задачи о напряжённо-деформированном состоянии (далее – НДС) сооружений как в плоской, так и в пространственной постановке, с учётом нелинейности деформирования грунтов и взаимодействия грунтового массива с негрунтовыми конструкциями.

Однако задачи о работе жёстких тонкостенных конструкций в грунтовом массиве имеют определённые особенности, отличающие их от решения других подобных задач. Во-первых, результат решения этих задач в значительной степени зависит от того, насколько точно модель сооружения и методика выполнения расчётов отражают особенности работы реального сооружения. При расчётах необходимо учитывать нелинейный характер взаимодействия негрунтовых конструкций между собой и с грунтовыми массивом, нелинейный характер деформирования грунтовой среды, последовательность возведения и нагружения сооружения и многие другие факторы. По этим причинам задачи о работе жёстких конструкций в грунтовом массиве могут быть решены только путём численного моделирования. Во-вторых, решение этих задач путём численного моделирования представляет определённые трудности. Основная сложность состоит в обеспечении требуемой точности результата решения задачи. Это связано со значительным различием жёсткости между грунтовым массивом и негрунтовыми конструкциями, а также малой толщиной последних (в случае ЖБЭ или диафрагмы).

В настоящее время отсутствует полноценный анализ условий работы жёстких противифльтрационных конструкций в высоких грунтовых плотинах. Исследования НДС противифльтрационных стен в основании и теле грунтовых плотин очень редки, а имеющиеся примеры ограничиваются решением конкретных задач (Радзинский А.В., Дао Туан Ань, Ding, Zhang). Общей теории работы противифльтрационных стен в основании и теле грунтовых плотин на данный момент не создано. Не до конца решённым является один из важнейших вопросов проектирования противифльтрационных стен – вопрос о выборе материала для их устройства.

Исследования НДС ЖБЭ каменно-набросных плотин выполняются существенно чаще. Этому вопросу посвящены работы ряда зарубежных авторов (Arici, Özel, Mohsen Ghadrhan, Bin Xu и др.). Однако результаты этих исследований довольно противоречивы. В практике проектирования бытует мнение, что железобетонные экраны находятся в состоянии двухосного сжатия, которое не объясняет факты образования трещин в экранах некоторых плотин. На данный момент причины трещинообразования в ЖБЭ каменно-набросных плотин не выявлены. Кроме того, не оценено влияние различных факторов на

НДС ЖБЭ, не решён ряд принципиальных вопросов проектирования плотин данного типа.

Не исследованы вопросы о НДС плотин с ПФЭ в виде инъекционных завес, а также плотин комбинированных конструкций.

Цели и задачи. *Целями* данной работы являются:

- определение условий работы негрунтовых ПФЭ в теле и основании грунтовых плотин,
- выявление причин и зон возможных нарушений их прочности,
- формулирование рекомендаций по проектированию грунтовых плотин с негрунтовыми ПФЭ, выбору типа и совершенствованию их конструкций.

Для достижения поставленной цели были решены следующие *задачи*:

- создана методика численного моделирования НДС в рамках метода конечных элементов, которая позволяет адекватно воспроизводить совместную работу грунтовой плотины с негрунтовыми ПФЭ и учитывать все основные факторы, определяющие НДС этих сооружений;
- разработана вычислительная программа, которая реализует данную методику и позволяет обеспечить необходимую точность получаемых результатов;
- проанализированы данные о деформируемости крупнообломочных грунтов тела высоких грунтовых плотин, установлен интервал изменения их деформативных свойств;
- проведён анализ условий работы негрунтовых противofильтрационных стен в теле и основании грунтовых плотин, выявлено влияние жёсткости материала стены на её прочностное состояние, даны рекомендации о выборе материала для противofильтрационных стен;
- проанализированы условия формирования НДС каменно-набросных плотин с железобетонными экранами, выявлены возможные причины образования трещин в ЖБЭ, исследовано влияние на НДС ЖБЭ различных факторов;
- дана оценка влияния температурных воздействия на НДС и прочность железобетонных экранов каменно-набросных плотин;
- проанализирована работоспособность конструкций плотин с массивными ПФЭ, в т.ч. с инъекционными завесами, даны рекомендации для проектирования плотин данного типа;
- выполнен анализ условий работы грунтовых плотин с комбинацией ПФЭ (железобетонный экран и диафрагма в виде «стены в грунте»), а также НДС комбинированной плотины;
- проанализирована эффективность путей дальнейшего совершенствования конструкций грунтовых плотин с негрунтовыми ПФЭ из материалов на основе цемента;
- сформулированы выводы и рекомендации по проектированию и методике расчётного обоснования конструкций грунтовых плотин с негрунтовыми ПФЭ.

Методология и методы исследований. Анализ работоспособности негрунтовых ПФЭ в теле и основании грунтовых плотин, условий их работы

проводился на основе решения задачи об их НДС при статических нагрузках. НДС сооружений определялось путём численного моделирования методом конечных элементов. Для определения фильтрационных нагрузок на сооружения проводились расчёты фильтрации методом конечных элементов. При фильтрационных расчётах и расчётах НДС использовалась одна и та же конечно-элементная модель сооружения.

Все исследования проводились по созданной автором методике и с помощью вычислительных программ, созданных автором. Автором было показано, что при расчётах НДС грунтовых сооружений жёсткими тонкостенными конструкциями приемлемой точности решения можно добиться только путём применения для моделирования последних конечных элементов высокого порядка. С этой целью был предложен способ создания конечных элементов, который позволяет создавать в них неоднородную степень аппроксимации перемещений.

Созданная методика расчётов позволяет учитывать нелинейный характер деформирования грунтов, а также контактов между элементами конструкции сооружения. Автором предложен и реализован алгоритм расчёта НДС грунтового сооружения, который позволяет учитывать то, что в разных зонах грунтового массива деформирование грунта происходит по разным траекториям нагружения (активное нагружение и/или разгрузка).

Достоверность полученных результатов исследований обеспечивается, тем что

- *теория* численного моделирования НДС грунтовых сооружений построена на использовании хорошо известного, теоретически обоснованного и многократно апробированного метода конечных элементов, а также на использовании закономерностей теории механики грунтов,

- *идея базируется* на учёте при численном моделировании важнейших факторов, определяющих реальные условия формирования НДС негрунтовых ПФЭ и окружающего грунтового массива, на использовании эмпирических данных о деформируемости, прочности грунтов и цементосодержащих материалов,

- при составлении численных моделей сооружений *использованы* конечные элементы повышенной точности,

- для составления численных моделей каменно-набросных плотин *использованы* данные о деформируемости каменной наброски, полученные другими исследователями путём экспериментальных и натуральных исследований,

- результаты численного моделирования *согласуются* с опубликованными данными натуральных наблюдений за работой грунтовых плотин, а также с результатами, полученными простыми аналитическими методами, и результатами расчётов, проведённых с помощью сертифицированного программного комплекса ANSYS,

- *установлено качественное и количественное совпадение* результатов численного моделирования с имеющимися результатами натуральных наблюдений, а в простых задачах – с результатами, полученными по программе ANSYS.

Научная новизна работы состоит в следующем:

-*предложены* принципы решения задач о НДС грунтовых сооружений с негрунтовыми конструкциями, показана обязательность учёта при расчётах нелинейного характера взаимодействия элементов конструкции плотины между собой, а также технологической схемы возведения и нагружения сооружения,

-*разработаны* методика и алгоритм численного решения задачи о пространственном НДС грунтовых сооружений, которые позволяют наиболее достоверно моделировать работу тонких жёстких конструкций во взаимодействии с грунтовым массивом,

-*разработана* универсальная компьютерная программа, которая позволяет исследовать НДС грунтовых сооружений с тонкими жёсткими негрунтовыми конструкциями,

-*выявлены* особенности НДС противofильтрационных стен в основании и теле грунтовых плотин – возможность возникновения в них значительных сжимающих продольных усилий, изгиба в трёх плоскостях, *выявлено* влияние на НДС противofильтрационных стен неоднородности строения основания и граничных условий,

-*выявлены* причины и зоны возможного нарушения прочности противofильтрационных стен (с учётом изменения прочности материала стены в зависимости от вида напряжённого состояния), *предложены* меры, позволяющие улучшить прочностное состояние противofильтрационных стен,

-*выявлены* особенности НДС железобетонных экранов каменно-набросных плотин – возможность возникновения значительных растягивающих продольных усилий в направлении вдоль откоса, значительных сжимающих напряжений в направлении от борта к борту, а также изгиба в трёх плоскостях,

-*определено* влияние на формирование пространственного НДС железобетонных экранов каменно-набросных плотин различных факторов (геометрия створа, деформируемость каменной наброски, высота плотины и последовательность её возведения, разрезка деформационными швами и др.),

-*установлены* причины и зоны возможного возникновения трещин в железобетонных экранах каменно-набросных плотин (за счёт нарушения прочности на растяжение и сжатие), *предложены* рекомендации по повышению надёжности работы железобетонных экранов,

-*установлена* степень влияния температурных воздействий на НДС железобетонных экранов каменно-набросных плотин, *обоснована* возможность применения данного типа плотин в суровых климатических условиях,

-*выявлены* особенности НДС грунтовых плотин с массивными негрунтовыми ПФЭ из цементосодержащих материалов (экран, ядро, инъекционная завеса), определено влияние на их НДС различных факторов, дана оценка работоспособности этих видов ПФЭ,

-*обоснована* возможность применения конструкций типа «стена в грунте» в качестве противofильтрационных диафрагм грунтовых плотин, в т.ч. **высоких**,

-выполнена оценка работоспособности конструкции комбинированных плотин, включающих в себя бетонное и грунтовое сооружения,

- предложена и обоснована конструкция грунтовой плотины с комбинацией двух тонкостенных негрунтовых ПФЭ (глиноцементобетонной диафрагмы и железобетонного экрана).

Теоретическая значимость работы заключается в следующем:

- применительно к проблематике диссертации результативно использовано численное моделирование для получения новых знаний о НДС и работоспособности различных видов негрунтовых противофильтрационных конструкций в основании и теле грунтовых плотин,

- проведена модернизация численной методики исследований НДС жёстких негрунтовых конструкций в грунтовых сооружениях на основе метода конечных элементов, позволившая получить новые научные результаты,

- изложены алгоритмы численного моделирования работы жёстких негрунтовых конструкций грунтовых плотин,

- изучены особенности и раскрыты закономерности формирования НДС различных типов негрунтовых ПФЭ (экраны, диафрагмы, завесы) грунтовых плотин, изучено влияние различных факторов на их НДС,

- изучено влияние характера пространственного напряжённого состояния материала противофильтрационных стен (глиноцементобетон) на его прочность,

- выявлены (раскрыты) причины нарушения прочности в железобетонных экранах и других видах (как тонкостенных, так и как массивных) негрунтовых ПФЭ грунтовых плотин, сформулированы рекомендации по повышению надёжности их работы,

- обоснована возможность устройства методом «стена в грунте» противофильтрационной диафрагмы в теле высокой грунтовой плотины,

- обоснована возможность применения каменно-набросных плотин с железобетонными экранами в суровых климатических условиях.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

- разработана вычислительная компьютерная программа, позволяющая проводить исследования НДС грунтовых сооружений с негрунтовыми конструкциями (включая тонкостенные) с учётом истории формирования НДС и нелинейного характера деформирования среды при восприятии нагрузок,

- представлены результаты расчётного обоснования конструкций ряда реальных грунтовых плотин с тонкостенными негрунтовыми ПФЭ,

- представлены результаты анализа работоспособности типа высокой грунтовой плотины с ПФЭ в виде инъекционной завесы, сформулированы условия, при которых данный тип плотин может быть применён,

- представлены результаты анализа экспериментальных и натурных данных о деформируемости каменной наброски,

- обоснован низкий уровень работоспособности комбинированных плотин, состоящих из массивного бетонного сооружения и из грунтового сооружения с ПФЭ в виде железобетонного экрана,

- обоснованы преимущества применения грунтовой плотины с ПФЭ комбинированного типа, состоящего из железобетонного экрана и диафрагмы, возведённой методом «стена в грунте».

- *представлены* эмпирические зависимости, позволяющие на предварительных стадиях проектирования оценить НДС и прочность тонкостенных негрунтовых ПФЭ (экранов, диафрагм) в теле и основании грунтовых плотин, а также выбрать параметры ПФЭ, обеспечивающие их работоспособность,

- *сформулированы рекомендации* по выбору материала для противофильтрационных стен в основании и теле грунтовых плотин, для инъекционных завес в нескальных грунтах,

- *сформулированы рекомендации* по повышению работоспособности, по улучшению прочностного состояния различных видов негрунтовых ПФЭ грунтовых плотин,

- *представлены предложения* по дальнейшему совершенствованию конструкций грунтовых плотин комбинации негрунтовых ПФЭ разных видов.

