

На правах рукописи



ФЕДОРОВ
Илья Владиславович

**МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ
БЕТОННЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ
С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Специальность: 05.23.07 – Гидротехническое строительство

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2020

Работа выполнена в Акционерном обществе
«Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники
имени Б.Е. Веденеева»

Научный руководитель:

Цейтлин Борис Вениаминович, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела «Статика и сейсмостойкость бетонных и железобетонных сооружений»

Официальные оппоненты:

Уздин Александр Моисеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Механика и прочность материалов и конструкций» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»

Бестужева Александра Станиславовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Гидравлики и гидротехнического строительства» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита состоится «25» декабря 2020 г. в 10.00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.187.02 на базе Акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева», Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21.

Е-mail: ivanovatv@vniig.ru

Тел.: +7(812)493-93-63

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» и на сайте www.vniig.rushydro.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук

Т.В. Иванова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Гидротехнические сооружения (ГТС) и, в частности, высокие бетонные плотины, являются объектами повышенной опасности, повреждения которых могут приводить не только к существенному материальному ущербу, но и многочисленным человеческим жертвам. Большое число ГТС построено в районах с высокой сейсмичностью, а в мировой практике известны примеры серьезных повреждений крупных плотин в результате землетрясений.

Для контроля надежности как проектируемых, так и эксплуатируемых ГТС проводят расчетные исследования по оценке прочности и устойчивости сооружений при действии возможных сочетаний нагрузок. В соответствии с действующими нормативными документами оценку прочности гидротехнических сооружений, таких как высокие гравитационные бетонные плотины, следует проводить по динамической теории сейсмостойкости, а напряжения и перемещения рекомендуется определять с учетом неупругого поведения бетона.

В современной практике при моделировании системы «сооружение основание-водохранилище» зачастую ограничиваются линейно-упругими моделями или трехлинейными диаграммами деформирования, применение которых не позволяет учесть перераспределение напряжений в модели, обусловленное микротрещинообразованием в бетоне.

Постоянное развитие вычислительной техники и численных методов позволяет использовать все более сложные комплексные подходы к моделированию бетонных сооружений. В то же время опыт применения современных методов при расчетных исследованиях бетонных ГТС пока весьма ограничен. Усовершенствованные подходы и модели позволяют точнее прогнозировать последствия воздействия динамических нагрузок на сооружения и тем самым повысить надежность их эксплуатации.

Таким образом, актуальность работы обусловлена отсутствием в современной практике однозначного подхода к моделированию динамического поведения гидротехнических сооружений и необходимостью совершенствования методики расчета гидротехнических сооружений на действие аварийных динамических нагрузок с учетом нелинейного поведения бетона, обусловленного эффектами трещинообразования в элементах конструкции.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в развитие методов расчета ГТС внесли такие ученые как А.М. Белостоцкий, А.С. Бестужева, В.И. Бронштейн, П.И. Васильев, А.В. Вовкушевский, Л.А. Гордон, В.Б. Глаговский, С.Е. Лисичкин, Б.Д. Кауфман, Ю.Б. Мгалобелов, Л.А. Розин, О.Д. Рубин, О.А. Савинов, Л.П. Трапезников, А.М. Уздин, А.А. Храпков, Б.В. Цейтлин, С.Г. Шульман, И.С. Шейнин, Б.А. Шойхет, и др. Вопросами нелинейного поведения бетона в разные годы занимались так же А.В. Бенин, Н.И. Карпенко, М.С. Ламкин, К.А. Мальцов, А.П. Пак, А.С. Семенов, В.В. Толстикова. Среди зарубежных авторов стоит отметить работы Г. М. Вестергарда, Е.Л. Вилсона, А.К. Чопры, посвященные взаимодействию сооружений с жидкостью, а также труды А. Гриффитса, Дж.Р. Ирвина, А. Хиллерборга, П. Петерсона, З. Бажанта и др. в области разработки математических моделей разрушения бето-

на.

Авторы рассматривают отдельные факторы, оказывающие влияние на результаты расчетов по определению НДС при действии динамических нагрузок, а предлагаемые ими подходы могут отличаться и приводить к разным результатам. В настоящее время не существует единого подхода к моделированию динамического поведения системы «сооружение-основание-водохранилище» и учету нелинейного поведения бетона, связанного с трещинообразованием.

Цели и задачи исследования. Целью работы является разработка методики моделирования напряженно-деформированного состояния бетонных гидротехнических сооружений при динамических воздействиях с учетом нелинейного деформирования бетона. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- оценка влияния на динамическое поведение модели сооружения таких факторов как способ задания сейсмического воздействия, граничные условия по краям расчетной области, учет сжимаемости жидкости;
- разработка методики численного моделирования динамического НДС системы «сооружение-основание-водохранилище», учитывающей нелинейное деформирование бетона;
- оценка влияния отдельных параметров упругопластической модели бетона на результаты моделирования;
- реализация и верификация разработанной методики в рамках программного комплекса на основе метода конечных элементов;
- применение разработанной методики для определения параметров напряженно-деформированного состояния бетонной плотины при действии сейсмических нагрузок.

Объектом исследования являются бетонные гидротехнические сооружения, подверженные воздействию динамических нагрузок.

