

На правах рукописи



Сорока Владислав Борисович

**РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННОГО
УСТРОЙСТВА КАМЕННО-НАБРОСНОЙ ПЛОТИНЫ
В СОСТАВЕ БЕТОННОГО ЭКРАНА И СТЕНЫ**

2.1.6 – Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2023

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

Научный руководитель: **Саинов Михаил Петрович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Сольский Станислав Викторович**
доктор технических наук, старший научный сотрудник,
Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева», Лаборатория «Фильтрационные исследования» им. акад. Н.Н. Павловского отдела «Основания, грунтовые и подземные сооружения», главный научный сотрудник

Михасек Андрей Александрович
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», кафедра «Природоохранное и гидротехническое строительство», доцент

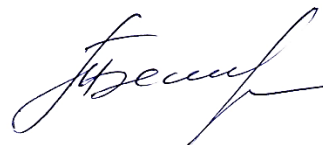
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится «20» июня 2023 года в 12:30 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, зал Ученого совета.

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

Автореферат разослан « ___ » _____ 202_ г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Бестужева А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования обусловлена расширением применения в мировой практике каменно-набросных плотин с составным ПФУ, включающим железобетонный/бетонный экран и противофильтрационную стену-диафрагму, выполненную одним из методов «стена в грунте».

Такая конструкция может рассматриваться как перспективный способ совершенствования традиционной конструкции каменно-набросной плотины с бетонным экраном в целях повышения её эффективности и надёжности. В РФ применение плотин нового типа может быть актуальным для строительства высоких плотин на полноводных реках Сибири.

Степень разработанности проблемы. Несмотря на то, что накоплен большой эмпирический опыт проектирования, строительства и эксплуатации КНПБЭ, в основном он относится к тем плотинам, которые построены на скальном основании. Т.к. КНПБЭ на мощном слое дисперсных грунтов стали строить относительно недавно, то публикаций, посвящённых изучению условий их работы, насчитывается крайне мало. Основная часть исследований данного типа плотин выполнена специалистами из Китая.

В этих немногочисленных исследованиях изучалось поведение КНПБЭ на нескальном основании как с помощью натуральных измерений за построенными плотинами, так и путём численного моделирования напряжённо-деформированного состояния (далее – НДС). Однако, необходимо отметить, что численное моделирование НДС грунтовых сооружений с тонкими жёсткими конструкциями представляет сложную задачу. Необходимо воспроизводить особенности контактного взаимодействия конструкций между собой и с грунтами, применять способы обеспечения монотонности получаемого распределения напряжений. Поэтому влияние на формирование НДС составных противофильтрационных устройств каменно-набросных плотин ещё мало изучено.

Поэтому **целью** диссертации является решение научной проблемы расчётного обоснования и проектирования каменно-набросных плотин с составным противофильтрационным устройством, включающим бетонный (железобетонный) экран и «стену в грунте».

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

- проведён анализ опыта применения и конструкций каменно-набросных плотин с противофильтрационным устройством, состоящим из бетонного экрана и стены;
- создана методика численного моделирования напряжённо-деформированного состояния конструкций каменно-набросных плотин с составным противофильтрационным устройством;
- с помощью численного моделирования проведён анализ работоспособности составного противофильтрационного устройства каменно-набросной плотины, включающего бетонный экран и стену;
- выполнен анализ условий работы узла сопряжения двух элементов составного противофильтрационного устройства;
- с помощью численного моделирования изучены способы обеспечения работоспособности сверхвысоких плотин с противофильтрационным устройством, состоящим из бетонного экрана и стены;

- сформулированы рекомендации по проектированию и методике расчётного обоснования конструкций каменно-набросных плотин с противofильтрационным устройством, состоящим из бетонного экрана и стены.

Объект исследования.

Каменно-набросные плотины с составным противofильтрационным устройством в виде бетонного экрана и «стены в грунте», которая может располагаться как в основании, так и в теле плотины.

Предмет исследования.

Диссертация посвящена исследованию конструкции данного вида плотин и напряжённо-деформированного состояния, а также анализу работоспособности.

Методология и методы исследования.

Исследования напряжённо-деформированного состояния плотин и их противofильтрационных устройств проводились с помощью численного моделирования методом конечных элементов.

Расчёты выполнялись с помощью методики расчётов и вычислительной программы NDS_N, созданной научным руководителем Саиновым М.П. Важным их преимуществом является возможность подробного воспроизведения напряжённо-деформированного состояния жёстких тонкостенных конструкций в условиях высоких деформаций, характерных для грунтовых плотин. Это обеспечивается применением конечных элементов высокого порядка с внеузловыми степенями свободы.

Кроме того, методика расчётов и вычислительная программа позволяют учитывать нелинейный характер деформирования грунтов и поведения контактов между элементами конструкции, воспроизводить историю формирования НДС.

Степень достоверности результатов исследований, проведенных соискателем ученой степени, обеспечивается тем, что:

- Для исследований использована теория численного моделирования НДС грунтовых плотин, основанная на известных закономерностях механики грунтов и методики МКЭ. При численном моделировании учитывались такие особенности как: нелинейные эффекты контактного взаимодействия, технологическая схема возведения.

- Для численного моделирования НДС грунтовых плотин использована протестированная вычислительная программа, обеспечивающая возможность подробного воспроизведения НДС жёстких тонкостенных конструкций в условиях высоких деформаций.

- Результаты численного моделирования НДС грунтовых плотин согласуются с опубликованными данными натурных наблюдений, с результатами, полученными другими авторами, а также с результатами, полученными по сертифицированной вычислительной программе.

Научная новизна работы состоит в:

- выявлении характерных особенностей НДС негрунтового противofильтрационного устройства каменно-набросной плотины в составе бетонного экрана и «стены в грунте»: существенных сжимающих/растягивающих продольных сил в жёстких элементах конструкции, а также в высоких деформациях изгиба в зоне сопряжения элементов конструкции;

- определении характера влияния на напряжённо-деформированное состояние составного негрунтового противofильтрационного устройства каменно-набросной плотины нескольких ключевых факторов;

- установлении условий, которые приводят к нарушению целостности составного негрунтового противодиффузионного устройства каменно-набросной плотины;

- определении эффективных способов регулирования напряжённо-деформированного состояния элементов конструкции составного негрунтового противодиффузионного устройства каменно-набросной плотины.