Положения, выносимые на защиту:

- методика численных исследований НДС грунтовых сооружений, включающих в себя жёсткие негрунтовые конструкции,

- результаты анализа НДС негрунтовых ПФЭ в теле и основании грунтовых плотин, выводы о причинах возможного нарушения их прочности,

- результаты анализа влияния различных факторов на НДС тонких и массивных негрунтовых ПФЭ грунтовых плотин, а также эмпирические зависимости, отражающие это влияние,

- рекомендации по совершенствованию конструкций плотин с негрунтовыми ПФЭ, по выбору материала для их устройства,

- рекомендации по выбору конструкций плотин с комбинацией ПФЭ.

Личный вклад автора заключается в постановке задачи исследований, разработке методики расчётов НДС грунтовых плотин с тонкостенными негрунтовыми ПФЭ, создании реализующей её вычислительной программы, выполнении численных исследований, обработке, анализе и обобщении их результатов, а также в формулировании выводов и рекомендаций.

Апробация результатов работы проводилась путём публикации статей в научных журналах и в виде докладов на научных конференциях. Были сделаны доклады на конференции «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (НИУ МГСУ, 2017 г.), второй научно-технической конференции ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» (2006 г.), на XXI российско-польско-словацком семинаре «Теоретические основы строительства» (САФУ, 2012 г.).

Научные результаты достаточно полно изложены в 40 печатных работах, в т.ч. 34 статьи опубликованы в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень рецензируемых научных изданий), из которых 9 – опубликованы в изданиях, индексируемых международными реферативными базами Scopus и Web of Science.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация включает в себя введение и 7 глав. Она оформлена в виде двух томов и включает в себя 539 страниц машинописного текста (без учёта приложений, 315 страниц в томе 1, 224 страницы в томе 2), 295 рисунков и 17 таблиц. Список литературы включает в себя 274 источника.

Во **введении** обосновывается актуальность выполненной работы, оценивается степень разработанности рассматриваемой темы, приводятся сведения о применённых методах исследований и их достоверности, раскрывается научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также описывается личный вклад автора, приводятся сведения об апробации результатов работы.

Глава 1 представляет собой обзор применения негрунтовых противифльтрационных конструкций при строительстве грунтовых плотин, выполненный на основе научно-технической литературы, а также анализ перспектив их дальнейшего использования и совершенствования.

История и опыт применения негрунтовых ПФЭ показывают, что несмотря на значительный прогресс в области строительного материаловедения и строительных технологий в настоящий момент нет конструктивных решений, которые бы гарантировали надёжность работы сверхвысоких плотин. Соответственно в качестве задач исследования были поставлены следующие: во-первых, выявить причины возможных нарушений прочности негрунтовых ПФЭ, а во-вторых, сформулировать рекомендации по повышению надёжности их работы. На основе анализа тенденций развития гидротехнического строительства был сделан вывод о том, что для обеспечения надёжности сверхвысоких плотин целесообразно использовать комбинированные конструкции ПФЭ.

Глава 2 посвящена принципам моделирования работы грунтовых плотин с негрунтовыми конструкциями.

Были выделены основные факторы, которые определяют условия восприятия сооружением внешних нагрузок и формирования его НДС:

- технологическая схема возведения грунтовой плотины и её негрунтового ПФЭ,
- возможность проявления нелинейных эффектов на контактах негрунтовых конструкций между собой и с грунтовым массивом (таких как проскальзывание, отлипание),
- нелинейный характер деформирования грунтовой среды в процессе восприятия внешних нагрузок.

Эти факторы необходимо учитывать при решении задачи об НДС грунтовых плотин с негрунтовыми конструкциями, чтобы получать достоверные результаты её решения.

Был проведён анализ деформируемости каменной наброски, из которой возводятся высокие грунтовые плотины. Путём обработки многочисленных экспериментальных данных стабилметрических испытаний каменной наброски (в основном это данные Марсала, Марачи, Гупта) были получены

эмпирические зависимости для изменения модулей деформации камня (горной массы, гравийно-галечникового грунта) в зависимости от его обжатия (т.е. минимальных сжимающих напряжений). Эти зависимости имеют вид степенной функции, что соответствует данным, полученным другими авторами (модели Дункана-Чанга, Л.Н.Рассказова). Были определены параметры этих эмпирических зависимостей, характеризующих деформируемость камня.

Однако опыт показывает, что лабораторные эксперименты часто не соответствуют условиям работы каменной наброски в сооружении. Во-первых, из-за ограниченных размеров приборов вместо реальных испытывают модельные грунты, а, во-вторых, плотность исследуемого грунта меньше той, до которой уплотняют каменную наброску в теле плотины. Поэтому параметры нелинейной модели были скорректированы в сторону снижения деформируемости каменной наброски.

Чтобы проверить возможность использования полученных зависимостей и параметров деформируемости каменной наброски для решения задач НДС, было проведено их сравнение с данными натуральных наблюдений. Использовались данные о максимальных строительных осадках ряда плотины, собранных другими авторами (рисунок 1).

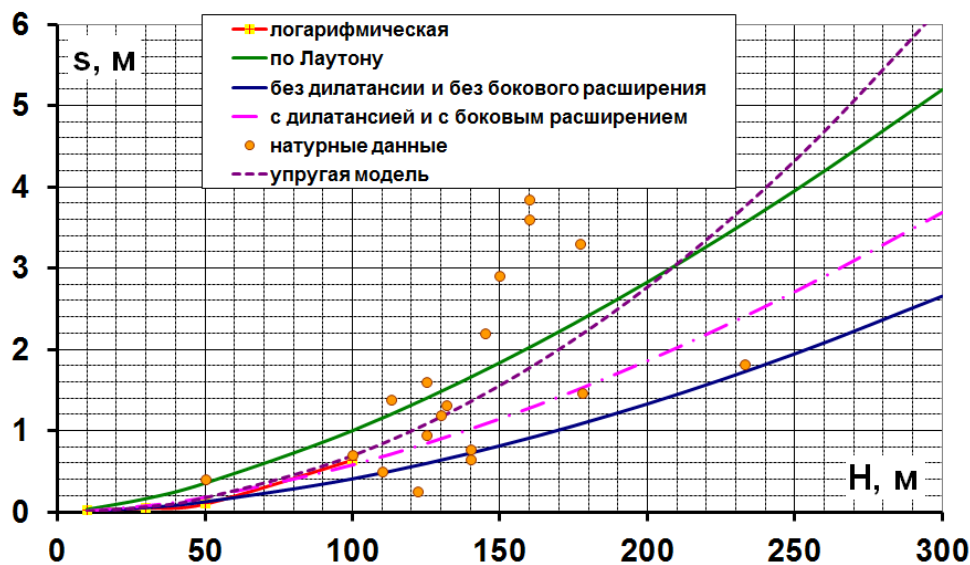


Рисунок 1 - Результаты расчёта максимальных осадок плотин s различной высоты H по разным формулам

Для возможности сравнения была выведена полуэмпирическая формула для определения максимальной осадки однородной грунтовой плотины от собственного веса (при условии, что максимум строительных осадок находится в середине по высоте плотины):

$$u_{H/2} = \frac{H^{2-k} \gamma^{1-k} (1+k)}{4 E_{1p}} k_{\Delta}, \quad (1)$$

где H – высота плотины (м);
 γ – удельный вес камня (тс/м³),

k_{Δ} – коэффициент влияния формы профиля плотины ($\approx 0,83$).

E_{1p} , k – параметры степенной зависимости роста модуля деформации материала плотины в зависимости от вертикальной нагрузки p :

$$E_p = E_{1p} p^k. \quad (2)$$

Для выбранных параметров деформируемости горной массы были получены $E_{1p} = 1752 \text{ тс/м}^2$ и $k = 0,317$.

Для модели линейно деформируемой среды величина E_p выражается через модуль линейной деформации E и коэффициент бокового расширения β :

$$E_p = E / \beta. \quad (3)$$

Сравнение показало, что выбранные параметры деформируемости каменной наброски входят в интервал возможных значений (рисунок 1) и соответствует каменной наброске, средней по деформируемости. Выбранные деформативные свойства камня примерно соответствуют модулю линейной деформации $60 \div 90 \text{ МПа}$ (в модели линейно деформируемой среды).

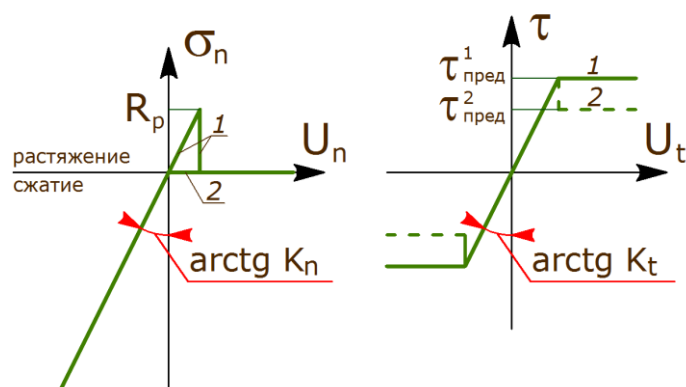
Однако анализ осадок реальных плотин показал, что они изменяются в очень широких пределах – от $0,2\%$ до 4% от высоты плотины. Это говорит о том, что деформируемость каменной наброски может быть как существенно ниже, так и существенной выше той, которая выбрана нами на основе данных экспериментальных исследований.

Обзор зарубежных источников показал, что в верхнюю часть плотины укладывают камень с модулем линейной деформации от 100 до 500 МПа . Грунт с модулем деформации около 60 МПа соответствует несортированной каменной наброске с невысоким качеством уплотнения, которую укладывают в низовую часть плотины. Поэтому за рубежом при численном моделировании грунтовых плотин как правило используют параметры модели, соответствующие деформируемости камня примерно в $2-3$ ниже, чем была получена нами.

Можно сделать вывод, что из-за отсутствия на данном этапе достоверных экспериментальных данных о деформируемости каменной наброски в теле плотины, для расчётов можно применять любую модель грунта, даже модель линейно деформируемого тела. Нами для моделирования нелинейного характера деформирования камня нами была выбрана модель грунта, предложенная профессором Л.Н.Рассказовым, т.к. помимо влияния обжатия она позволяет учитывать влияние и многих других нелинейных эффектов.

При моделировании поведения грунтов был учтён эффект различия деформируемости грунтов для траекторий активного нагружения и разгрузки, предложен алгоритм расчёта с учётом наличия двух траекторий нагружения.

Для моделирования поведения контактов негрунтовых конструкций между собой (в швах, трещинах) и с грунтовыми массивом была использована модель Кулона-Мора, предусматривающая линейную зависимость между приращениями напряжений и приращениями перемещений до момента нарушения прочности на растяжение или сдвиг (рисунок 2).



а) поперёк плоскости контакта; б) вдоль плоскости контакта;

Рисунок 2 - Расчётная модель поведения контактов.

1 – поведение при первом нарушении прочности, 2 – поведение при повторном нарушении прочности.

Глава 3 посвящена методике численного моделирования, разработанной автором для решения задач о НДС грунтовых плотин с негрунтовыми ПФЭ и реализованной в вычислительной программе NDS_N. В главе описаны основные зависимости и алгоритмы, которые составляют методику расчётов и используются в вычислительной программе.

Методика расчётов основана на методе конечных элементов (МКЭ), в котором модель сооружения создаётся путём его разбиения на отдельные конечные элементы, имеющие общие степени свободы. Для моделирования контактного взаимодействия между собой отдельных частей сооружения в модель сооружения вводятся конечные элементы специального типа – контактные конечные элементы.

В данной работе было показано, что моделирование грунтовых плотин с тонкостенными негрунтовыми конструкциями в рамках МКЭ требует особого подхода. Это вызвано тем, что некоторые виды негрунтовых ПФЭ плотин имеют малую толщину и выполняются из жёстких материалов. Модуль деформации материалов, выполненных на основе цемента, может в десятки и сотни раз превышать модуль деформации грунта. Значительное отличие жёсткости негрунтовых ПФЭ от грунтового массива создаёт определённые вычислительные сложности и снижает точность получаемых результатов. Нами было показано, что в большинстве случаев для моделирования тонкостенных негрунтовых конструкций нельзя применять простые объёмные (или плоские) конечные элементы, а необходимо использовать конечные элементы высокого порядка, с квадратичной, а иногда и кубической аппроксимацией перемещений внутри элемента.

Т.к. при решении пространственных задач с большим количеством конечных элементов использование элементов высокого порядка затруднительно с точки зрения использования ресурсов ЭВМ, поэтому в модели сооружения целесообразно сочетать конечные элементы разной точности. Нами было показано, что точность решения практически не

изменится, если использовать конечные элементы высокого порядка только для моделирования тонкостенных ПФЭ и прилегающих к ней областей грунта, а остальные части сооружения моделировать более простыми элементами.