Предмет исследования – определение параметров НДС системы «сооружение-основание-водохранилище», вызванного действием динамических нагрузок, включающих сейсмические воздействия.

Область исследования соответствует требованиям паспорта специальности ВАК: 05.23.07 – Гидротехническое строительство (пункты 2, 3).

Методология и методы исследования. В работе использовались методы математического моделирования, опирающиеся на современные достижения механики деформируемого твёрдого тела, механики разрушения и математической физики в области численного определения параметров НДС пространственных систем при статических и динамических нагрузках. Реализация методик, описанных в работе, проводилась с использованием конечно-элементных программных комплексов ANSYS и Abaqus, использующих расчетные подходы на основе метода конечных элементов (МКЭ).

Научная новизна исследования состоит в следующем:

1. разработана методика моделирования системы «сооружение-основание-водохранилище» при сейсмических воздействиях с учетом нелинейного деформирования бетона, базирующаяся на использовании упругопластической модели поведения материала и учете полной диаграммы деформирования бетона при растяжении;

2. на основании анализа и обобщения информации о физико-механических характеристиках бетона, в том числе, с учетом его нелинейного поведения, определен подход к построению расчетной полной диаграммы деформирования бетона при растяжении;
3. проведено численное моделирование НДС плотины Бурейской ГЭС при действии нагрузок особого сочетания, включающего сейсмические воздействия, с учетом полной диаграммы деформирования бетона; определены области возможного трещинообразования при действии сейсмических нагрузок уровня МРЗ;
4. обоснована целесообразность совершенствования нормативных документов в части рекомендаций по учету нелинейного деформирования бетона, связанного с трещинообразованием, и выбору необходимых расчетных значений параметров бетона;
5. на примере расчетного моделирования бетонной плотины Бурейской ГЭС показано влияние учета сжимаемости жидкости и демпфирующих свойств наносов на дне водохранилища на параметры НДС при действии сейсмических нагрузок; продемонстрировано влияние учета сжимаемости жидкости в водопроводящем тракте на результаты моделирования НДС стационарной секции плотины при действии эксплуатационных динамических нагрузок.

Теоретическая и практическая значимость заключается в разработке методики моделирования динамического поведения бетонных гидротехнических сооружений с учетом нелинейного деформирования бетона, связанного с трещинообразованием. Приведенные в работе результаты исследований и полученные выводы позволяют более корректно выбирать подходы к учету различных факторов, влияющих на НДС системы «сооружение-основание-водохранилище» при действии динамических нагрузок, что позволяет повысить качество получаемых оценок прочности и устойчивости бетонных ГТС. Результаты работы были использованы в расчетных исследованиях прочности и устойчивости бетонной гравитационной плотины Бурейской ГЭС при действии особых сочетаний нагрузок, включающих сейсмические воздействия.

Личный вклад. Автор принимал участие в формулировке задач исследований; разработке пространственной конечно-элементной модели системы «сооружение-основание-водохранилище» Бурейской ГЭС; проведении расчетных исследований и анализе их результатов.

Лично автором:

- разработана методика моделирования НДС системы «сооружение-основание-водохранилище» с учетом нелинейного деформирования бетона при сейсмических воздействиях;
- разработаны двумерные расчетные схемы типовых секций Бурейской ГЭС и выполнена серия расчетов, которые позволили рассмотреть различные подходы к учету особенностей моделирования динамического поведения системы «сооружение-основание-водохранилище»;
- рассмотрен подход к построению кусочно-линейной аппроксимации полной диаграммы деформирования бетона при растяжении на основе параметров бетона, представленных в нормативных документах при

- известном значении удельной энергии разрушения;
- проведен анализ чувствительности результатов моделирования к изменению расчетных значений параметров упругопластической модели бетона;
 - рассмотрена задача о нелинейном поведении предварительно напряженной железобетонной плиты при действии нагрузок от взрывной волны;
 - проведено моделирование динамического поведения плотины Бурейской ГЭС при действии сейсмических нагрузок с использованием нелинейной модели бетона, учитывающей эффекты трещинообразования.

Автор выражает признательность научному руководителю работы кандидату технических наук Б.В. Цейтлину за введение в тему исследования, рекомендации по постановке задач и оказанное содействие при выполнении работы. На отдельных этапах в работе также принимали участие Е.Ю. Витохин и С.А. Ле-Захаров, которые стали соавторами ряда публикаций.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика численного моделирования системы «сооружение-основание-водохранилище» с учетом нелинейного деформирования бетона при сейсмических воздействиях;
2. Результаты численного моделирования НДС бетонной гравитационной плотины с учетом нелинейного поведения бетона, обусловленного трещинообразованием;
3. Результаты оценки прочности и устойчивости на сдвиг плотины Бурейской ГЭС при действии нагрузок особого сочетания, включающего сейсмические воздействия;
4. Оценка влияния учета полной диаграммы деформирования бетона при растяжении на результаты численного моделирования НДС бетонных и железобетонных конструкций;
5. Оценка влияния изменения отдельных параметров упругопластической модели бетона на результаты численного моделирования;
6. Оценка влияния учета сжимаемости жидкости и демпфирующих свойств наносов в водохранилище на результаты моделирования НДС плотины Бурейской ГЭС при динамических воздействиях.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов определяется использованием классических исходных положений и математических методов решения задач механики, применением сертифицированных расчётных программ, сопоставлением результатов численного моделирования с экспериментальными данными и результатами сейсмометрических наблюдений.