Теоретическая значимость работы заключается в:

- результативном использовании численного моделирования для получения новой информации о особенностях НДС составного негрунтового противодиффузионного устройства грунтовой плотины;

- доказательстве определяющей роли трения в формировании НДС элементов конструкции составного противодиффузионного устройства грунтовой плотины;

- изучении и раскрытии закономерностей формирования НДС составного негрунтового противодиффузионного устройства грунтовой плотины в зависимости от сочетания основных факторов;

- определении зон, в которых возможна потеря прочности составного противодиффузионного устройства грунтовой плотины;

- в теоретической аргументации методов регулировки НДС тонкостенных негрунтовых элементов составляющих ПФУ грунтовой плотины, для обеспечения работоспособности.

Практическая значимость работы состоит в:

- создании методики численного моделирования НДС составного негрунтового противодиффузионного устройства каменно-набросной плотины;

- результатах численного моделирования НДС нескольких реальных грунтовых плотин с составным негрунтовым противодиффузионным устройством;

- обосновании преимуществ грунтовой плотины с составным негрунтовым противодиффузионным устройством, включающим бетонный экран и вертикальную стену;

- обосновании возможности применения составных противодиффузионных устройств в конструкциях сверхвысоких плотин;

- рекомендациях по обеспечению работоспособности составного противодиффузионного устройства в виде бетонного экрана и стены для каменно-набросных плотин.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты численного моделирования НДС составного негрунтового противодиффузионного устройства в теле и основании грунтовой плотины, исследования влияния на НДС ключевых факторов;

- выводы о причинах возможной потери прочности элементов составного противодиффузионного устройства плотины;

- рекомендации по обеспечению работоспособности конструкций грунтовых плотин с составным негрунтовым противодиффузионным устройством.

Личный вклад соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается в:

- выполнении и анализе результатов численного моделирования НДС составного негрунтового противодиффузионного устройства грунтовых плотин, включающего бетонный экран и стену-диафрагму;

- формулировании выводов и рекомендаций по обеспечению работоспособности конструкций грунтовых плотин с составным негрунтовым противодиффузионным устройством.

Апробация результатов диссертации проводилась путём публикации статей в научных журналах и в виде докладов на научных конференциях.

Были выполнены доклады на научно-технической конференции «Гидроэнергетика. Гидротехника Новые разработки и технологии» (ВНИИГ им. Веденеева, 2017 г.), «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства» (НИУ МГСУ, 2021 г.).

Публикации по результатам исследований.

Материалы диссертации достаточно полно изложены в 12 научных публикациях, из которых 5 работ 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 1 опубликована в издании, индексируемой международной реферативной базой Scopus.

Работа была выполнена на кафедре гидравлики и гидротехнического строительства ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» в 2017-2022 годах.

Структура и объём диссертации.

Диссертация включает в себя введение, 4 главы и заключение. Она включает в себя 185 страниц машинописного текста, 118 рисунков и 15 таблиц. Список литературы включает в себя 131 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 опыта применения составного ПФУ в виде БЭ и ПФС при строительстве каменно-набросных плотин, выполненный на основе научно-технической литературы, а также анализ перспектив их дальнейшего использования и совершенствования.

Обзор опыта применения составного ПФУ показал, что данная конструкция активно используется в каменно-набросных плотинах на нескальном основании, особенно в Китае. В большинстве случаев для сопряжения экрана и стены используется бетонной понур. Однако применение данной конструкции составного ПФУ основано на эмпирическом подходе и некоторые исследования показывают, что ПФУ могут испытывать смещения, которые могут нарушить герметичность водонепроницаемого контура. Поэтому требуется решение следующих задач: 1) изучение работоспособности узла сопряжения составного ПФУ, 2) исследование влияния элементов составного ПФУ друг на друга.

Анализ тенденций развития гидротехнического строительства показал, что с недавних пор в конструкциях каменно-набросных плотин стал применяться новый тип ПФУ – составной ПФУ из бетонного экрана (в верхней части плотины) и стены-диафрагмы (в

нижней части плотины). Изучение работоспособности таких плотин стало ещё одной задачей исследования.

Глава 2 посвящена принципам моделирования конструкций каменно-набросных плотин с сочетанием жёстких тонкостенных конструкций.

Были выделены основные факторы, учёт которых позволяет достоверно моделировать НДС грунтового сооружения с составным ПФУ:

- проявление эффектов проскальзывания или отрыва на границах между элементами конструкции сооружения;
- зависимость НДС от последовательности возведения и нагружения грунтового сооружения, от технологической схемы устройства ПФУ;
- эффект потери точности моделирования поведения жёстких тонкостенных конструкций, который возникает из-за значительного отличия по размерам и жёсткости от самого грунтового сооружения,
- нелинейность деформирования грунтов.

Методика расчётов НДС основана на методе конечных элементов. Она реализована в выбранном программном комплексе NDS_N. Он позволяет учесть все выше описанные особенности за счёт:

- использования конечных элементов высокой степени аппроксимации;
- использования контактных конечных элементов нулевой толщины для учёта нелинейных эффектов контактного взаимодействия;
- использования методики, позволяющей учитывать историю возведения и нагружения;
- использования алгоритма, позволяющего учитывать нелинейность деформативных свойств среды.

Глава 3 посвящена исследованиям работоспособности составного ПФУ в виде БЭ и ПФС, расположенной в основании, в каменно-набросных плотинах на нескальном основании. Исследовалось влияние на НДС составного ПФУ таких параметров как модуль деформации основания, толщина основания, модуль деформации тела плотины, а также материал понура.

Исследование проводилось на примере абстрактной плотины высотой 100 м, а также плотины Miojiaba (КНР).

В методическом исследовании НДС абстрактной плотины рассматривалось несколько расчетных схем: схема №1 – плотина располагается на абсолютно жестком основании; схема №2 – плотина расположена на водонепроницаемом основании конечной жёсткости без устройства ПФС; схема №3 – плотина расположена на водонепроницаемом основании конечной жёсткости с устройством ПФС.

В исследовании рассматривались несколько вариантов модулей линейной деформации грунтов основания и плотины. Для схем №2 и №3 модуль линейной деформации основания варьировался от 40 МПа до 20 ГПа. Соответственно, в некоторых вариантах плотина располагается на нескальном основании, а в других – на скальном.

Рассматривались 2 варианта модуля линейной деформации каменной наброски E_k . В одном варианте модуль грунта верховой призмы равен 120 МПа, а в другом – 480 МПа. Для низовой призмы модуль деформации принимался в 2 раза меньше, чем для верховой. Модуль деформации материала ПФС принимался в зависимости деформируемости основани, он примерно в 5 раз больше модуля грунта основания. Соответственно, материалом стены мог

являться глиноцементобетон, пластичный и обычный бетон. Всего было рассмотрено 22 вариантов.