Однако в этом случае возникает проблема сопряжения конечных элементов разного порядка – оно может привести к нарушению базового принципа МКЭ – принципа совместности перемещений. Чтобы не допустить этого, нами был разработан специальный подход к созданию конечных элементов высокого порядка. Он заключается в том, чтобы повышение степени аппроксимации перемещений внутри элемента осуществлять не через узловые, а через внеузловые степени свободы. Такой подход позволяет удобно создавать конечные элементы с неоднородной степенью аппроксимации перемещений внутри элемента и соответственно правильно сопрягать конечные элементы разного порядка.

Для поиска неизвестных перемещения степеней свободы (узловых и внеузловых) сооружения использовался традиционный для МКЭ подход – определение перемещений из решения системы линейных алгебраических уравнений МКЭ. Однако для того, чтобы учесть последовательность возведения и нагружения сооружения, а также нелинейность деформирования среды, эта система формировалась и решалась не один, а несколько раз, отдельно для каждого из расчётных моментов времени.

Алгоритм решения задачи НДС состоит из 3 циклов, вложенных друг в друга.

Первый (внешний) цикл – это цикл по ряду моментов времени (этапов), отражающих изменение расчётной схемы сооружения. Он позволяет учесть последовательность возведения сооружения и приложения к нему нагрузок.

Второй цикл – это цикл по траекториям и стадиям приложения нагрузки в рамках одного момента времени. Сначала выполняется расчёт для траектории разгрузки (упругого деформирования), по результатам которого выделяется та часть приложенных сил, которая воспринимается грунтом как активное нагружение. Далее осуществляется расчёт для траектории активного нагружения. Он ведётся на ранее определённую часть приложенных сил. Как правило данный расчёт осуществляется в несколько стадий, чтобы более точно воспроизвести нелинейность деформирования грунтов монотонного характера. На каждой из стадий расчёта к сооружению прикладывается часть (доля) внешних сил и решается задача об изменении НДС сооружения. Деформативные свойства материалов изменяются на каждой из стадий расчёта в соответствии с их моделью. Приложение внешних нагрузок частями позволяет заменить решение нелинейной задачи на решение ряда линейных задач и не использовать итерационный процесс при её решении.

Третий (внутренний) цикл – это цикл итераций в рамках каждой из стадий (долей) приложения нагрузки. Итерационный процесс необходим для учёта проявлений эффектов нелинейного поведения грунтов и контактов, который характеризуется резким, скачкообразным характером изменения. К таким эффектам относится, например, “отлипание” контакта при нарушении прочности на растяжение, проскальзывание контакта при нарушении его

прочности на сдвиг, а также нарушение целостности грунта при нарушении прочности на растяжение. В рамках итерационного процесса матрица жёсткости системы остаётся неизменной, а учёт нелинейности осуществляется методом переменного вектора сил.

Тестирование созданной вычислительной программы проводилось на примере решения простых задач путём сравнения с аналитическим решением или с решением, полученным с помощью сертифицированного программного комплекса ANSYS. Оно подтвердило пригодность созданной вычислительной программы.

Созданная вычислительная программа позволяет вести расчёт сооружения на нагрузки, созданные фильтрационным потоком и температурным воздействием. Для определения фильтрационных нагрузок была создана вычислительная программа, которая позволяет решать задачи о стационарном фильтрационном режиме сооружения, используя ту же конечно-элементную модель, что и для задачи НДС.

Глава 4 посвящена исследованиям работы противофильтрационных конструкций, устроенных методом «стена в грунте». С помощью численного моделирования было исследовано НДС противофильтрационных стен, выполненных как в основании, так и в теле грунтовых плотин.

При расчётах НДС противофильтрационных стен учитывалась технологическая схема их возведения. Сначала рассматривался момент времени, когда свая или траншея заполнена незатвердевшим материалом и воспринимает собственный вес, имея возможность проскальзывать относительно стенок прорези. А уже затем, когда её материал набрал нужную прочность, в последующий момент времени на стену прикладывались внешние нагрузки.

При исследованиях решался вопрос о выборе материала стены. На практике для устройства противофильтрационных стен часто используют глиноцементобетон, содержащий помимо цемента бентонит. Добавление бентонита позволяет снизить деформируемость материала стены, но снижает его прочность. В зависимости от содержания бентонита деформативные и прочностные свойства глиноцементобетона изменяются в широком диапазоне. Соответственно и возникает дилемма выбора материала для стены. В данном исследовании рассматривался ряд вариантов материалов от литого глиноцементобетона (модуль деформации $E \approx 100$ МПа) до железобетона ($E = 29000$ МПа).

Для оценки прочности глиноцементобетона использовалась эмпирическая зависимость между модулем деформации E (МПа) и прочностью глиноцементобетона на одноосное сжатие R_1 , полученная путём обработки результатов экспериментов (рисунок 3), выполненных А.В.Радзинским. Она выражается следующей формулой:

$$R_1 = 0,29 E^{0,32}. \quad (4)$$

При оценке прочности глиноцементобетона учитывался эффект повышения его прочности на сжатие при наличии бокового обжатия, установленный многочисленными экспериментами. Для определения прочности с учётом обжатия R использовалась формула, полученная из теории Кулона-Мора:

$$R = R_1 + \sigma_1 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, \quad (5)$$

где σ_1 – напряжение обжатия, φ – угол внутреннего трения.

φ как правило находится в диапазоне $30 \div 40^\circ$.

Исследования работы противофильтрационных стен в основании грунтовых плотин были проведены на примере трёх реальных плотин: Юмагузинской (Россия), Керхе (Иран), Сиалонгди (Китай), а также для ряда методических задач. Нами было установлено, что основной особенностью работы стен, выполненных в основании грунтовых плотин, является наличие значительных вертикальных продольных сжимающих усилий, которые образуются вследствие осадок основания под весом плотины. Чем выше модуль деформации материала стены $E_{ст}$ по сравнению с модулем деформации грунта основания $E_{гр}$, тем больше в нём вертикальные сжимающие напряжения σ_y . Однако эта зависимость не прямо пропорциональна (рисунок 4), она «отстаёт» от линейной зависимости. Нами было установлено, что для определения максимальных значений σ_y на начальном интервале $E_{ст}/E_{гр}$ может применяться эмпирическая степенная функция:

$$\frac{\sigma_y^{\max}}{p} = A \left(\frac{E_{ст}}{E_{гр}} \right)^n. \quad (6)$$

Здесь p – давление, которое передаётся плотиной на основание, A, n – эмпирические величины.

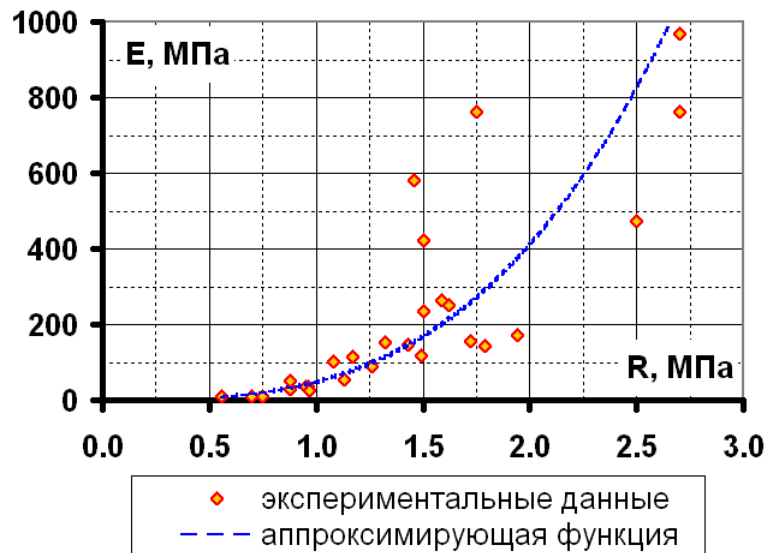


Рисунок 3 - Эмпирическая зависимость между деформируемостью и прочностью глиноцементобетона на сжатие

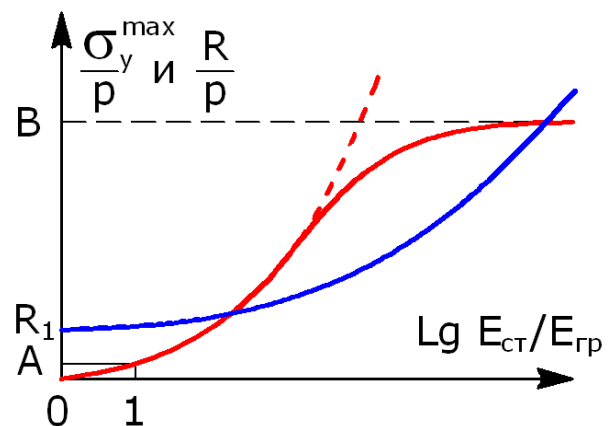


Рисунок 4 - Характер изменения сжимающих напряжений и прочности стены в зависимости модуля деформации её материала. Красная линия соответствует напряжениям, синяя – прочности.

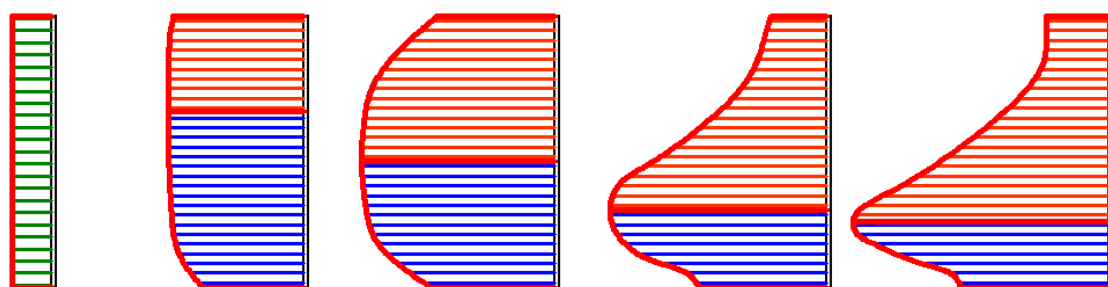
Величины A и n во многом определяются влиянием граничных условий (висячая стена или опёртая на жёсткое основание). В стенах-стойках уровень сжатия выше, чем в висячих стенах. При отсутствии дополнительных вертикальных усилий, передаваемых на стену, $A=1$. Величина n во многом определяется деформативными и прочностными свойствами окружающих грунтов. Величина n всегда меньше 1. Для стен в полускальных и крупнообломочных грунтах основания $n \approx 0,7 \div 0,8$.

Основная причина нелинейности зависимости между $\frac{\sigma_y^{\max}}{p}$ и $\frac{E_{ст}}{E_{гр}}$ состоит

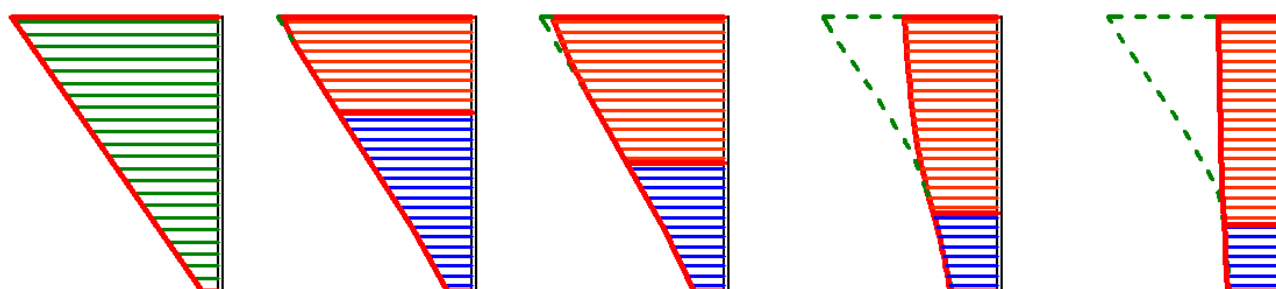
в том, что стена работает как свая – она имеет возможность компенсировать уровень сжатия путём передачи нагрузки на окружающие грунты через боковое трение или через лобовое сопротивление по торцам.

Было выявлено, что большое значение на формирование НДС стены имеет трение между стеной и окружающим грунтом. При повышенной жёсткости стены разность осадок между стеной и грунтом нарастает и происходит проскальзывание грунта относительно стены за счёт потери прочности контакта на сдвиг. Потеря прочности контакта происходит постепенно, сверху, где сопротивление сдвигу меньше, вниз. За счёт этого в нижней части концентрируются значительные сжимающие напряжения (рисунок 5).