Основные положения диссертационной работы докладывались на 15-ти научно-практических конференциях и семинарах, включая международные: XXXIX Неделя науки СПб ГПУ (2010 г.), VII, VIII, X, XI, XII Научно-техническая конференция «Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии» (2012, 2014, 2016, 2017, 2018 гг.), XVIII зимняя школы по механике сплошных сред (2013 г.), XXIV, XXV, XXVI, XXVII Международная конференция "Математическое моделирование в механике деформируемых сред и

конструкций (2011, 2013, 2015, 2017 гг.), Международный форум Инженерные системы 2014, Международная научно-практическая конференция "Инженерные системы - 2017", Научный семинар – Савиновские чтения 2014, 2020.

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 23 печатных работах, 10 из них в изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем и структура диссертации: диссертационная работа состоит из введения, четырех глав основных результатов, заключения, списка литературных источников (211 наименований), содержит 155 страниц текста, включая 127 рисунков, 28 таблиц, и одно приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель работы, отражены научная новизна, практическая и теоретическая значимость полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор литературы по рассматриваемой проблеме.

На основании анализа отечественного и мирового опыта численного определения НДС бетонных ГТС уточнены задачи исследования. Выделены основные факторы, оказывающие существенное влияние на результаты моделирования динамического поведения бетонных сооружений: способ задания воздействия; выбор условий на границах расчетной области и параметров, обеспечивающих затухание колебаний в системе; совместная работа системы «сооружение-основание-водохранилище» с учетом гидродинамического воздействия жидкости; учет особенностей нелинейного поведения бетона, связанного с образованием трещин. Показана необходимость совершенствования используемых в расчетной практике методик моделирования бетонных ГТС с учетом указанных факторов, опираясь на современные возможности численного моделирования.

Во второй главе представлены результаты расчетов по определению НДС плотины, полученные с использованием различных подходов к моделированию системы «сооружения-основание-водохранилище» без учета особенностей нелинейного поведения бетона. Исследования проводились применительно к условиям эксплуатации бетонной гравитационной плотины Бурейской ГЭС.

Рассмотрены два подхода к формированию сейсмического воздействия, которые могут быть использованы при решении задачи методом прямого пошагового интегрирования. Первый подход заключается в задании воздействия, пересчитанного на нижнюю границу расчетной области основания. Вторым подходом основан на использовании метода суперпозиции и позволяет использовать воздействие, отвечающее дневной поверхности. При проведении расчетных исследований в обоих случаях используются наборы трехкомпонентных акселерограмм. Анализ результатов проведенных тестовых расчетов позволил выявить преимущества и недостатки рассмотренных методов. Метод суперпозиции приводит к заметно более низким расчетным значениям напряжений, что

может быть связано с возможностью задать условия неотражения вдоль нижней границы. Это позволяет учесть отток энергии не только через боковую поверхность области основания.

Проведено сравнение результатов численного моделирования НДС плотины при действии сейсмических нагрузок с использованием трех вариантов граничных условий по краям области основания: свободная граница, жесткое закрепление и двойная асимптотическая граница, которая представляет собой комбинацию пружин и демпферов. Использование двойной асимптотической границы, позволяет учесть затухание на границе расчетной области и избежать воздействия отраженных от нее волн. Однако для определения параметров соответствующих пружин необходимо проведение дополнительных статических расчетов «расширенной» системы.

Выполнена серия расчетов для оценки влияния эффекта сжимаемости воды водохранилища на НДС бетонной плотины при сейсмическом воздействии. Для учета сжимаемости жидкости использованы уравнения акустических колебаний в рамках подхода Эйлера с заданием в водной среде поля давления. Сравнение с результатами, полученными без учета сжимаемости жидкости с использованием присоединенных масс, показало, что учет сжимаемости жидкости в водохранилище может приводить к более высоким расчетным значениям перемещений и напряжений для высоких плотин.

Учет поглощения энергии дном водохранилища и наносами позволяет снизить пиковые значения параметров НДС модели при динамических воздействиях. Наличие наносов при проведении расчетных исследований может быть непосредственно смоделировано несколькими слоями конечных элементов с соответствующими физико-механическими свойствами. Результаты, полученные для различных величин толщины слоя наносов (рисунок 1), указывают на их существенное вклад в формирование НДС плотины при сейсмических воздействиях. Для более адекватного моделирования колебаний гравитационных плотин следует по возможности уточнять как толщины слоя наносов, так и их механические характеристики.