Расчёты показали, что НДС экрана определяется соотношением между модулями деформации тела плотины и основания. Оно влияет на характер и величину продольных сил, а также изгибающих моментов (рисунок 1). Это показывает, что условия работы бетонного экрана плотины, расположенной на нескальном основании, существенно отличаются от условий работы плотины на скальном основании.

Благоприятное НДС экрана наблюдается, когда соотношение между модулем деформации тела плотины и модулем деформации основания не превышает 3. Устройство в основании ПФС приводит к росту растягивающих и сжимающих напряжений в экране, однако прирост данных напряжений в большей степени зависит от модуля деформации основания.

Т.к. жёсткость основания определяется не только модулем деформации его грунта, но и его толщиной, дополнительно было изучено влияние на НДС составного ПФУ толщины слоя нескального основания.

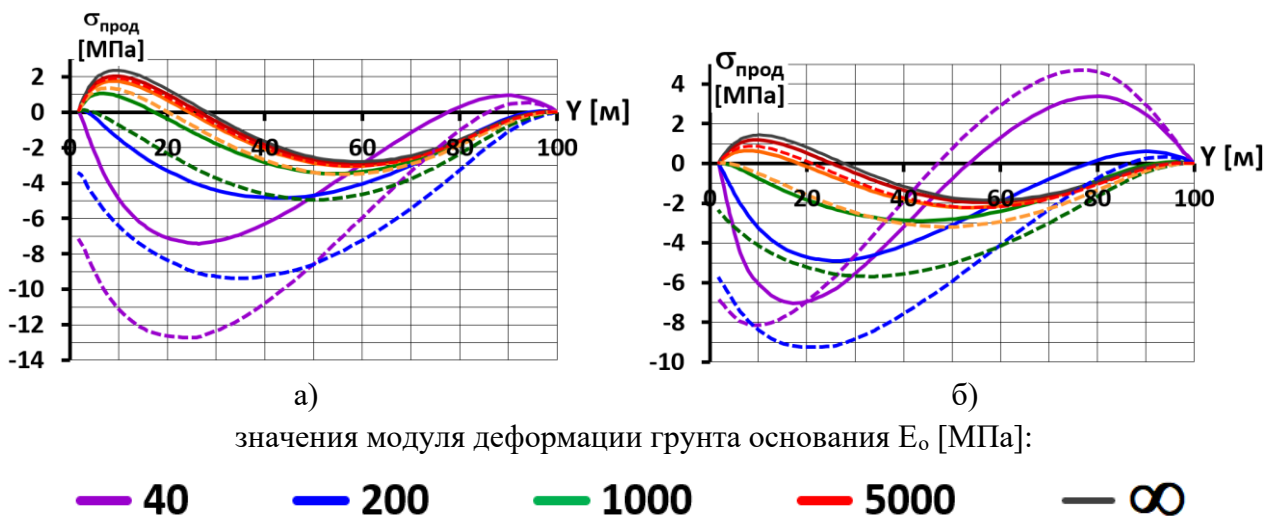


Рисунок 1 – Распределение средних значений продольных напряжений
 а – при $E_k=120$ МПа, б – при $E_k=480$ МПа. Сплошная линия – вариант без устройства ПФС;
 пунктирная линия – вариант с устройством ПФС.

Это исследование показало важную роль толщины слоя нескального основания в формировании деформаций экрана. Самые большие прогибы экрана наблюдаются при самом слабом основании максимальной толщины. Чем больше мощность этого слоя, тем больше прогибы бетонного экрана и величина сжимающих продольных сил в нижней части экрана (рисунок 2,а). Однако на максимальные изгибающие моменты толщина оказывает меньшее влияние (рисунок 2,б).

Чтобы проверить эти результаты, полученные с помощью программы NDS_N, были проведены дополнительные расчеты с помощью программного комплекса Plaxis 2D.

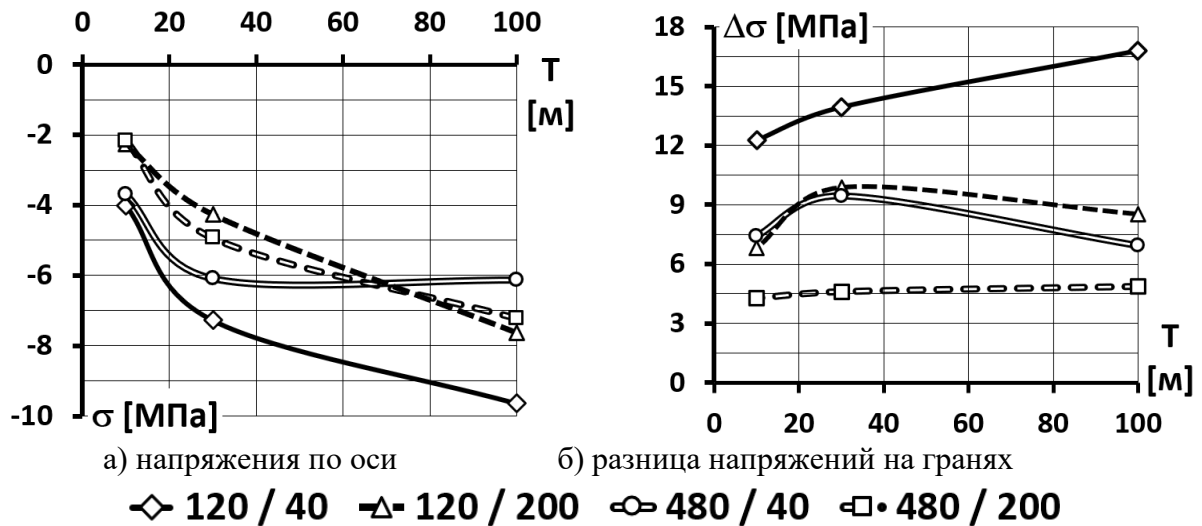


Рисунок 2 – Максимальные напряжения в бетонном экране в зависимости от толщины основания

Первая цифра – модуль деформируемости тела плотины; вторая цифра – модуль деформируемости основания

НДС сооружения, полученное расчётом по двум программным комплексам, получено схожим. Смещения ПФУ (рисунок 3) и прогибы экрана близки по величине и характеру распределения по высоте. Отличия проявляются в величинах напряжений в элементах ПФУ. По программе Plaxis 2D в экране проявляются более высокие растягивающие напряжения (рисунок 4). Отличия в результатах расчёта следует связывать с разными принципами моделирования контактного взаимодействия между плотиной и экраном. В целом проверочный расчёт по программе Plaxis 2D подтвердил корректность результатов моделирования НДС плотин, полученных по авторской вычислительной программе.