а) Вертикальные нормальные напряжения σ_y :



б) Осадки (U_y):



$$\frac{E_{ст}}{E_{гр}} = 1 \quad \rightarrow \quad \frac{E_{ст}}{E_{гр}} = 5 \quad \rightarrow \quad \frac{E_{ст}}{E_{гр}} \approx 10 \quad \rightarrow \quad \frac{E_{ст}}{E_{гр}} > 50$$

Рисунок 5 - Изменение формы эпюры вертикальных напряжений и эпюры осадок висячей стены с ростом жёсткости её материала.

Красным цветом заштрихована зона накопления сжимающих напряжений, синим – зона уменьшения сжимающих напряжений. Пунктирной линией показана эпюра осадок грунта.

Из-за проскальзывания существует предел роста сжимающих напряжений в стене (рисунок 4) и граница применимости степенной зависимости (6). Этот предел соответствует случаю, когда проскальзывание происходит по всей длине контакта. Это характерно для случая применения в стене очень жёстких материалов (примерно $E_{ст}/E_{гр}>50$).

Для описания характера нелинейной зависимости между $\frac{\sigma_y^{max}}{p}$ и $\frac{E_{ст}}{E_{гр}}$ на

всём диапазоне жёсткости её материала была предложена следующая функция:

$$\frac{\sigma_y^{max}}{p} = \frac{B E_{ст}}{(B/A - 1)E_{гр} + E_{ст}}, \quad (7)$$

где A , B – эмпирические коэффициенты, которые могут быть приближенно определены из простых аналитических расчётных схем.

Анализ показывает, что при увеличении жёсткости материала стены сжимающие напряжения в нём растут интенсивнее нежели, чем увеличивается его прочность на сжатие (показатель степени $n>0,32$), поэтому применение жёстких материалов в стене нецелесообразно (рисунок 4). Можно рекомендовать использовать материалы, для которых $E_{ст}/E_{гр}$ не более $2\div 5$.

Часто применение литого глиноцементобетона с $E=100\div 200$ МПа оказывается наиболее целесообразным. В случае применения этого материала боковое обжатие стены существенно увеличивает прочность глиноцементобетона на сжатие и создаёт необходимый запас прочности. Наиболее неблагоприятны условия работы стены в тех зонах, где боковое обжатие отсутствует.

Однако существуют случаи, когда допустимо применять для противофильтрационных стен и железобетон. Такое возможно при небольшой глубине стен и при слабом развитии изгибных деформаций.

Изгибные деформации, которые возникают при восприятии стенами горизонтальных фильтрационных сил, представляют опасность для надёжности противофильтрационных стен, выполненных из жёстких материалов. Деформации изгиба могут привести к появлению в стене значительных растягивающих напряжений и образованию трещин отрыва. По этой причине не рекомендуется использование железобетона для устройства стен. При $E_{ст}/E_{гр}<50$ изгибные деформации мало влияют на напряжённое состояние стены.

Исследования показали, что неблагоприятные условия работы стены имеют место при неоднородном строении грунтового массива. В слоях повышенной деформируемости образуются зоны концентрации сжимающих напряжений σ_y , а на границах слоёв стена испытывает дополнительные изгибные деформации. НДС стены в неоднородном основании может оказаться даже хуже, чем в случае, если основание – однородно и сложено самым слабым из грунтов. В случае неоднородного строения основания материал стены должен практически совпадать по своей деформируемости с самым слабым из вмещающих его грунтов.

Нежелательным при устройстве стен является их сопряжение с телом плотины в виде высоких тонких консолей. Консоли концентрируют в себе значительные сжимающие усилия, которые могут ухудшить НДС стены, а также могут ненадёжно работать при восприятии горизонтальных смещений. Рекомендуется сопрягать стену с телом плотины путём устройства над оголовком стены бетонной галереи (с устройством зазора между ними).

Исследования пространственной работы противofильтрационной стены в основании Юмагузинской плотины показали, что стены могут испытывать изгибные деформации даже в плоскости самой стены. Такие деформации возникают в том случае, если осадки основания неравномерно распределены вдоль створа. В этих условиях в стене могут возникнуть растягивающие напряжения в направлении от борта к борту.

Исследования работы противofильтрационных стен, устраиваемых в теле грунтовых плотин, были проведены для двух случаев. Первый – когда методом «стена в грунте» устраивается новый противofильтрационный элемент плотины взамен вышедшего из строя глинистого ядра. Второй случай – когда «стена в грунте» изначально устраивается как основной противofильтрационный элемент грунтовой плотины.

Расчёты показали, что отличительной особенностью стен, устраиваемых в теле грунтовых плотин является то, что чаще всего они не испытывают сжимающих продольных усилий, а работают только на изгиб. Поэтому для таких стен наибольшую опасность представляют растягивающие напряжения, которые могут возникнуть в стене в результате её изгиба под действием горизонтальных сил.

Исследования условий работы стены в теле аварийной плотины были проведены на примере Курейской плотины, в глинистом ядре которой летом 1992 года образовались сквозные трещины. Для ремонта плотины методом буросекущихся свай была возведена стена из литого глиноцементобетона.

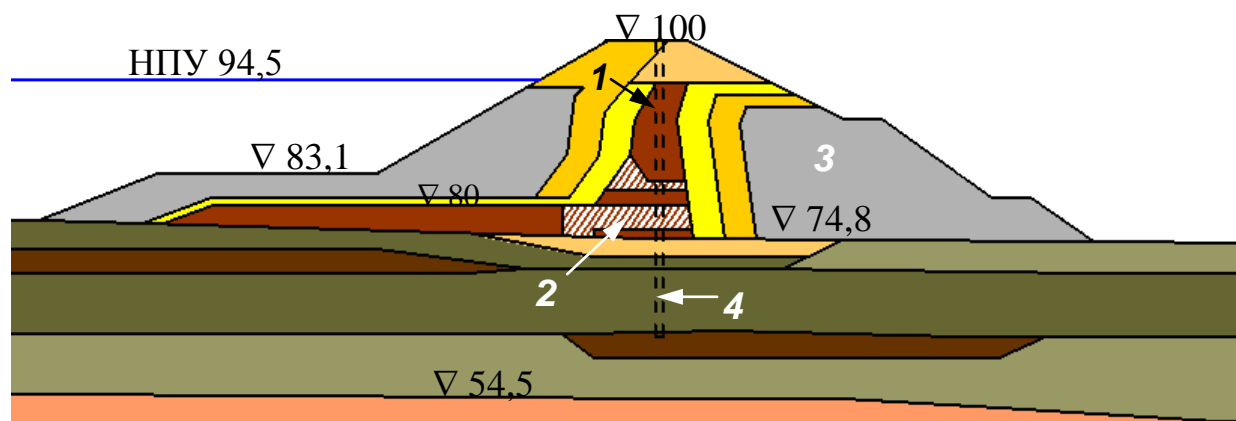


Рисунок 6 - Конструкция плотины в расчётном сечении (ПК 7+27).

1 – ядро плотины из суглинки; 2 – зоны нарушений в ядре плотины; 3 – упорная призма из горной массы; 4 – местоположение противofильтрационной стены, выполненной для ремонта плотины.

Особенностью работы противофильтрационных стен в теле ремонтируемой плотины является то, что горизонтальные нагрузки на неё передаются уже тогда, когда её материал не затвердел, – возведение водонепроницаемой стены изменяет картину фильтрации через аварийную стену. Чтобы определить условия формирования фильтрационных нагрузок на сваи, были проведены фильтрационные расчёты в пространственной постановке для случая нестационарного режима.

Расчёты показали, что нарастание фильтрационных нагрузок на сваи происходит довольно быстро, но скорость их нарастания в большей степени определяется схемой и скоростью возведения стены. Т.к. бурящиеся сваи возводятся медленно, со скоростью 1÷2 сваи в сутки, то процесс формирования фильтрационной нагрузки занимает несколько суток (рисунок 7).

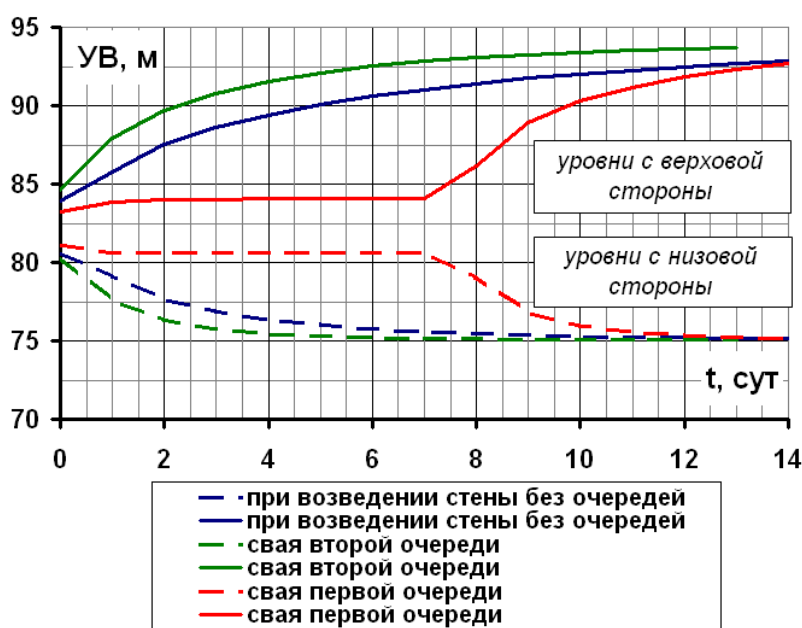


Рисунок 7 - Изменение уровней фильтрационного потока вокруг сваи при возведении стены в грунте

Если стена возводится в две очереди (через одну сваю), то этот процесс ещё больше растягивается по времени. Поэтому к моменту формирования фильтрационных сил глиноцементобетон сможет набрать 40÷60% прочности.

С точки зрения прочности стены более опасным является случай, когда к моменту формирования фильтрационных нагрузок, глиноцементобетон уже затвердеет, т.к. в этом случае из-за низкой деформируемости он становится более восприимчив к изгибным деформациям. Расчёты показали, что опасность могут представлять местные, локальные изгибные деформации, которые возникают на тех участках стены, которые пересекают зоны фильтрационных нарушений.

При расчётах НДС Курейской плотины моделировались просадки тела плотины и образование в нём зон грунта нарушенной структуры.

Расчёты показали, что если использовать в стене литой глиноцементобетон ($E < 200$ МПа), то растягивающих напряжений в стене не

возникнет – они будут “задавлены” собственным весом стены. Если стену выполнить из железобетона, в ней неминуемо образуются трещины.

Исследования работы стен, изначально устраиваемых в качестве противодиффузионных диафрагм грунтовых плотин, были проведены на примере строящейся Нижне-Бурейской плотины и плотины Гоцатлинской ГЭС.

Расчёты НДС диафрагмы для условий Нижне-Бурейской плотины показали, что диафрагма, устроенная методом «стена в грунте», может быть надёжным противодиффузионным элементом этой средненапорной плотины (высотой 39 м), если модуль деформации её материала не превысит 500 МПа.

Более сложные условия работы характерны для диафрагмы в теле и основании Гоцатлинской плотины (высота 69 м) (рисунок 8). При проектировании данной плотины специалисты Гидроспецпроекта предложили альтернативный вариант её конструкции – плотину с многоярусной диафрагмой, выполненной из буросекущихся свай. Каждый ярус диафрагмы имеет высоту около 30 м, ярусы соединяются друг с другом через плиты, заранее уложенные в тело плотины.

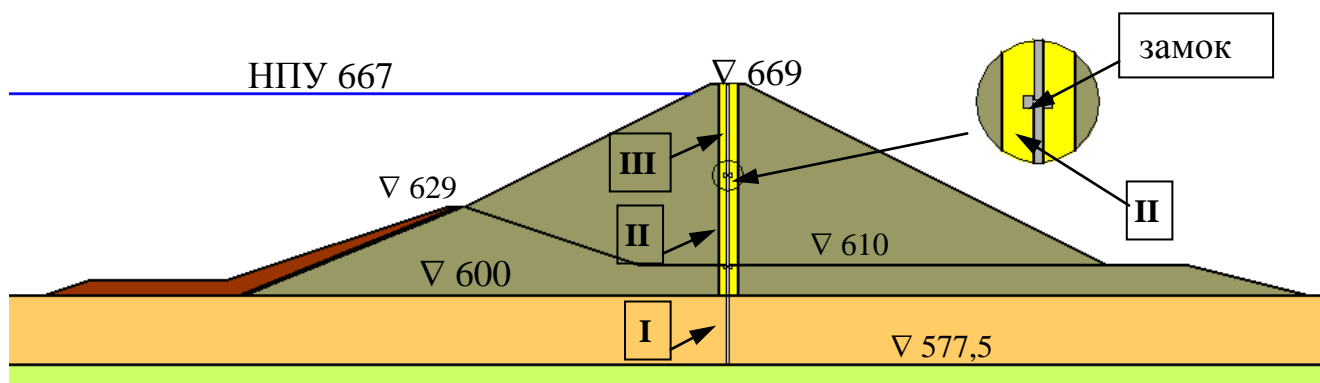


Рисунок 8 - Конструкция высокой грунтовой плотины с диафрагмой, возведённой поярусно методом «стена в грунте». I, II, III – ярусы стены.