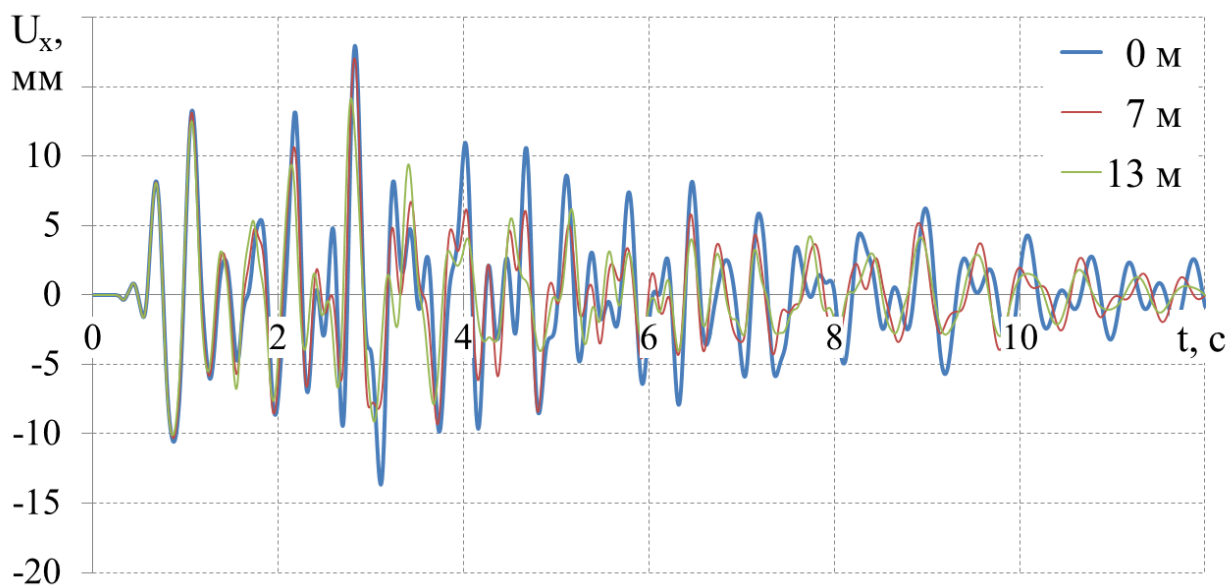


Рисунок 1 – Зависимость от времени t, c расчетных значений горизонтальных перемещений $U_x, мм$ в точке на гребне плотины при различных толщинах учитываемого слоя наносов на дне водохранилища

Проведено численное моделирование секции плотины Бурейской ГЭС с учетом возможности раскрытия горизонтального межблочного шва. Анализ полученных результатов показал, что учет возможности раскрытия одного шва в пределах до 13,5 м по длине оказывает локальное влияние на НДС моделируемого сооружения и данный эффект может не учитываться при построении глобальной пространственной модели системы «сооружение-основание-водохранилище».

Проведенные расчетные исследования позволили выбрать методику, которая может быть использована при разработке пространственных расчетных моделей бетонных ГЭС и обеспечит получение более точных результатов прогнозирования НДС сооружения при действии динамических нагрузок, включая сейсмические воздействия.

В третьей главе рассматриваются вопросы применения математических моделей нелинейного поведения бетона, обусловленного трещинообразованием.

Упругопластическая модель бетона характеризуется в первую очередь диаграммой зависимости напряжений от деформаций. Отечественные нормативные документы допускают использование любых диаграмм деформирования бетона, достаточно точно его описывающих. При этом рекомендуется использовать кусочно-линейные аппроксимации Прандтля, которые не учитывают ниспадающий участок диаграммы растяжения, соответствующий процессам трещинообразования. Расчетные параметры, описывающие ниспадающий участок диаграммы деформирования при растяжении могут быть определены на основе известных значений удельной энергии разрушения G_F и расчетных значений предела прочности R_{bt} . Кусочно-линейная аппроксимация полной диаграммы зависимости напряжений от деформаций растяжения примет вид, представленный на рисунке 2. Ниспадающую ветвь характеризуют значения относительных деформаций $\varepsilon_t^{wl} = \varepsilon_{bt2} + G_F/R_{bt}$ при напряжениях $0,2R_{bt}$ и $\varepsilon_t^{wc} = \varepsilon_{bt2} + 5G_F/R_{bt}$ при напряжениях, стремящихся к нулю.