Исследование НДС плотины Miaojiaba (Китай, высота 111 м) выполнялись в плоской и трёхмерной постановке. Параметры модели грунтов выбирались подбором из условия соответствия расчётных перемещений экрана и стены с результатами натурных измерений.

Анализ результатов расчётов составного ПФУ показал, что все его части находятся в сложном НДС. Они испытывают сложные, пространственные изгибные и продольные деформации, а также проявляются нелинейные эффекты контактного взаимодействия элементов конструкции.

Наиболее опасными участками составного ПФУ, в которых может происходить нарушение герметичности, являются примыкание экрана к основанию, а также примыкание стены к бетонному понуру. На этих участках могут возникать растягивающие напряжения, которые значительно превышают прочность бетона на растяжение. Без принятия специальных мер тут будут образовывать трещины. Противофильтрационную стену рекомендуется выполнять не из жёсткого бетона, а из глиноцементобетона. Особые опасения вызывает напряжённое состояние понура (рисунок 5), во избежание образования трещин следует выполнять его разрезку швами.

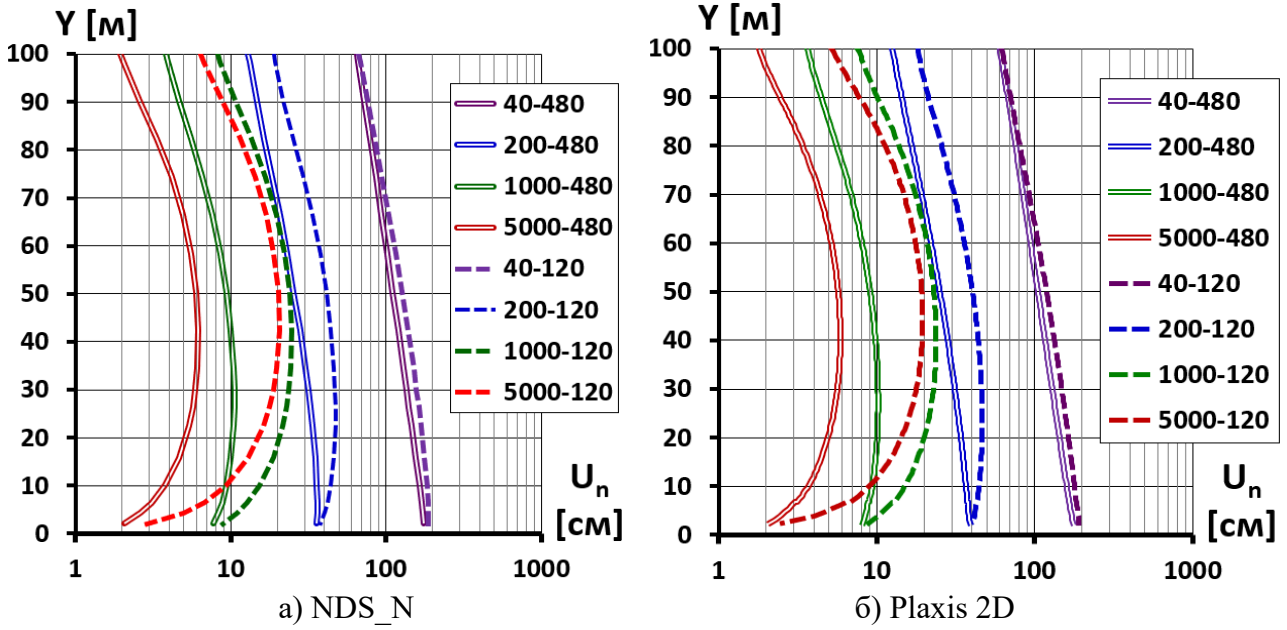


Рисунок 3 – Прогибы экрана различных вариантов по результатам расчётов по двум программам

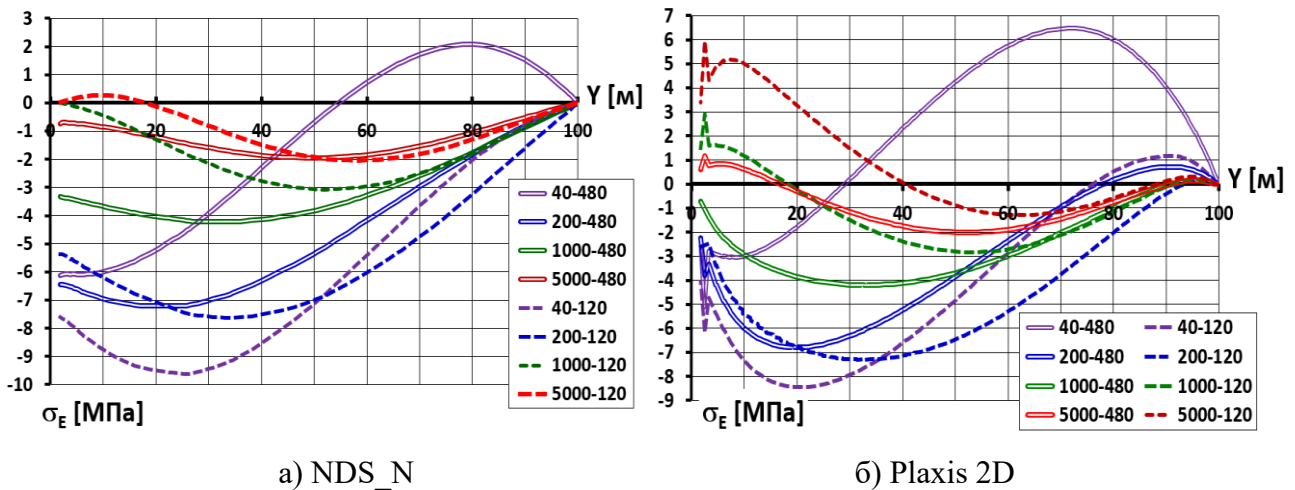


Рисунок 4 – Распределение продольных напряжений в экране для различных вариантов по результатам расчёта по двумя программам

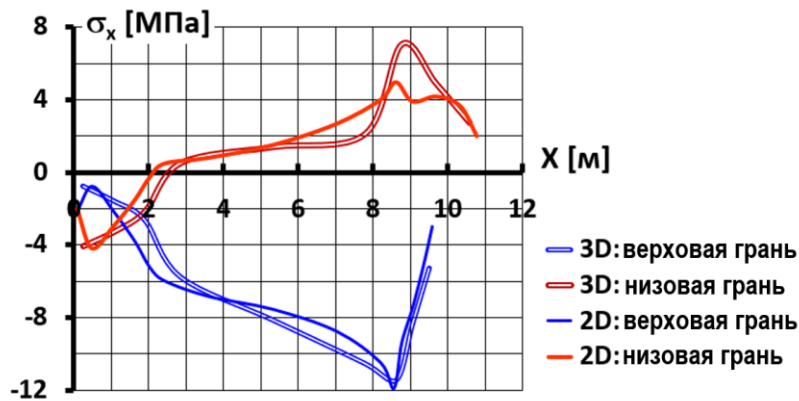


Рисунок 5 – Горизонтальные напряжения на верхней и нижней грани понура 2D – плоская задача; 3D – пространственная задача.