Расчёты в плоской постановке показали, что условия каждого из ярусов сильно различаются. Средний и нижний ярусы (в отличие от верхнего) испытывают сжимающие усилия от осадок тела плотины и основания. Самое неблагоприятное НДС имеет нижний ярус диафрагмы, пересекающий слой нескального основания. Его прочность на сжатие может быть обеспечена только при условии применения глиноцементобетона с $E < 500$ МПа. Возводить диафрагму из бетона – не допустимо, т.к. тогда сжимающие усилия в нижнем ярусе превысят прочность бетона на сжатие, а в среднем и верхних ярусах следует ожидать появления растягивающих напряжений после наполнения водохранилища.

Были проведены исследования работы многоярусной диафрагмы и в пространственной постановке, т.к. створ плотины довольно узкий. Расчёты показали, что в условиях узкого створа НДС диафрагмы в целом становится более благоприятным. За счёт влияния скальных бортов уменьшаются осадки и смещения плотины и самой диафрагмы, соответственно уменьшаются испытываемые ею сжимающие усилия и изгибные деформации. Однако для НДС диафрагмы в пространственных условиях характерен изгиб диафрагмы в

своей плоскости. Он возникает из-за неравномерности осадок тела плотины – в русловой части они больше, чем у бортов. За счёт этого изгиба в прибортовой области верхняя часть среднего яруса диафрагмы испытывает растягивающие напряжения в направлении от борта к борту (рисунки 9, 10).

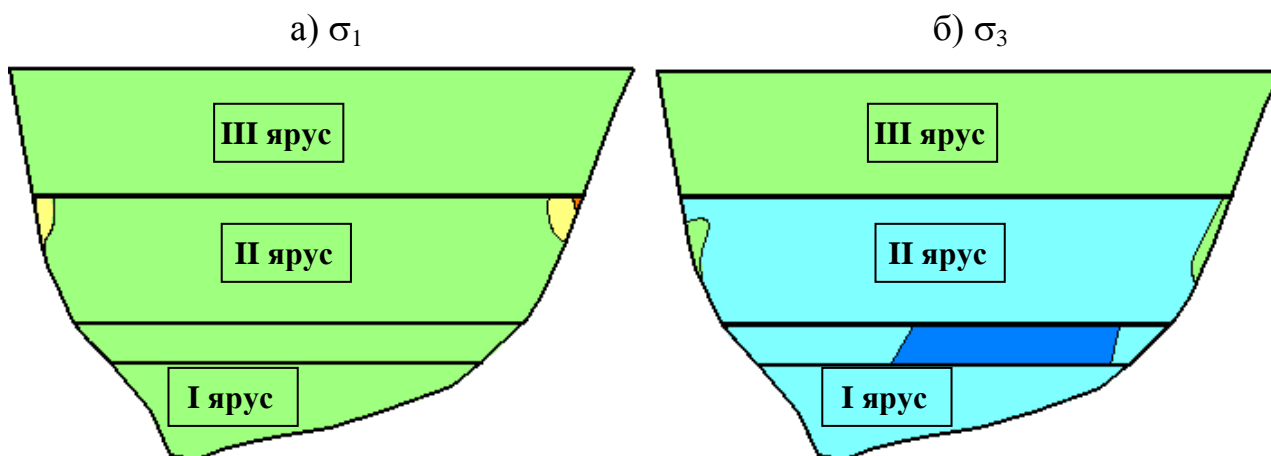


Рисунок 9 - Характер пространственного НДС многоярусной диафрагмы при её возведении из глиноцементобетона ($E=100$ МПа) (сечение вдоль створа). Зелёным цветом выделены области “слабого” сжатия, голубым – повышенного сжатия, синим – области концентрации сжимающих напряжений, жёлтым – области “слабого” растяжения, оранжевым – повышенного растяжения.

Если в качестве материала стены использовать глиноцементобетон с $E=100$ МПа, то эти напряжения оказываются невелики (до 0,3 МПа), если же бетон – то неизбежно расхождение строительных швов между отдельными буросекущимися сваями (рисунок 10).

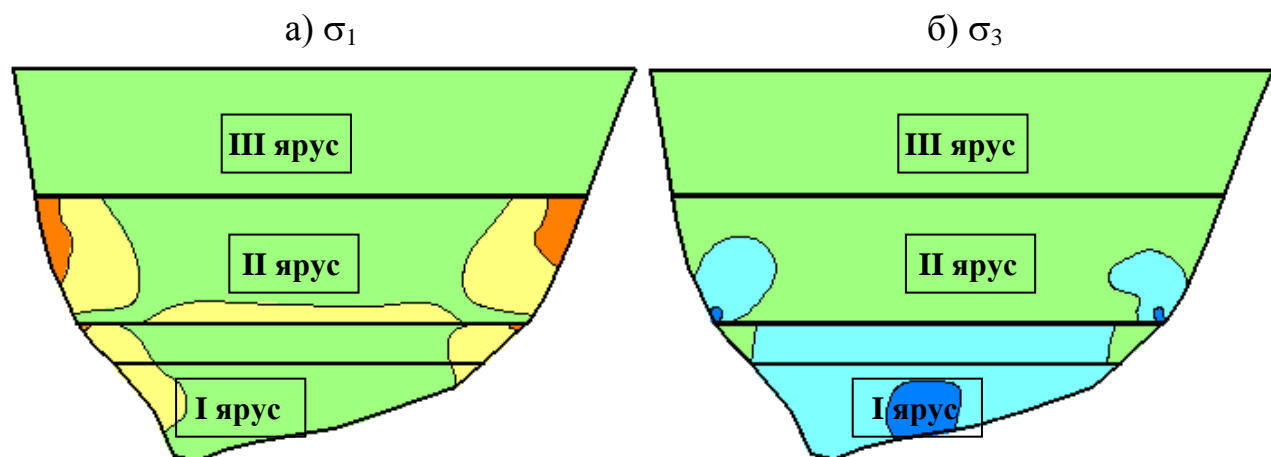


Рисунок 10 - Характер пространственного НДС многоярусной диафрагмы при её возведении из железобетона (сечение вдоль створа).
Обозначения см. на рисунке 9.

Глава 5 посвящена исследованиям работы каменно-набросных плотин с железобетонными экранами (ЖБЭ). Основной их целью являлось выявление причин образования трещин в экранах построенных высоких и сверхвысоких

плотин. Несмотря на наличие численных исследований в этой области, выполненных другими авторами, в настоящее время нет исчерпывающего анализа работы плотин с ЖБЭ.

Нами были проведены численные исследования для абстрактной плотины с ЖБЭ высотой 100 м и 200 м. Они проводились как для случая линейно-деформируемой, так и для упруго-пластической среды. Исследовалось влияние таких факторов как деформируемость каменной наброски, последовательность возведения и загрузки плотины, а также форма створа.

Расчёты показали, что при восприятии гидростатического давления наибольшие изгибные деформации возникают в нижней части ЖБЭ, они приводят к образованию на низовой грани растягивающих напряжений в направлении вдоль откоса.

Аналитическим методом для приближённой расчётной схемы было получено, что величины продольных напряжений, возникающих на гранях экрана при изгибе, могут быть определены по формуле:

$$\sigma = \pm \frac{\gamma_v \beta t}{m \sqrt{1+m^2}} \frac{E_6}{E}, \quad (6)$$

где E , β – соответственно модуль деформации и коэффициент бокового расширения каменной наброски;

E_6 – модуль деформации железобетона экрана;

γ_v – удельный вес воды;

t – толщина экрана;

m – заложение верхового откоса.

Растягивающие напряжения от изгиба обычно невелики. Однако есть ещё одна причина трещинообразования в ЖБЭ – наличие в нём растягивающих продольных усилий. Было обнаружено, при наполнении водохранилища из-за смещений тела плотины в сторону нижнего бьефа железобетонному экрану через трение передаются продольные усилия. Эти усилия часто растягивающие, экран испытывает удлинение от смещений (рисунок 11). Косвенным подтверждением наличия растягивающих усилий ЖБЭ служит то, что практически на всех плотинах периметральный шов, отделяющий экран от основания, раскрывается при наполнении водохранилища. Таким образом, нами было опровергнуто мнение о том, что ЖБЭ каменно-набросных плотин всегда находится в состоянии двухосного сжатия.

Растягивающие продольные усилия несут существенно бóльшую опасность, чем изгибные деформации, т.к. ведут к образованию растягивающих напряжений на верховой грани экрана. Растягивающие напряжения на низовой грани могут очень значительны и превышать прочность бетона на растяжение. Соответственно тогда в ЖБЭ образуются поперечные трещины. Для минимизации в ЖБЭ растягивающих напряжений необходимо уменьшать деформации каменной наброски, особенно при сдвиге.

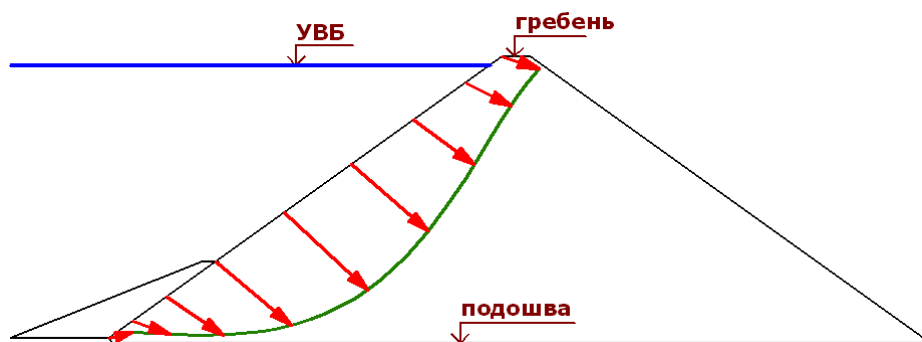


Рисунок 11 - Схема деформаций ЖБЭ при восприятии гидростатического давления верхнего бьефа.

Зелёной линией показано положение экрана после деформаций.

Для случая линейно деформируемой среды и схемы возведения плотины без очередей были выполнены исследования по влиянию деформируемости каменной наброски на НДС ЖБЭ (коэффициент Пуассона принимался равным 0,25). Они позволили получить приближённые эмпирические зависимости по определению максимальных прогибов экрана U_n^{\max} (м) и максимальных растягивающих напряжений в нём $\sigma_{\text{прод}}^{\max}$ (Па):

$$U_n^{\max} \approx \frac{1}{2} \frac{P_{\text{воды}}}{E}, \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{прод}}^{\max} \approx 10 \cdot 10^6 \sqrt{U_n^{\max}}. \quad (8)$$

Здесь E – модуль деформации каменной наброски (Па);

$P_{\text{воды}} = \gamma_v \frac{H_{\text{вб}}^2}{2}$ – сила горизонтального гидростатического давления на плотину со стороны верхнего бьефа (Н/м); $H_{\text{вб}}$ – глубина воды в верхнем бьефе.

Анализ показывает, что для того, чтобы растягивающие напряжения в плотине высотой 100 м снизились до приемлемых для железобетона значений (2÷3 МПа), необходимо, чтобы модуль деформации E каменной наброски плотины составил не менее 200 МПа. Анализ натуральных данных показывает, что E находится в интервале от 100 до 500 МПа, поэтому на ряде построенных плотин есть опасность трещинообразования в ЖБЭ.

Исследования показали, что учёт нелинейности характера деформирования каменной наброски приводит к уменьшению значений растягивающих напряжений примерно на 15÷20%. Это объясняется тем, что гидростатическое давление воспринимается плотиной уже после того, как грунт уплотнился под действием собственного веса. Однако качественную картину НДС ЖБЭ учёт нелинейности не изменяет.

Было показано, что большую роль на формирование НДС ЖБЭ оказывает последовательность возведения и загрузки плотины. Если строительство плотины и наполнения водохранилища ведётся очередями, то это благоприятно сказывается на НДС ЖБЭ. Это объясняется тем, что под действием веса плотины более поздних очередей строительства экран получает сжимающие

продольные усилия, а его прогибы уменьшаются. При возведении плотины в 2 очереди растягивающие напряжения в ЖБЭ могут уменьшаться в $1,5 \div 2$ раза в зависимости от высоты первой очереди.