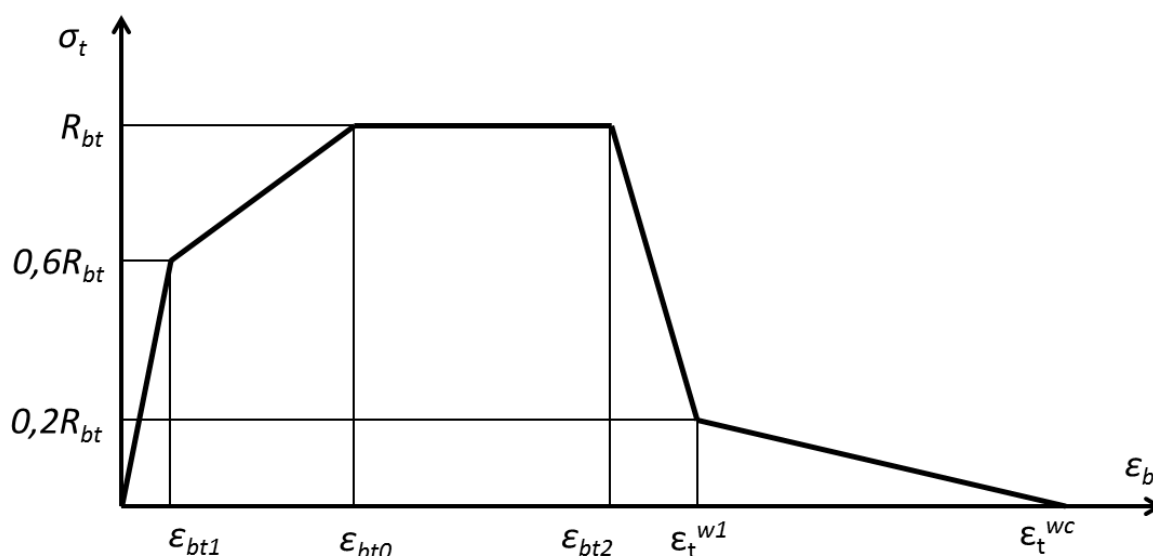


Рисунок 2 – Кусочно-линейная аппроксимация зависимости напряжений от деформаций бетона при растяжении с учетом ниспадающей ветви

Автором рассмотрена задача о моделировании изгиба железобетонной балки с использованием различных значений параметров упругопластической модели бетона. При расчетах с учетом ниспадающей ветви (1,2,3 на рисунке 3) при нагрузке в диапазоне 2-3 тс наблюдается характерный скачок диаграммы прогиба балки и деформаций арматуры, что можно объяснить развитием трещин в середине пролета балки и перераспределением напряжений между бетоном и арматурой. Данный эффект не наблюдается при использовании диаграммы без ниспадающей ветви (1 на рисунке 3). Применение значения предела упругости в 90% от предела прочности (3 на рисунке 3) позволяет уменьшить расхождение с экспериментальными данными, однако предлагаемое нормативными документами РФ значение 60% обеспечивает более консервативный результат. Также рассмотрено влияние изменения значений удельной энергии разрушения и угла дилатации на результаты моделирования НДС балки. Анализ полученных результатов показал, что изменение расчетных значений этих параметров может оказать значительное влияние на НДС при достаточно больших величинах нагрузок.

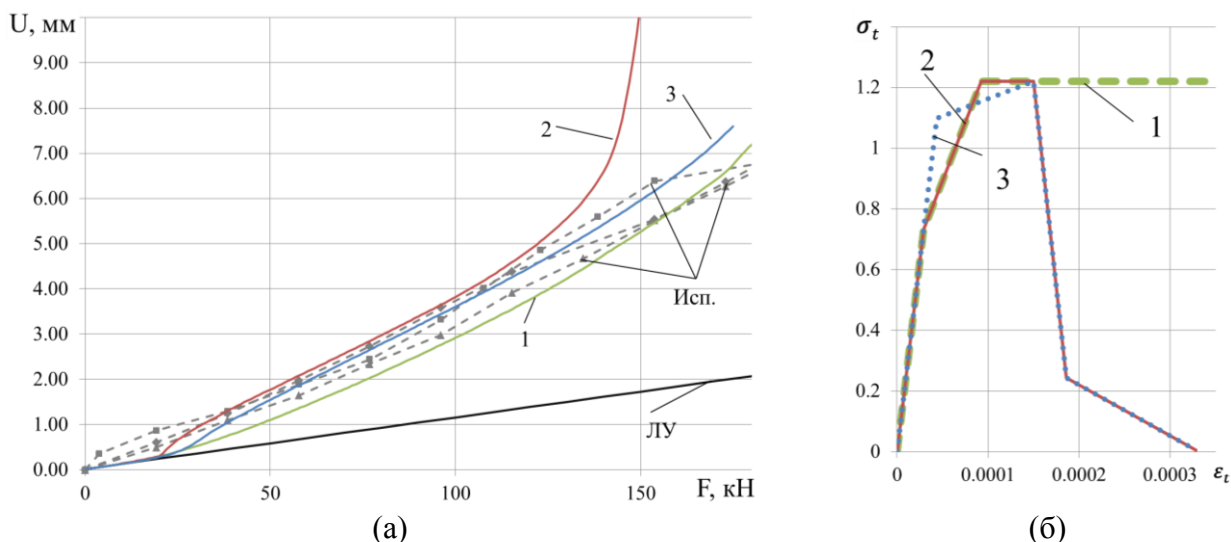


Рисунок 3 – Зависимость прогиба балки U , мм от величины прикладываемой нагрузки F , кН
 (а): Исп. – по результатам испытаний; ЛУ – по результатам конечно-элементного моделирования в предположении линейно-упругой работы материалов, 1,2,3 – с использованием упругопластической модели и различных вариантов аппроксимации диаграммы зависимости напряжений σ_t , МПа от деформаций ϵ_t бетона при растяжении (б)

На примере расчетов по определению напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов конструкции при действии особого сочетания нагрузок, включающего динамическое воздействие взрывной волны, продемонстрированы преимущества применения упругопластической модели при решении динамических задач. Обычно в инженерной практике принято использовать упрощенный квазистатический подход к моделированию таких воздействий, как удар или взрыв. При этом воздействие сводится к эквивалентной статической нагрузке, умножаемой на коэффициент динамичности, применение которого должно приводить к достаточной консервативности результатов для обеспечения надежности сооружения. По результатам расчетов квазистатическим методом показано, что максимальные сжимающие и растягивающие напряжения существенно превышают соответствующие пределы прочности для

используемых классов бетона. Конструкция работает явно вне упругой области, а значит, для более достоверной оценки, требуется решение динамической задачи и применение нелинейных моделей поведения материалов.