Сравнение плоского и пространственного НДС сооружения показало их значительные различия. В пространственной задаче фиксируется появление растягивающих напряжений в бетонном экране (рисунок 6), а также отрыв ПФС от скальных бортов. Однако, даже решение задачи НДС в плоской постановке позволяет найти уязвимые элементы конструкции.

Помимо этого, было изучено НДС узла сопряжения при использовании более мягких материалов и изменении его конструкции. В первом варианте стена и понур выполнялись из бетона, при этом оголовок стены упирался в конец понура. Во втором варианте ПФС выполнена из глиноцементобетона, а понур – из асфальтобетона и покрывает оголовок стены. Модуль деформации глиноцементобетона принимался равным 1000 МПа, а асфальтобетона – 60 МПа.

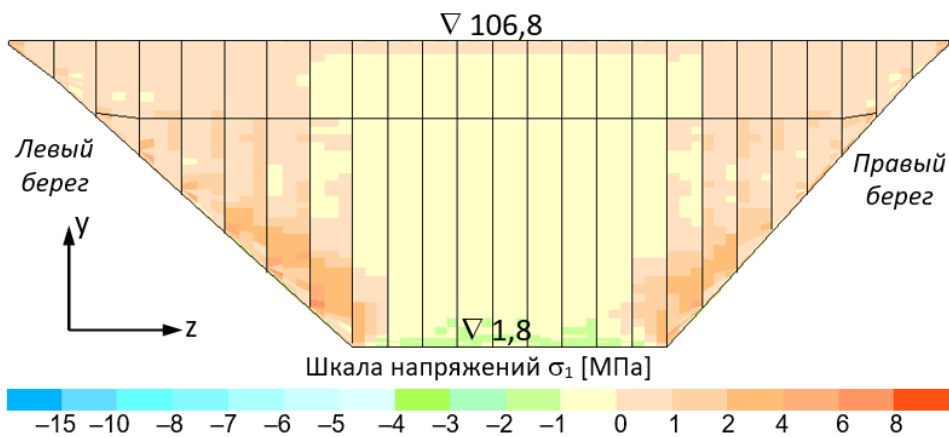


Рисунок 6 – Максимальные главные напряжения на верховой грани экрана (для плотины Miaojiaaba)

Анализ НДС ПФС показал, что при выполнении понура из асфальтобетона характерно значительное увеличение смещений оголовка. Однако рост деформаций изгиба не несёт существенного негативного эффекта благодаря тому, что стена выполнена из глиноцементобетона. Растягивающих напряжений в стене не возникает, а сжимающие напряжения в стене не превышают прочность глиноцементобетона на одноосное сжатие (рисунок 7).

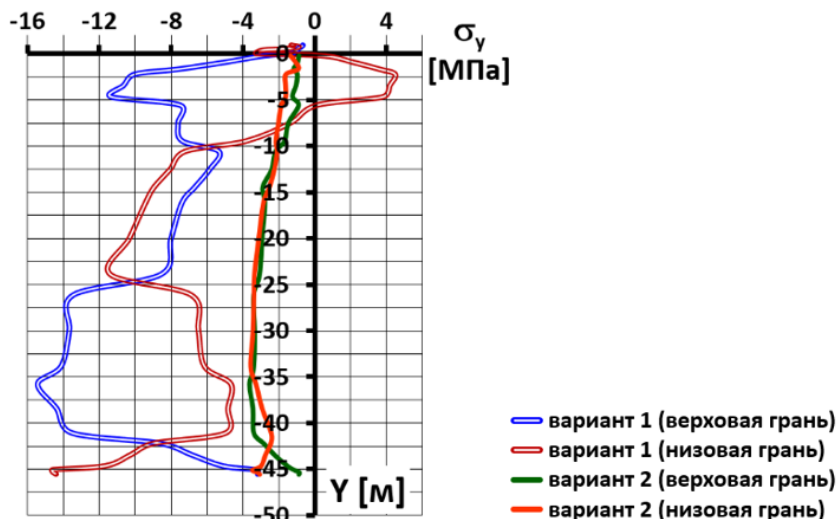


Рисунок 7 – Вертикальные напряжения в стене (для плотины Miaojiaaba)

Глава 4 посвящена исследованиям работоспособности плотин, в теле которых выполнен ПФУ, состоящий из БЭ и ПФС.

Так как случаи применения данного вида плотин редки, то исследования проводились на примере двух построенных плотин Arkun, Hengshan, а также конструкции абстрактной сверхвысокой плотины.

Составное ПФУ плотины Hengshan (Китай, высота 70,2 м) было создано в результате реконструкции каменно-земляной плотины с ядром. Реконструкция осуществлялась путём строительства с низовой стороны от существующей плотины новой, более высокой части – каменно-набросной плотины с бетонным экраном. Для обеспечения фильтрационной прочности ядра в условиях увеличения напора в нём была выполнена ПФС. Сопряжение двух элементов осуществлено с помощью горизонтальной соединительной плиты из бетона.

Расчёты НДС плотины Hengshan выполнялись для двух вариантов материала ПФС: 1) бетон, 2) пластичный бетон (глиноцементобетон) с модулем деформации $E=1000$ МПа. Они продемонстрировали взаимосвязь НДС всех элементов, входящих в составной ПФУ: при изменении конструкции или характеристик их материалов изменяется НДС других элементов.