Исследования НДС ЖБЭ реальной плотины Агуамилпа высотой 187 м, для которой имеются данные натуральных наблюдений за осадками тела плотины и прогибами экрана, позволили выявить ряд интересных особенностей работы плотин данного типа. Было выявлено, что зонирование камня в профиле плотины может негативно сказаться на НДС ЖБЭ. Это происходит в случае, если деформируемость камня в разных зонах плотины сильно различается. По результатам моделирования оказалось, что модуль деформации каменной наброски в верховой части плотины достигает 500 МПа, а в низовой составляет лишь около 30 МПа. В такой плотине осадки экрана оказываются больше по величине, чем смещения. Это вызывает появление в нём значительных растягивающих усилий. Если бы тело плотины было однородным, с модулем деформации 200 МПа, то НДС экрана оказалось бы существенно более благоприятным. Рекомендуется выполнять каменно-набросные плотины близкими к однородным.

Исследования работы плотины в пространственных условиях были проведены при использовании нелинейной модели грунта. Исследования проводились для створов разной геометрии. Варьировалась высота плотины (100 м, 200 м), ширина русловой части створа (от $24H$ до $2,2H$, где H – высота плотины) и наклон скальных бортов (заложение 0,5; 1; 1,5 или 2). В пересчёте на модель линейно-деформируемой среды рассматривались варианты с модулем деформации каменной наброски около $70 \div 80$, $140 \div 160$ и $280 \div 320$ МПа.

Расчёты показали, что, несмотря на то, что в узких створах осадки и смещения плотины и ЖБЭ заметно уменьшаются, нижняя часть низовой грани экрана испытывает растяжение. Область растягивающих напряжений располагается широкой полосой вдоль контакта плотины со скальным основанием (рисунок 12). Наличием этих напряжений могут быть объяснено появление в экранах ряда плотин наклонных трещин, повторяющих контуры рельефа местности (например, Campos Novos, Xingo).

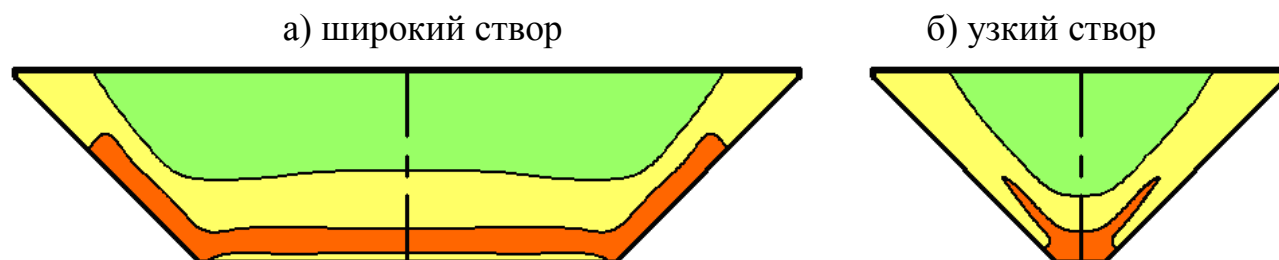


Рисунок 12 - Характер распределения максимальных главных напряжений на низовой грани ЖБЭ.

Обозначения см. на рисунке 9.

Периметральной шов на бóльшей части своей длины раскрывается. Помимо раскрытий в периметральном шве происходят смещения и в других направлениях – краевые прогибы экрана и его подвижки вдоль периметрального шва.

Исследования выявили ещё одну особенность НДС ЖБЭ в пространственных условиях – наличие сжимающих напряжений в направлении от борта к борту. Наибольший уровень сжатия характерен для плотин в узких створах (рисунок 13б). В сверхвысоких плотинах в узких створах сжимающие напряжения могут быть сопоставимы с прочностью бетона на сжатие. Это может приводить к появлению в экранах ряда плотин (Mohale, Barra Grande и др.) вертикальных трещин. Вертикальные межсекционные швы в силу своей малой толщины и жёсткости применяемых для их уплотнения материалов (дерево, ПВХ) не состояниии компенсировать эти сжимающие напряжения.

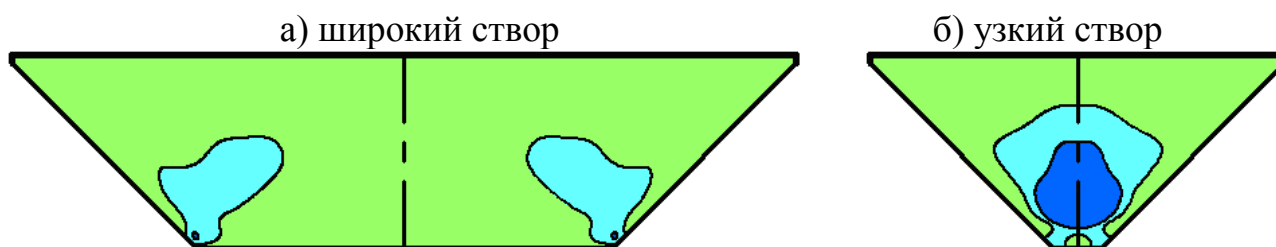


Рисунок 13 - Характер распределения минимальных главных напряжений на низовой грани ЖБЭ.

Обозначения см. на рисунке 9.

Для сверхвысоких плотин (около 200 м) НДС оказывается очень неблагоприятным, т.к. величины напряжений в ЖБЭ почти пропорционально возрастают с ростом высоты плотины.

Наибольшее значение для НДС ЖБЭ имеет деформируемость каменной наброски. Только этот фактор может обеспечить благоприятные условия работы ЖБЭ. Однако снижение деформируемости каменной наброски в N раз, приводит к уменьшению растягивающих напряжений примерно в \sqrt{N} раз, поэтому необходимо очень тщательное уплотнение камня. По результатам расчётов для обеспечения прочности бетона ЖБЭ на растяжение деформируемость каменной наброски должна соответствовать модулю деформации не ниже 200 МПа для плотин высотой 100 м и не ниже 300 МПа для плотин высотой 200 м.

Кроме того, было проведено методическое исследование по влиянию температурных воздействий на трещиностойкость экрана. Были проведены расчёты НДС для условной расчётной схемы, предусматривающей равномерное по толщине и высоте нагревание или остывание ЖБЭ на 20°C. Такое температурное воздействие могло бы вызвать в бетоне очень значительные температурные напряжения. Однако расчёты показали, что этого не происходит – благодаря податливости каменной наброски ЖБЭ имеет свободу деформаций, что позволяет компенсировать температурные напряжения. При модуле

деформации каменной наброски 60 МПа охлаждение экрана на 20°С приводит к появлению растягивающих температурных напряжений величиной лишь 0,6 МПа. Это показывает, что каменно-набросные плотины с ЖБЭ могут иметь перспективы применения даже в суровых климатических условиях. Более опасным воздействием для ЖБЭ являются ледовые нагрузки при изменении уровня водохранилища.

Глава 6 посвящена исследованиям напряжённо-деформированного состояния конструкций высоких плотин с массивными ПФЭ, выполненными из материалов на основе цемента. Массивные ПФЭ могут быть устроены из грунтоцементных смесей, полученных различными способами. Это могут быть грунтоцементы, грунтоцементобетон, камень, упрочнённый цементным раствором, грунтоцементный массив, закреплённый путём цементации.

Один из вариантов конструкции плотины – это плотина с ЖБЭ, в которой подэкрановая зона выполняется из камня, упрочнённого цементным раствором, т.н. грунтоцементобетона (предложение проф. Л.Н.Рассказова). Идея этого варианта (рисунок 14) заключается в том, что подэкрановая зона из грунтоцементобетона сгладит изгибные деформации экрана, создаст вторую линию противодиффузионной защиты, а самое главное – сделает конструкцию ремонтпригодной.

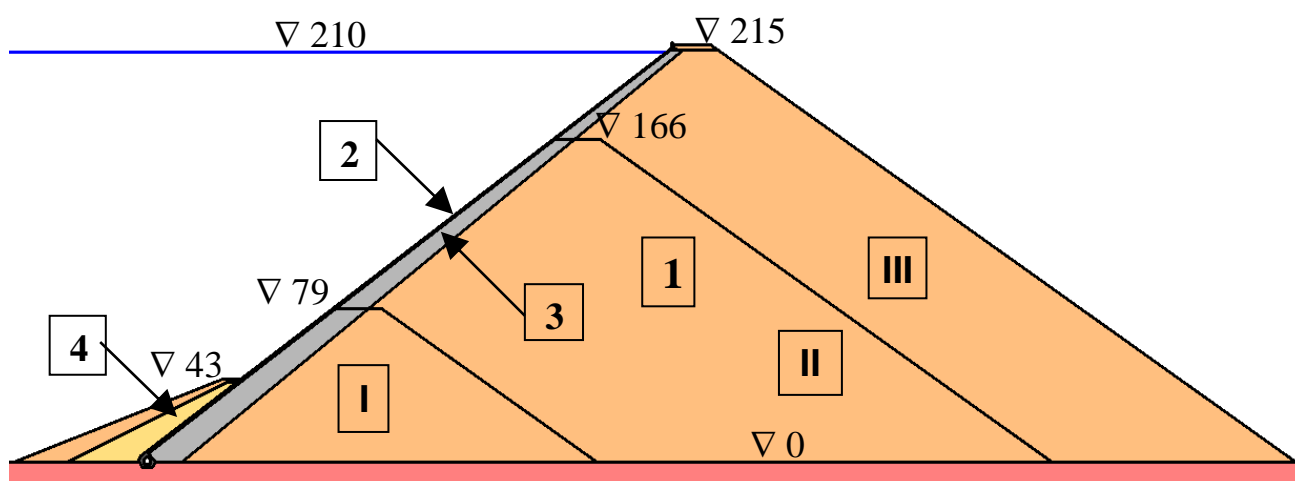


Рисунок 14 - Конструкция каменно-набросной плотины с массивным негрунтовым двухслойным экраном.

1 – упорная призма из горной массы; 2 – железобетонный экран;
3 – подэкрановая зона из грунтоцементобетона; 4 – защитная призма из грунтов; I, II, III – очереди строительства.

Расчёты показали, что ЖБЭ и подэкрановая зона из грунтоцементобетона работают как единый широкий двухслойный экран. Их напряжённое состояние в основном определяется условиями сопряжения со скальным основанием. Если жёсткую подэкрановую зону опереть непосредственно на скалу, то нижняя часть двухслойного экрана будет испытывать значительный изгиб и огромные растягивающие напряжения на верховой грани.

Была предложена иная схема опирания, которая позволила добиться того, чтобы железобетонный экран находился в сжатой зоне. Однако тогда растяжение станет испытывать грунтоцементобетонная подэкрановая зона. Вариант ПФЭ в виде ЖБЭ и подэкрановой зоны из грунтоцементобетона может быть работоспособным только в случае очень качественного уплотнения каменной наброски (при достижении $E > 350$ МПа).

Другой из вариантов конструкции – когда массивный экран из грунтоцементобетона дублируется уложенной на него полимерной геомембраной. Такая конструкция реализована в 1996 году в Албании в плотине Bovilla (Бовилла) высотой 81,6 м. Полимерный экран из ПВХ сверху защищён железобетонными плитами.

Расчёты показали, что благодаря высокой растяжимости полимера водонепроницаемости многослойного экрана не нарушается даже в периметральном шве. Учитывая длительный срок службы полимеров в условиях отсутствия доступа кислорода и благоприятного температурного режима, можно рекомендовать применение подобной конструкции для строительства и более высоких плотин. Данный вывод подтверждается опытом применения в 2010 году ПВХ-геомембраны для ремонта плотины Turimiquire (Венесуэла) высотой 113 м.

Ещё один из рассмотренных вариантов – каменно-набросная плотина с многоярусной инъекционной завесой (рисунок 15), которая имеет большую толщину и может быть классифицирована как ядро.