При решении задача определения НДС железобетонной плиты с использованием упругопластической модели, параметры эксплуатационного состояния, соответствующего действию постоянных и длительных нагрузок основного сочетания, определялись на первом статическом шаге расчета. На втором динамическом шаге в качестве воздействия задавалась зависимость давления от времени. Применение упругопластической модели позволило получить значения остаточных прогибов, связанных с образованием микротрещин и накоплением неупругих деформаций в бетоне.

Анализ результатов показал, что деформации сжатия бетона в поперечном направлении превышают значения предела упругости на поверхности плиты в центре пролета, а также с нижней стороны плиты в местах ее соединения со стенами (рисунок 4). В этих областях возможное хрупкое разрушение бетона, однако, деформации не превышают значений 0.0035, соответствующих полному выходу материала из работы. Упругие свойства бетона плиты сохраняются в середине сечения в области толщиной от 245 мм. Напряжения в арматуре верхней плиты при этом не превышают предельных значений, и арматура работает в упругой области.

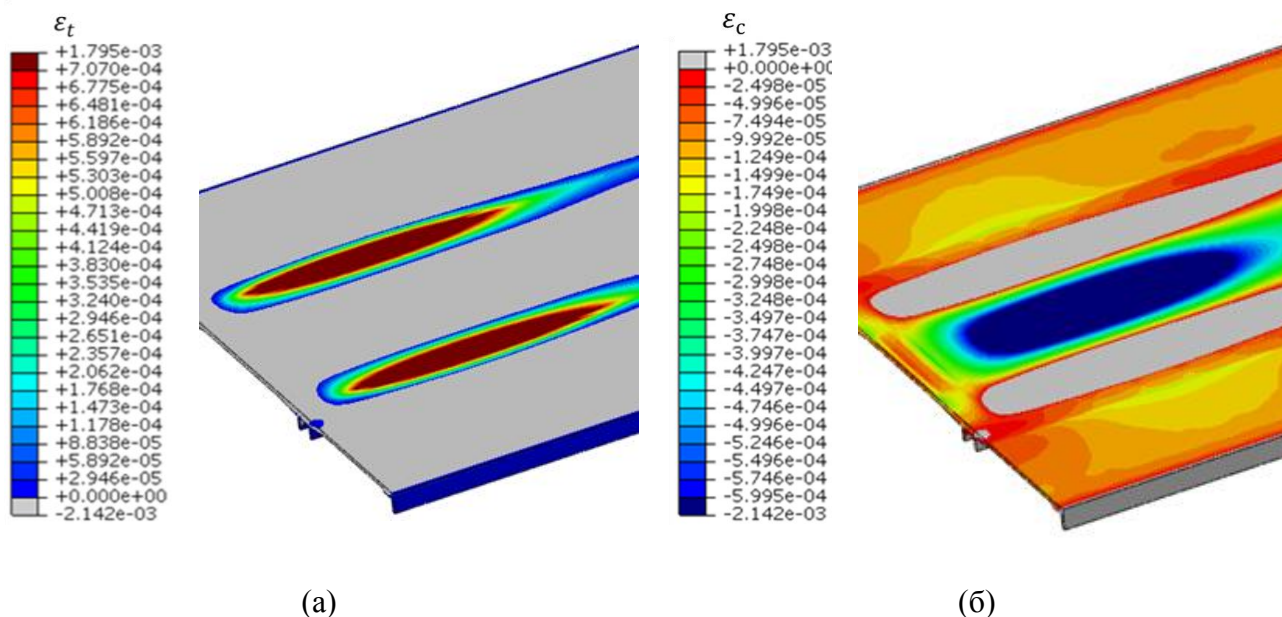


Рисунок 4 – Поля распределения деформаций растяжения ε_t (а) и сжатия ε_c (б) в модели железобетонной плиты (показан фрагмент) через 90 мс после начала действия взрыва

При действии сейсмических нагрузок уровня максимального расчетного землетрясения (МРЗ) в бетоне плотины могут наблюдаться зоны, где условие прочности не выполняется. На примере задачи о численном моделировании динамического поведения глухой секции гравитационной бетонной плотины рассмотрен подход к учету особенностей нелинейного поведения бетона, связанного с трещинообразованием. Для упрощения задача решалась в двумерной постановке, однако, рассмотренные подходы справедливы и при использовании пространственных моделей сооружений.

Были рассмотрены три варианта кусочно-линейных аппроксимаций для диаграмм деформирования при растяжении (1,2,3 на рисунке 5). При сейсмическом воздействии, имеющем явный циклический характер, на нелинейное поведение бетона оказывает влияние деградация упругих свойств материала, вызванная накоплением повреждений. Для учета этого эффекта применяется подход, опирающийся на использование параметра поврежденности d , который может принимать значения от 0 до 1. Рассмотрены два варианта зависимости параметра поврежденности от деформаций: линейная зависимость и кусочно-линейная аппроксимация экспоненциальной зависимости (соответственно 4 и 5 на рисунке 5).