Было выявлено, что наиболее уязвимым элементом составного ПФУ рассмотренной плотины является соединительная плита (понура). Из-за неравномерности осадок плотины понур испытывает значительные деформации изгиба, что в свою очередь приводит к возникновению значительных растягивающих напряжений (рисунок 8). Требуются специальные мероприятия для обеспечения прочности понура. Улучшению НДС узла сопряжения способствует выполнение ПФС из глиноцементобетона. Это приводит к уменьшению как сжимающих, так и растягивающих напряжений как в самой ПФС, так и в понуре.

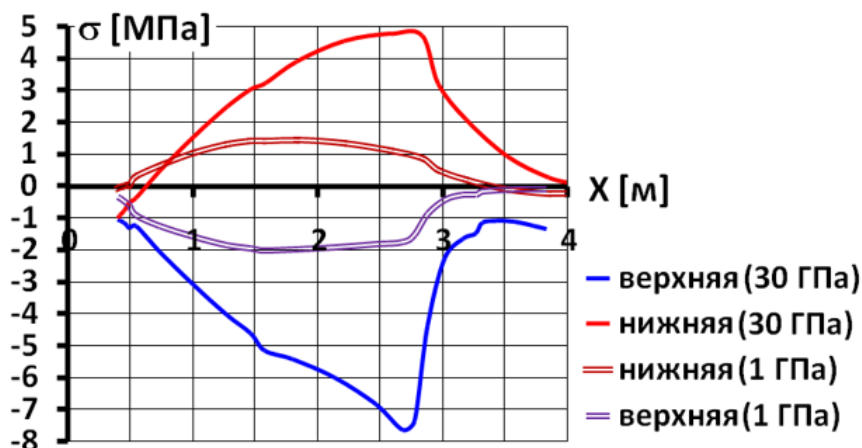


Рисунок 8 – Распределение горизонтальных напряжений на гранях по длине правой части бетонного понура

Плотина Arkun (Турция, высота 140 м) является единственной построенной плотиной, в которой составное ПФУ в виде БЭ и понура предусмотрено по проекту. Для калибровки модели этой плотины использовались данные натурных измерений за осадками плотины. Исследования НДС плотины Arkun также подтвердили, что узел сопряжения двух элементов составного ПФУ, выполненный в виде понура, не обладает необходимым уровнем

надёжности. Чтобы в нём не образовывались трещины, он должен быть заранее разрезан швами на отдельные плиты.

Перечисленные выше исследования показали возможность применения составного ПФУ в конструкциях высоких плотин. Поэтому нами было проведено исследование НДС абстрактной сверхвысокой плотины (рисунок 9). Учитывая уязвимость узла сопряжения БЭ и ПФС, нами была рассмотрена конструкция сопряжения через бетонную галерею. Принималось, что ПФС выполнена из глиноцементобетона.

Расчётами НДС было выявлено, что для рассмотренной конструкции сверхвысокой плотины характерно возникновение в экране высоких сжимающих продольных сил, а также растягивающих напряжений на контакте с жёсткой бетонной галереей. Поэтому потребовалось выполнить поиск оптимальных конструктивных решений, обеспечивающих прочность элементов составного ПФУ.

Для этого методом факторного анализа было изучено влияние различных факторов на НДС элементов составного ПФУ в теле плотины. В качестве факторов выступали: деформируемость каменной наброски; модуль деформации ПФС из глиноцементобетона, высота ПФС из глиноцементобетона, максимальная толщина БЭ (внизу). Всего были рассмотрены 16 расчётных вариантов, для каждого из которых была составлена конечно-элементная модель и проведён расчёт НДС.

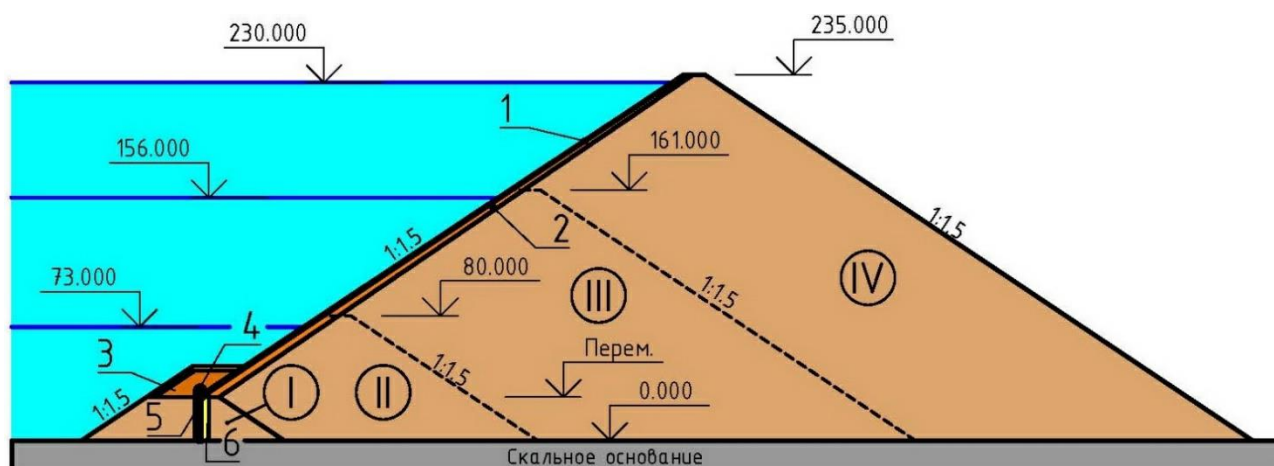


Рисунок 9 – Схема конструкции сверхвысокой каменно-набросной плотины с составным противодиффузионным устройством

1 – бетонный экран; 2 – подэкранный пояс; 3 – защитная призма; 4 – бетонная галерея; 5 – ПФС из глиноцементобетона; 6 – гравийно-песчаное ядро; I, II, III, IV – очереди возведения плотины.

Анализ влияния выбранных факторов на НДС показал, что на максимальную величину сжимающих напряжений в БЭ наибольшее влияние оказывает деформируемость каменной наброски. Снижение деформируемости наброски в 2 раза ведёт к уменьшению максимальных сжимающих напряжений в БЭ на 4,7 МПа, растягивающих – на 0,3 МПа (рисунок 10). Однако в процентном отношении это влияние меньше – соответственно 26% и 20%. Влияние толщины экрана и жёсткости стены ещё слабее. Увеличение толщины ведёт к росту сжимающих напряжений, а увеличение жёсткости стены – к их снижению.