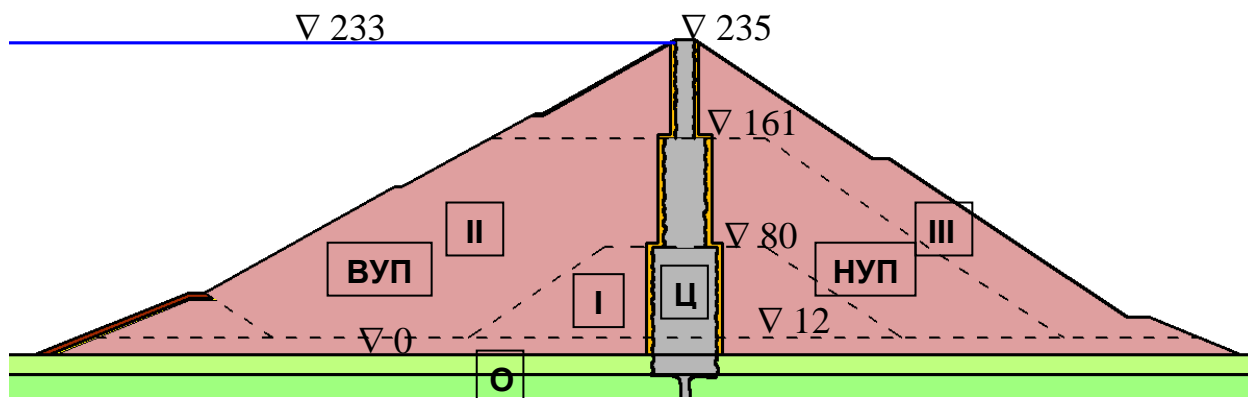


Рисунок 15 - Конструкция каменно-набросной плотины

с противодиффузионным элементом в виде инъекционной завесы.

Ц – инъекционная завеса; ВУП – верховая упорная призма; НУП – низовая упорная призма; О – скальное основание; I, II, III – очереди строительства.

Наше исследование позволило выявить, что надёжная работа инъекционной завесы (без нарушения прочности на растяжение) может быть достигнуто только в том случае, если модуль деформации её материала будет не более, чем в 3÷5 раз превышать модуль деформации грунта тела плотины. При этом деформируемость каменной наброски должна быть существенно снижена путём тщательного уплотнения.

Данный вариант конструкции является экономически невыгодным и технически сложным для применения в сверхвысоких плотинах.

Глава 7 посвящена оценке эффективности способов повышения надёжности каменно-набросных плотин с железобетонными экранами путём комбинирования ПФЭ. Рассматривались варианты последовательного соединения тонкостенных ПФЭ, а также вариант устройства комбинированной плотины.

Идея использования комбинированной плотины состоит в том, чтобы заменить наиболее проблемную, нижнюю, часть грунтовой плотины с ЖБЭ на бетонное сооружение. В результате получается плотина, в которой напор воды воспринимается как грунтовым, так и бетонным сооружением, расположенной в нижней части грунтовой насыпи.

Расчёты проводились на примере конструкции плотины New Exchequer, в которой высота бетонной части составляет 99 м, а грунтовой плотины – 150 м (рисунок 16).

Расчёты показали, что узел сопряжения ЖБЭ с телом бетонной плотины является недостаточно надёжным. Это связано с различием в жёсткости бетонной и грунтовой частей сооружения. Смещения грунтовой насыпи существенно больше, чем у бетонной, поэтому грунт на контакте между ними может испытывать разуплотнение и проскальзывание. Это ведёт значительным подвижкам в периметральном шве, отделяющий экран от бетонной плотины, и нарушению его водонепроницаемости. Полученный результат подтверждается опытом эксплуатации плотины New Exchequer (США), дважды подвергавшейся ремонту.

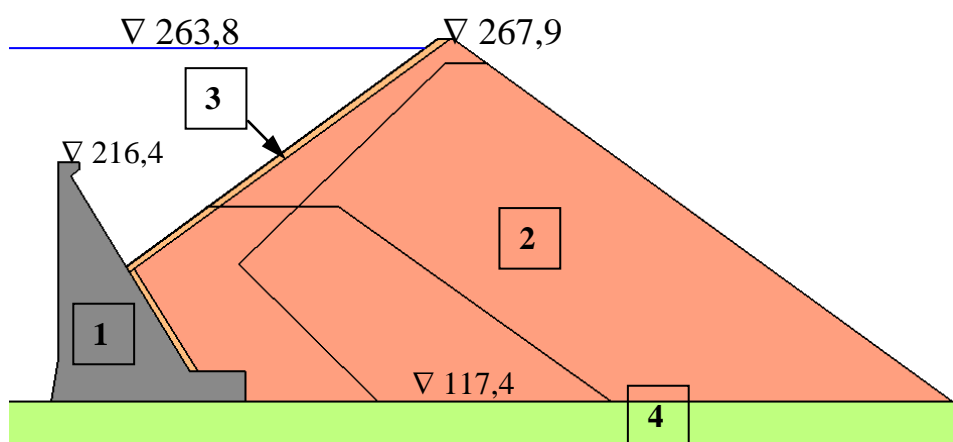


Рисунок 14 - Схема устройства комбинированной плотины.

1 – бетонное сооружение, 2 – каменная наброска, 3 – ЖБЭ, 4 – основание.

Наиболее удачной является плотина с комбинацией ЖБЭ и противофильтрационной стены, выполненной методом «стена в грунте». В этом варианте стена пересекает нижнюю часть плотины и слой нескального основания, а ЖБЭ является ПФЭ в верхней части плотины (рисунок 17).

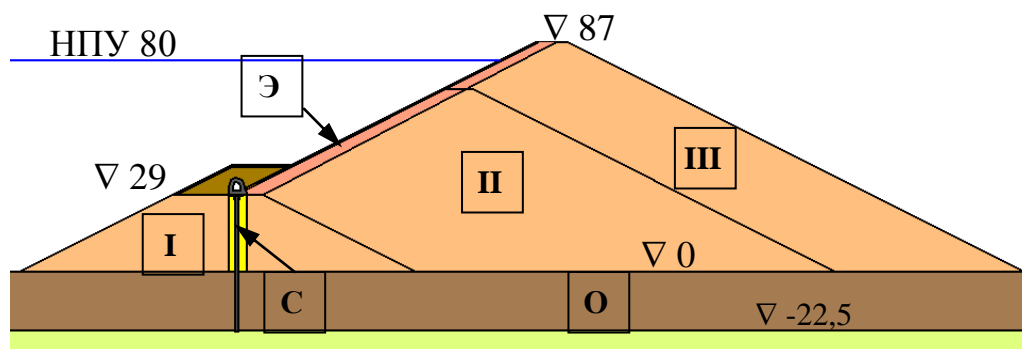


Рисунок 17 - Схема устройства плотины с комбинацией ЖБЭ и «стены в грунте»

I – перемычка, II, III – очереди строительства каменно-набросной плотины, Э – ЖБЭ, С – «стена в грунте», О – слой нескального грунта основания.

Расчёты показали, что в такой плотине оба ПФЭ находятся в благоприятном НДС. Стена, выполненная из глиноцементобетона, не испытывает существенных сжимающих усилий и изгибных деформаций, т.к. она вынесена на край профиля плотины. Её прочность на сжатие и растяжение обеспечивается. ЖБЭ, не имеющий связи со скальным основанием, не испытывает существенных деформаций изгиба и растягивающих усилий, а находится в состоянии сжатия. Данная конструкция плотины обеспечивает надёжную работу плотины при обеспечении надёжности сопряжения ЖБЭ и противофильтрационной стены. Их сопряжение рекомендуется осуществить с помощью подвижного соединения посредством бетонной галереи.

Были проведены исследования работоспособности сверхвысокой плотины с комбинацией ЖБЭ и глиноцементобетонной диафрагмы. Они показали, что данный тип плотины вполне пригоден для применения в случае соблюдения определённых рекомендаций – ЖБЭ должен иметь довольно широким (толщиной не менее 2 м), для диафрагмы должен применяться глиноцементобетон с $E < 500$ МПа, а модуль деформации каменной наброски не должен быть ниже 200 МПа. Была обоснована техническая эффективность предложенной конструкции плотины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований можно сделать следующие **общие выводы и рекомендации**:

1. Решение задачи о напряжённо-деформированном состоянии грунтовых плотин с жёсткими негрунтовыми противофильтрационными элементами имеет свои особенности, которые отличают её от других подобных задач. Методика решения этой задачи должна учитывать эти особенности. К важнейшим из факторов, которых следует учитывать, относятся следующие:

- нелинейность контактного взаимодействия жёстких негрунтовых конструкций с грунтовым массивом (возможность проявления проскальзывания, отлипания и др. эффектов),
- технологическая схема возведения грунтовых плотин и негрунтовых конструкций,
- сложный характер деформаций тонкостенных конструкций в грунтовом массиве, который для его описания при численном моделировании требует применения конечных элементов повышенной точности,
- нелинейность поведения грунтов тела высоких грунтовых сооружений,
- наличие нагрузок воздействий на сооружение от фильтрационного потока, а также температурных воздействий.

В рамках данной работы автором создана методика решения задачи о НДС грунтовых плотин с жёсткими негрунтовыми противофильтрационными элементами, её алгоритм и вычислительная программа, которые позволяют учесть все необходимые особенности.

2. Условия работы негрунтовых противофильтрационных конструкций в грунтовых сооружениях – сложные. Их НДС в основном определяется характером деформаций грунтового массива и характером контактного взаимодействия с ним. Поэтому чем больше соотношение модулей деформации материала негрунтовой конструкции и грунта, тем выше уровень напряжений в конструкции.

При неоднородном строении грунтового массива, наличии в нём ослабленных зон, характер деформаций грунтового массива становится более сложным и может вызвать опасность нарушения прочности негрунтовой конструкции.

При работе в грунтовом массиве негрунтовые противофильтрационные конструкции могут испытывать сжимающие и растягивающие продольные деформации, сложные изгибные деформации, в т.ч. даже в плоскости самой конструкции. Условия работы вертикальных стен (диафрагм) и экранов сильно различаются – для стен характерна возможность появления сжимающих продольных усилий, для экранов – растягивающих. Большую роль в формировании НДС тонкостенных конструкций играет трение между ними и грунтовым массивом, т.к. именно через трение на конструкции передаются сжимающие/растягивающие продольные усилия.

Для конструкций, выполненных из бетона, наибольшую опасность представляют изгибные деформации, т.к. они вызывают появление в конструкции значительных растягивающих напряжений, превышающих прочность на растяжение.

Сложность условий работы жёстких негрунтовых противофильтрационных конструкций в грунтовых плотинах не позволяет достоверно прогнозировать их НДС простыми аналитическими методами. Для учёта особенностей формирования их НДС требуется выполнение расчётов численными методами.

3. Противофильтрационные конструкции (стенки, диафрагмы), выполненные методом «стена в грунте» являются очень перспективным типом противофильтрационных устройств. Исследования показали, что они с успехом могут применяться в качестве противофильтрационных элементов в основании грунтовых плотин, в теле ремонтируемых грунтовых плотин и даже во вновь возводимых грунтовых плотинах.

НДС конструкций, возведённых методом «стена в грунте» как правильно более благоприятно, чем у традиционных диафрагм. Это объясняется тем, что их возведение происходит уже после завершения формирования НДС грунтового массива и они испытывают меньшие усилия от деформаций грунтового массива.

Неблагоприятные условия для работы противофильтрационных стен возникают тогда, когда окружающий массив грунта испытывает деформации уплотнения в вертикальном направлении (например, при наращивании плотины). В этом случае жёсткая негрунтовая конструкция концентрирует в себе значительные сжимающие усилия, которые могут привести к нарушению прочности на сжатие.

Задача по обеспечению прочности противофильтрационных стен во многом обусловлена правильным выбором её материала. В большинстве случаев модуль деформации материала стены не должен превышать модуль деформации окружающего грунта в 2-5 раз. Эти требования жёстче, чем рекомендации ICOLD. При устройстве противофильтрационных стен в неоднородных основаниях в качестве материала стены следует выбирать тот, модуль деформации которого практически равен модулю деформации наиболее слабого материала.

В большинстве случаев в качестве материала стены рекомендуется применять пластичный глиноцементобетон. Для этого материала характерно существенное увеличение прочности на сжатие при его боковом обжатии, что как раз соответствует условиям работы противофильтрационных стен. Однако возможны и случаи, когда материалом стен может железобетон.

Не рекомендуется осуществлять сопряжение с телом плотины стен, выполненных в прочном скальном основании, в виде тонких консолей.

4. Железобетонные экраны являются недостаточно надёжным противофильтрационным элементом высоких грунтовых плотин, т.к. сложный характер деформаций грунтовой плотины может вызывать образование в нём трещин. Трещины могут быть следствием нарушения прочности бетона как на растяжение, так и на сжатие.

Исследованиями установлена возможность проявления в железобетонных экранах продольных растягивающих усилий при повышенных горизонтальных смещениях каменной наброски. Рекомендуется строить высокие плотины в несколько очередей, чтобы компенсировать растягивающие усилия в экране сжимающими усилиями от осадок плотины.

Основную опасность для железобетонных экранов каменно-набросных плотин несут растягивающие напряжения. Как правило, растягивающие напряжения приводят к образованию в экране горизонтальных или наклонных

трещин. Растягивающие напряжения могут возникать вследствие деформаций изгиба. При расположении плотины на скальном основании появление в железобетонном экране изгибных деформаций неизбежно, поэтому опасность трещинообразования в экране присутствует всегда.