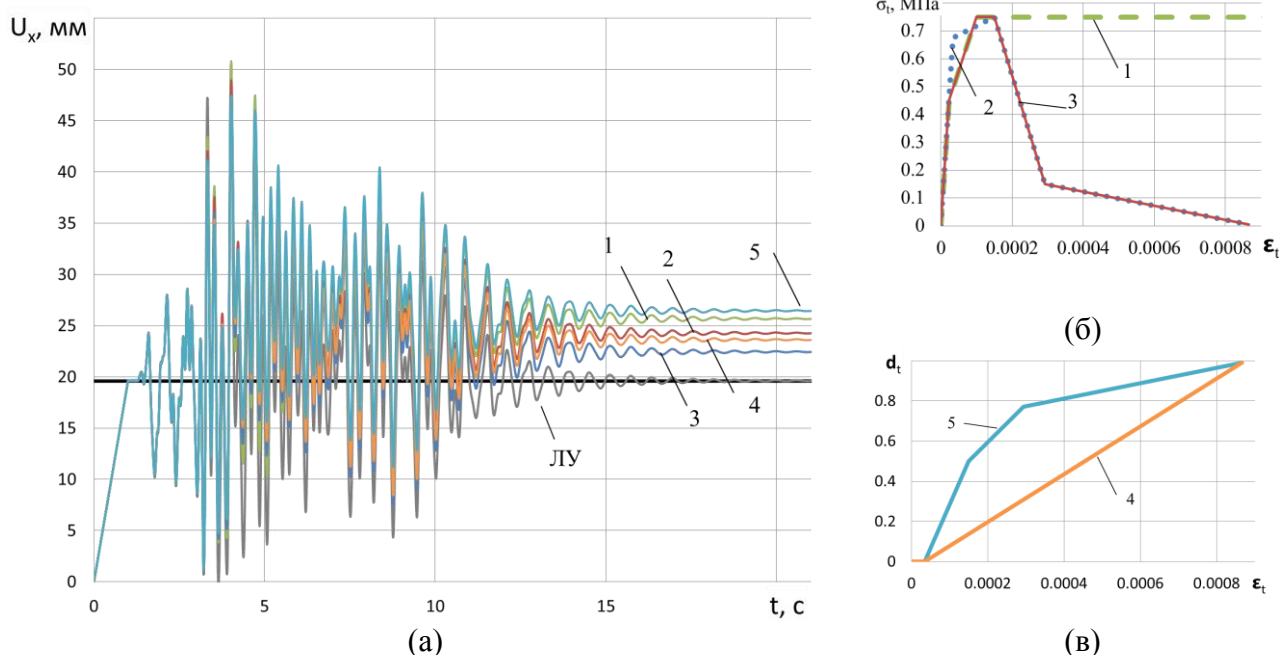


Рисунок 5 – Хронограммы горизонтальных смещений точки на гребне плотины (а) полученные по результатам моделирования с использованием различных аппроксимаций зависимостей напряжений σ_t (б) и поврежденности d_t (в) от деформаций ϵ_t при растяжении

Использование параметра поврежденности для учета деградации свойств бетона позволяет помимо дополнительного уточнения результатов получить наглядное представление о возможном распространении трещин в конструкции (рисунок 6) при сейсмическом воздействии.

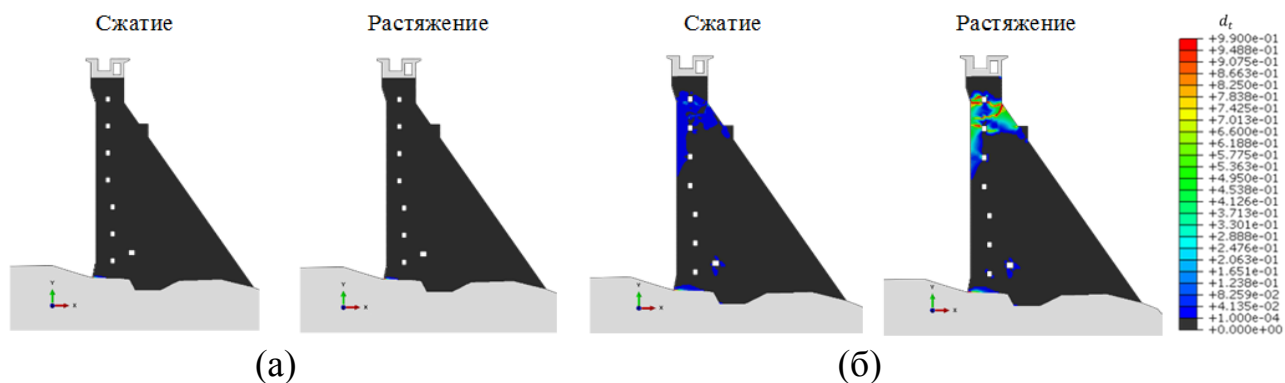


Рисунок 6 – Поля поврежденности бетона модели глухой секции плотины до начала действия сейсмической нагрузки (а) и через 20 секунд (б)

Анализ результатов численного моделирования показал, что учет нелинейных свойств бетона приводит к существенному изменению НДС расчетной модели плотины. Результаты таких расчетов позволяют более точно спрогнозировать поведение бетона, перераспределение напряжений в элементах конструкции и развитие в них зон трещинообразования, как при статических, так и при динамических нагрузках. Для наиболее точной оценки последствий воздействия землетрясения на сооружение и обеспечения его надежности следует применять модели материалов, наиболее полно описывающие особенности поведения бетона на всех этапах деформирования, включая трещинообразование.