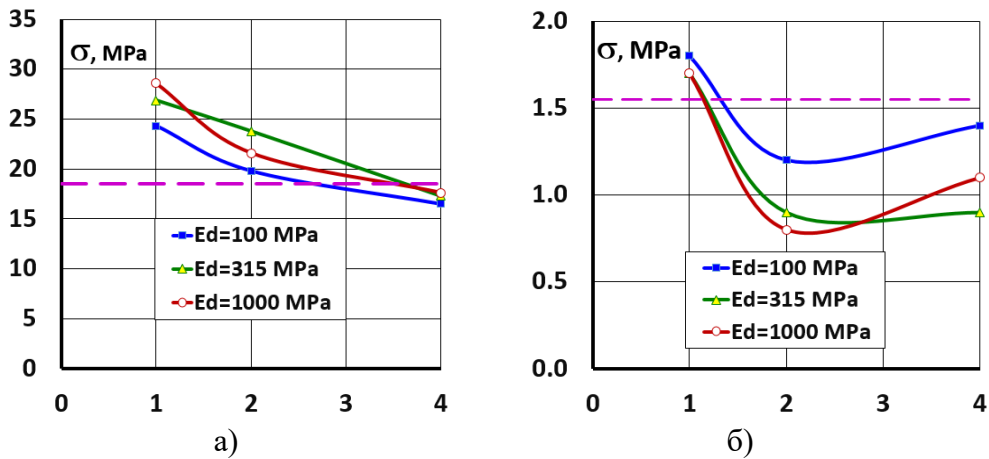


Рисунок 10 – Изменение параметров НДС БЭ

а – максимальные сжимающие напряжения; б – максимальные растягивающие напряжения; E_d – модуль деформаций глиноцементобетона; пунктирная линия – ограничения для фактора; горизонтальная ось – относительная величина модуля деформации каменной наброски.

На максимальную величину растягивающих напряжений в БЭ сильно влияет толщина самого экрана – увеличение толщины повышает растягивающие напряжения. Таким образом, с точки зрения обеспечения прочности выгоднее использовать тонкий экран, т.к. это уменьшает моментную составляющую напряжений. Деформируемость каменной наброски и жёсткость стены имеют меньшее влияние на растягивающие напряжения в БЭ. Снижение деформируемости каменной наброски и повышение жёсткости стены уменьшает растягивающие напряжения в БЭ. Высота стены влияет на НДС БЭ меньше других факторов.

На прочность стены (при сжатии) наибольшее влияние оказывают деформируемость глиноцементобетона и деформируемость каменной наброски. Снижение деформируемости каменной наброски увеличивает коэффициент запаса прочности стены на сжатие, а увеличение жёсткости стены уменьшает его.

На максимальные величины растягивающих напряжений в стене сильнее всего влияет деформируемость глиноцементобетона. Её влияние больше, чем влияние деформируемости каменной наброски и высоты стены.

С помощью методики факторного анализа были построены функции, описывающие изменение параметров работоспособности, а также стоимости ПФУ в зависимости от рассматриваемых факторов. Построение этих функций позволило выполнить оптимизацию конструкции сверхвысокой каменно-набросной плотины. В результате оптимизации были получены следующие рекомендации для конструирования сверхвысоких плотин данного типа:

- Модуль деформации каменной наброски должен составлять не менее 250 МПа для того, чтобы обеспечить прочность бетонного экрана и ПФС.
- Снижение продольных сжимающих напряжений в БЭ должно достигаться не за счёт увеличения его толщины, а за счёт снижения деформируемости каменной наброски. Это связано с тем, что увеличение толщины экрана ведёт к увеличению моментной составляющей в распределении напряжений. Толщина БЭ может быть принята равной 0,5% от высоты плотины.
- ПФС должен выполняться не из жёсткого бетона, а только из глиноцементобетона, приближенного по деформируемости к грунту плотины.

• Для обеспечения благоприятного характера НДС БЭ желательно, чтобы стена не была слишком жёсткой в сравнении с каменной наброской. Можно рекомендовать использовать правило, что модуль деформации глиноцементобетона должен отличаться от модуля деформации каменной наброски не более, чем в 2 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам данной работы можно сделать следующие общие **выводы и рекомендации**:

1. Составное противодиффузионное устройство, включающее бетонный экран плотины и «стену в грунте» в основании, зарекомендовал себя на ряде высоких плотин как надёжное противодиффузионное устройство. Однако, как любая сложная система, составное ПФУ имеет повышенный риск потери работоспособности. Выявлен целый ряд возможных причин и зон нарушения герметичности. Основными уязвимыми участками ПФУ, в которых возможно нарушение целостности, являются сопряжение БЭ, «стены в грунте» со скальными бортами, а также узел сопряжения элементов конструкции.

2. Рассмотренный тип составного ПФУ находится в сложном напряжённо-деформированном состоянии и характеризуется не только деформациями поперечного изгиба, но и продольными деформациями (укорачивания-удлинения) тонкостенных элементов конструкции. Продольные силы возникают от сил трения по боковой поверхности конструкции. Они могут стать основной причиной возможной потери прочности тонкостенных конструкций составного ПФУ: бетонного экрана и «стены в грунте».

3. Чтобы обеспечить достоверность результатов численного моделирования составного ПФУ из негрунтовых элементов, необходимо тщательно воспроизводить условия их работы, соблюдая определённые правила. Необходимо:

- использовать элементы высокого порядка для моделирования сложного поведения тонкостенных конструкций и прилегающих к ним грунтов;
- учитывать такие нелинейные эффекты контактного взаимодействия, как проскальзывание и отрыв, которые могут возникать при взаимодействии негрунтовых элементов с грунтовым массивом и между собой;
- учитывать поэтапность возведения плотины, технологическую схему возведения ПФУ, а также последовательность их нагружения.

Нелинейные эффекты, последовательность возведения и нагружения сооружения оказывают решающее влияние на НДС составного ПФУ.

4. НДС бетонного экрана каменно-набросной плотины значительно зависит от жёсткости основания: от мощности слоя и деформируемости нескальных грунтов основания. Если грунты основания сильно отличаются от грунтов плотины по деформируемости, экран испытывает значительные сжимающие, а на некоторых участках даже и растягивающие продольные силы и напряжения. Чтобы избежать потери прочности экрана, можно использовать правило, что модули деформации грунтов основания и плотины должны различаться не более, чем в 3 раза.

Уменьшить продольные силы в бетонном экране можно путём увеличения его толщины, однако, это может привести к возникновению значительных растягивающих напряжений при поперечном изгибе. Поэтому более эффективными способами являются: уменьшение трения на контакте с плотиной, снижение деформируемости нескального основания, а также снижение жёсткости периметрального шва.