Для высоких плотин, построенных в узких створах, характерна опасность образования в железобетонном экране вертикальных трещин вследствие нарушения прочности на сжатие сжимающими напряжениями, действующими в направлении от борта к борту. Для снижения опасности нарушения прочности на сжатие следует выполнять межсекционные швы широкими и выполнять их из материалов с высокой деформируемостью.

Наибольшее влияние на НДС железобетонного экрана оказывает деформируемость каменной наброски плотины. Надёжная работа железобетонного экрана может быть обеспечена при модуле деформации каменной наброски не ниже 200 МПа, а для сверхвысоких плотин – не ниже 300 МПа. Большую опасность представляет наличие в теле каменно-набросной плотины грунтов высокой деформируемости. Зонированию камня в теле плотины следует уделять особое внимание.

5. Опасность трещинообразования в железобетонном экране каменно-набросной плотины резко возрастает с ростом высоты плотины. Для сверхвысоких плотин, высотой около 200 м и более, традиционная конструкции железобетонного экрана не гарантирует надёжной работы экрана, т.к. она не позволяет оперативно предупреждать развитие аварийной ситуации и труднодоступна для ремонта. Необходимо искать новые конструктивные решения плотин с железобетонными экранами. Наиболее рациональным способом повышения надёжности железобетонного экрана на данный момент следует признать его покрытие полимерными геомембранами. Современный уровень развития техники позволяет покрывать геомембранами экраны плотин даже на большой глубине, без опорожнения водохранилища.

6. Устройство в высоких грунтовых плотинах массивных конструкций из жёстких негрунтовых материалов нецелесообразно, т.к. они сложным образом взаимодействуют с грунтовым сооружением и подвержены трещинообразованию, угрожая нарушению целостности всего сооружения. По этой причине не рекомендуется применять комбинированные плотины, состоящие из грунтовой и бетонной плотин.

В то же время комбинация в плотине тонких негрунтовых противодиффузионных конструкций, таких как железобетонный экран и глиноцементобетонная диафрагма является удачным конструктивным решением. В такой плотине и железобетонный экран и диафрагма проявляют свои преимущества как конструкций и работают в благоприятных условиях. Расчётными исследованиями возможность применения типа плотины с комбинацией железобетонного экрана и глиноцементобетонной диафрагмы для строительства сверхвысоких плотин.

7. Инъекционные завесы в данный момент являются единственным из известных типов негрунтовых противодиффузионных элементов, который можно применять для строительства сверхвысоких каменно-набросных плотин,

обеспечив необходимый уровень надёжности плотины. Однако и данный тип противofильтрационного устройства имеет свои недостатки свои ограничения к применению.

Материал инъекционной завесы должен быть по своей деформируемости близок к грунту, отличаясь от него не более чем 3÷5 раз; поэтому для создания инъекционной завесы ядро можно применять растворы с высоким содержанием глинистого материала, а каменная наброска должна быть тщательно уплотнена, чтобы обеспечить достигнуть повышения её модуля деформации как минимум до 200 МПа.

Недостатком массивных противofильтрационных завес в теле грунтовых плотин является необходимость выполнения значительного объёма инъекционных работ и соответственно удорожание строительства;

Создание внутри тела грунтовой плотины массивной жёсткой противofильтрационной конструкции осложняет прочностное состояние грунта плотины и вызывает появление зон предельного состояния.

Вопрос о работоспособности высоких грунтовых плотин с инъекционной завесой исследован впервые и в этом направлении необходимы дополнительные исследования. В т.ч. требуются исследования свойств заинъектированного грунта.

8. Против ожиданий согласно расчётам термонапряжённого состояния железобетонный экран каменно-набросной плотины может применять для работы в суровых климатических условиях. Грунтовая насыпь обеспечивает железобетонному экрану свободу деформаций, что позволяет ему снизить до минимума температурные напряжения. Ледовые воздействия представляют для железобетонного экрана бóльшую опасность, но и она может быть сnivelирована.

Это позволяет утверждать, что грунтовые плотины с тонкими негрунтовыми противofильтрационными элементами могут найти эффективное применение даже в суровых климатических условиях Севера России.

Перспективы дальнейшей разработки темы состоят в исследовании различных вариантов комбинаций негрунтовых противofильтрационных элементов в теле каменно-набросной плотины, в уточнении предложенных конструкций негрунтовых противofильтрационных элементов. Однако для этого требуется изучить деформативные и прочностные свойства различных цементосодержащих материалов, из которых устраиваются негрунтовые противofильтрационные элементы – глиноцементобетона, грунтоцементобетона, а также грунта, заинъектированного цементным раствором.

Кроме того, требуется исследование влияния на работу негрунтовых ПФЭ температурных и ледовых воздействий.

Список публикаций по теме диссертации, опубликованных в изданиях из «Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» ВАК Минобрнауки РФ

1. Рассказов Л.Н., Бестужева А.С., Саинов М.П. Бетонная диафрагма как элемент реконструкции грунтовой плотины // Гидротехническое строительство. 1999. № 4. С.10-16.
2. Выборнов К.А., Саинов М.П. Влияние работы швов на пространственное напряжённо-деформированное каменной плотины с железобетонным экраном // Вестник МГСУ. 2011. №5. С.12-17.
3. Саинов М.П., Котов Ф.В. Сравнение вариантов конструкции высокой каменной плотины в условиях Якутии // Вестник МГСУ. 2011. №5. С.30-35.
4. Саинов М.П. Совершенствование конструкции высокой каменной плотины с железобетонным экраном // Вестник МГСУ. 2011. №5. С.36-40.
5. Рассказов Л.Н., Саинов М.П. Численные исследования надёжности высокой каменной плотины с железобетонным экраном и подэкрановой зоной из грунтоцементобетона // Гидротехническое строительство. 2012. №2. С.30-34.
6. Саинов М.П. Особенности численного моделирования напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин с тонкими противофильтрационными элементами // Вестник МГСУ. 2012. №10. С.102-108.
7. Саинов М.П. Исследование влияния формы створа на работу периметрального шва каменной плотины с железобетонным экраном // Вестник МГСУ. 2013. №9. С.101-117.
8. Саинов М.П. Способ создания конечных элементов высокого порядка // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2013. Volume 9. Issue 3. С.152-156.
9. Саинов М.П. Вычислительная программа по расчету напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин: опыт создания, методики и алгоритмы // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2013. Volume 9. Issue 4. С.208-225.
10. Саинов М.П., Котов Ф.В. Оценка надежности диафрагмы из буронабивных свай в плотине средней высоты // Вестник МГСУ. 2014. №1. С.153-163.
11. Рассказов Л.Н., Радзинский А.В., Саинов М.П. Плотина высотой 100 м с глиноцементобетонной диафрагмой по типу «стена в грунте» // Вестник МГСУ. 2014. №9. С.106-115.
12. Саинов М.П. Пространственная работа диафрагмы из буронабивных свай в теле каменной плотины // Приволжский научный журнал. 2014. №3. С.43-47.
13. Саинов М.П. Полуэмпирическая формула для оценки осадок однородных грунтовых плотин // Приволжский научный журнал. 2014. №3 (31). С.108-115.

14. Саинов М.П., Федотов А.А. Анализ напряженно- деформированного состояния комбинированной плотины Нью-Эксчекваер при статических нагрузках // Вестник МГСУ. 2015. №2. С.141-152.
15. Саинов М.П. Пространственная работа противofильтрационной стены // Инженерно-строительный журнал. №5. 2015. С.20-33.
16. Саинов М.П. Влияние деформируемости каменной насыпи на напряжённо-деформированное состояние железобетонного экрана плотины // Вестник МГСУ. 2015. №3. С.69-78.
17. Саинов М.П. Работа железобетонного экрана каменной плотины в пространственных условиях по результатам численного моделирования // Приволжский научный журнал. 2015. №3(35). С.25-31.
18. Саинов М.П., Федотов А.А. Анализ сейсмостойкости комбинированной плотины «New Exchequer» на основе численного моделирования // Приволжский научный журнал. 2015. №4(36). С.26-32.
19. Саинов М.П. Оценка влияние формы створа на напряжённое состояние железобетонного экрана каменной плотины // Приволжский научный журнал. 2016. №2(38). С.104-109.
20. Саинов М.П. Влияние жесткости материала противofильтрационной стены в основании грунтовой плотины на ее прочность // Приволжский научный журнал. 2016. №3(39). С.62-69.
21. Саинов М.П. Влияние формы створа на напряжённое состояние железобетонного экрана каменно-насыпной плотины // Инженерно-строительный журнал. 2016. №3. С.16-39.
22. Саинов М.П. Выбор материала для противofильтрационной стены в полускальном основании высокой грунтовой плотины // Гидротехническое строительство. 2016. №10. С.19-26.
23. Саинов М.П. Анализ работоспособности каменной плотины с комбинацией противofильтрационных элементов – железобетонного экрана и глиноцементобетонной стены // Инженерно-строительный журнал. 2016. №4(64). С.3-9.
24. Саинов М.П. Приближенная расчетная схема работы железобетонного экрана каменно-набросной плотины // Научное обозрение. 2016. №18. С.18-22.
25. Саинов М.П. Влияние изменения температуры на напряжённо-деформированное состояние железобетонного экрана каменно-набросной плотины // Приволжский научный журнал. 2016. №4(40). С.79-85.
26. Саинов М.П., Анисимов О.В. Напряженно-деформированное состояние противofильтрационной стены, выполненной для ремонта каменно-земляной плотины // Инженерно-строительный журнал. 2016. №8(68). С.3-17.
27. Саинов М.П., Кудрявцев Г.М. Влияние деформируемости материала противofильтрационной диафрагмы, выполненной в грунтовой плотине методом «стена в грунте», на её прочность // Вестник МГСУ. 2017. №2. С.214-221.

28. Саинов М.П. Приближенный прогноз прочности противофильтрационной стены в основании плотины // Научное обозрение. 2017. №4. С.34-38.

29. Саинов М.П. Алгоритм учета ветвей нагружения грунта при расчетах напряженно-деформированного состояния // Научное обозрение. 2017. №5. С.28-32.

30. Саинов М.П., Котов Ф.В. Напряжённо-деформированное состояние и работоспособность высокой грунтовой плотины с инъекционной завесой // Инженерно-строительный журнал. 2017. №1(69). С.44-55.

31. Саинов М.П., Котов Ф.В. Напряженно-деформированное состояние двухслойного экрана каменнонабросной плотины, выполненного из железобетона и грунтоцементобетона // Вестник МГСУ. 2017. №5. С.506-511.

32. Саинов М.П., Сорока В.Б. Работоспособность сверхвысокой каменно-набросной плотины с комбинацией негрунтовых противофильтрационных устройств // Приволжский научный журнал. 2017. №3(43). С.70-76.

33. Саинов М.П., Лубьянов В.В. Напряжённо-деформированное состояние противофильтрационных стен в основании грунтовых плотин // Инженерно-строительный журнал. 2017. №5(73). С.96-112.

34. Саинов М.П., Толстиков В.В., Фомичев А.А. Обоснование необходимости использования конечных элементов высокого порядка при численном моделировании работы жёстких тонкостенных конструкций в грунтовых плотинах // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2017. Т.285. С.15-19.

Публикации в других изданиях

35. Саинов М.П. Особенности расчетов напряжённо-деформированного состояния каменных плотин с железобетонными экранами // Вестник МГСУ. 2006. №2. С.78-86.

36. Саинов М.П. Параметры деформируемости крупнообломочных грунтов в теле грунтовых плотин // Строительство: наука и образование. 2014. №2. Ст.2. URL: <http://www.nso-journal.ru> (дата обращения 01.07.2017).

37. Саинов М.П. Оценка деформируемости и прочности грунтов, закрепленных путем цементации // Строительство: наука и образование. 2014. №3. Ст.1. URL: <http://www.nso-journal.ru> (дата обращения 01.07.2017).

38. Саинов М.П. Рациональная конструкция каменной плотины для условий Крайнего Севера. Сборник трудов XXI российско-польско-словацкого семинара «Теоретические основы строительства». 2012. С.375-378.

39. Котов Ф.В., Саинов М.П. Расчет напряженно-деформированного состояния каменно-набросной плотины с железобетонным экраном, опирающимся на инъекционную завесу в верховой перемычке. Сборник трудов конференции «Строительство – формирование среды жизнедеятельности». 2017. С.1169-1171.

40. Сорока В.Б., Саинов М.П. Исследование работоспособности сверхвысокой каменно-набросной плотины с комбинацией тонкостенных

противофильтрационных элементов. Сборник трудов конференции «Строительство – формирование среды жизнедеятельности». 2017. С.1188-1190.