5. «Стена в грунте», скомбинированная с экраном, работает в более благоприятных условиях, чем стена-диафрагма, расположенная в центральной части профиля плотины. Однако это не избавляет стену от риска потери прочности на сжатие или растяжение. Потеря прочности может быть вызвана несколькими причинами. Во-первых, это значительные сжимающие продольные силы, воспринимаемые «стеной в грунте» от осадок грунта. Во-вторых, это сложные деформации изгиба стены в зоне сопряжения со скальным основанием и понуром.

Основным способом обеспечения прочности стены является применение менее жёсткого материала. Благоприятное НДС ПФС наблюдается, когда стена выполнена из материала, модуль деформации которого близок к модулю деформации окружающего грунта. В большинстве случаев в качестве материала стены нужно использовать пластичный бетон.

6. НДС составного ПФУ зависит от многих факторов, однако основными из них являются деформативные свойства материалов: каменной наброски, грунтов основания и негрунтовых материалов конструкций ПФУ. Сочетание этих свойств формирует НДС элементов составного ПФУ. НДС составных частей ПФУ взаимосвязано друг с другом и зависит от особенностей конструкции и материала каждого из составляющих его элементов.

7. Самым сложным, проблемным вопросом обеспечения надёжности составного ПФУ является выбор способа сопряжения БЭ и «стены в грунте». В современных плотинах в качестве соединительного элемента используется горизонтальный бетонный понур. Многократное применение этого способа сопряжения показало его эффективность и работоспособность. Однако эта часть является наименее надёжной в конструкции составного ПФУ. Во-первых, контакт между стеной и понуром испытывает смещения в несколько сантиметров. Во-вторых, сам понур испытывает деформации изгиба, столь значительные, что не могут быть восприняты бетоном без образования трещин.

Могут быть предложены несколько способов решения данной проблемы. Основным, хорошо зарекомендовавшим себя способом является разрезка понура на отдельные плиты вертикальными швами. Эти швы позволяют исключить образование растягивающих напряжений и, соответственно, образование трещин. Однако, необходимо иметь в виду, что предсказать положение трещин сложно, поэтому этот способ необязательно гарантирует надёжность понура.

Эффективным является ещё один способ – выполнение понура из менее жестких материалов, например, асфальтобетона.

В качестве альтернативного варианта соединительного элемента можно использовать железобетонную галерею, однако его применение возможно только при выполнении стены из пластичного бетона.

8. Рассмотренный тип составного ПФУ имеет перспективы применения не только как водонепроницаемый контур грунтовой плотины на нескальном основании, но и для создания грунтовой плотины нового типа. Применение составного ПФУ может рассматриваться как способ совершенствования традиционной конструкции каменно-набросной плотины с БЭ, как способ повышения её надёжности.

При соблюдении определённых правил проектирования составное ПФУ может являться работоспособным даже при сверхвысоких напорах. При проектировании сверхвысокой каменно-набросной с составным ПФУ в виде БЭ и «стены в грунте» на скальном основании можно использовать следующие рекомендации.

- Для обеспечения прочности БЭ и ПФС модуль деформации каменной наброски тела плотины должен составлять не менее 250 МПа.

- Высота ПФС должна быть не большой, около 20 м для того, чтобы снизить продольные сжимающие усилия в ней.

- В качестве материала ПФС нужно использовать глиноцементобетон. Модуль деформации глиноцементобетона должен быть равен модулю деформации тела плотины, либо не должен отличаться от него более, чем в 2 раза.

- Толщина БЭ не должна превышать 0,5% от высоты плотины, чтобы не допустить возникновения растягивающих напряжений от деформаций изгиба.

- Для уменьшения продольных сжимающих напряжений в нижней части БЭ, рекомендуется выполнять периметральный шов широким с заполнением мягким материалом.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы состоят в изучении различных вариантов узлов сопряжения ПФС и БЭ, а также ПФС со скальным основанием.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:

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

2. Саинов М.П., Королев Д.В., Сорока В.Б. Каменно-набросные плотины с железобетонным экраном: опыт исследований напряженно-деформированного состояния // Вестник МГСУ. 2019. № 2(125). С.207-224.

3. Саинов М.П., Сорока В.Б. Влияние толщины нескального основания на напряженно-деформированное состояние бетонного экрана каменно-набросной плотины // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2021. №301. С.60-65.

4. Саинов М. П., Сорока В. Б. Напряженно-деформированное состояние плотины «Аркун» с противofильтрационным элементом в составе железобетонного экрана и «стены в грунте» // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2022. №303. С. 94-108.

5. Саинов М.П., Сорока В.Б. Совершенствование противofильтрационного устройства грунтовой плотины в составе бетонного экрана и «стены в грунте» // Строительство: наука и образование. 2022. №12(1). С.17-37.

Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международной реферативной базе Scopus

6. Sainov, M.P., Soroka, V.B. Ultra-high rockfill dam with combination of the reinforced concrete face and clay-cement diaphragm // Magazine of Civil Engineering. 2018. Volume 81. Issue 5. pp. 135-148

Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:

7. Саинов М.П., Сорока В.Б. Работоспособность конструкции грунтовой плотины Хэншань с бетонным экраном и противofильтрационной диафрагмой // Вестник евразийской науки. 2020. №12(2). С.15.

8. Sainov, M.P., Soroka, V.B. Impact of Foundation Stiffness on Stress-Strain State of Concrete Faced Rockfill Dam // Construction of Unique Buildings and Structures. 2021. Volume 96. Issue 3. pp.9604.

9. Sainov, M.P., Soroka, V.B., Gunasekaran M. Combination of rockfill dam reinforced concrete face and seepage control wall in the foundation: stress-strain state // Construction of Unique Buildings and Structures. 2022. Volume 99. Issue 1. Article No 9902.

10. Саинов М.П., Котов Ф.В., Сорока В.Б. О выборе типа негрунтового противофильтрационного элемента сверхвысокой грунтовой плотины. В сборнике докладов научно-технической конференции «Гидроэнергетика. Гидротехника Новые разработки и технологии» (ВНИИГ им. Веденеева, 2017 г.). С.216.

11. Сорока В.Б., Саинов М.П. Исследование работоспособности сверхвысокой каменно-набросной плотины с комбинацией тонкостенных противофильтрационных элементов. В сборнике трудов конференции «Строительство – формирование среды жизнедеятельности». 2017. С.1188-1190.

12. Сорока В.Б. Влияние жёсткости основания на напряженно-деформированное состояние бетонного экрана каменно-набросной плотины. В сборнике тезисов докладов на конференции «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства». 2021. С.15-16.