В четвёртой главе приведены результаты практического применения методики численного моделирования НДС системы «сооружение-основание-водохранилище» при действии динамических нагрузок для оценки прочности и устойчивости на сдвиг бетонной плотины. В качестве объекта исследования выбрана гравитационная плотина Бурейской ГЭС. При участии автора была уточнена разработанная во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева конечно-элементная модель системы «сооружение-основание-водохранилище» Бурейской ГЭС (рисунок 7) При разработке модели и проведении расчетных исследований учитывались описанные выше результаты тестовых расчетов и разработанная на их основе методика.

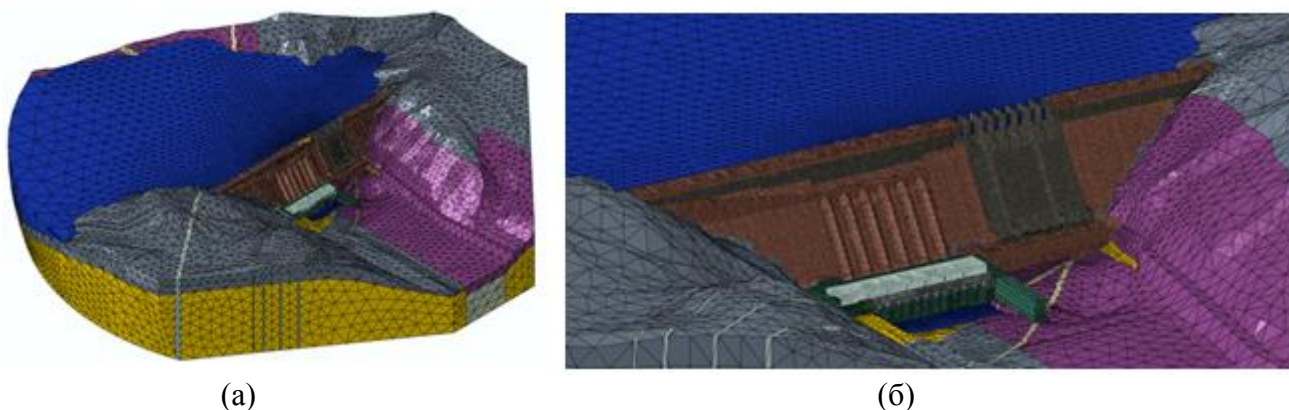


Рисунок 7 –Трехмерная конечно-элементная модель системы «сооружение-основание-водохранилище» Бурейской ГЭС (а) и укрупненный фрагмент модели (б)

В ходе тестирования уточненной модели плотины Бурейской ГЭС были определены собственные частоты и формы колебаний. Значения первых двух собственных частот достаточно близки к результатам сейсмометрических наблюдений: 2,1-2,3 Гц и 2,7-2,9 Гц соответствуют расчетным значениям 2,27 и 2,78 Гц (рисунок 8).

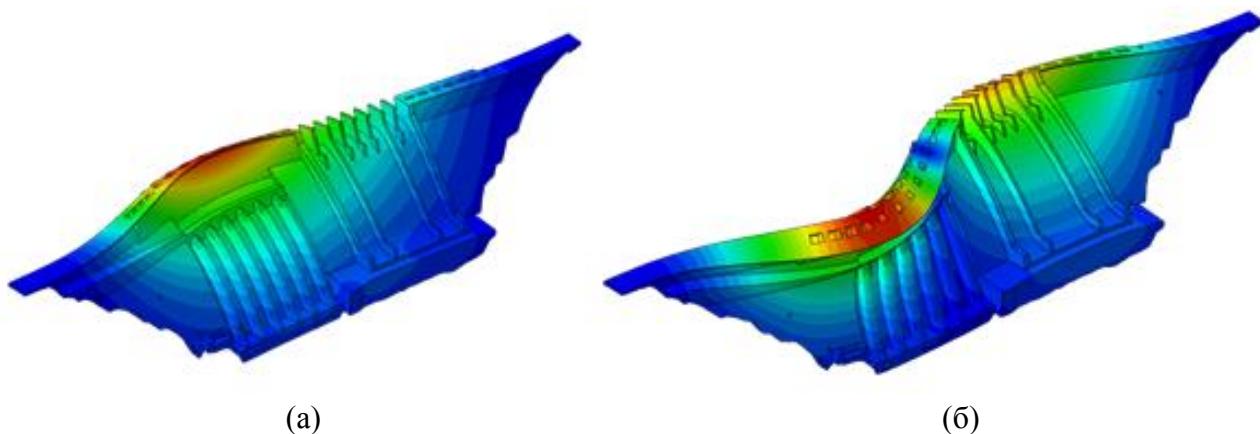


Рисунок 8 – Первая (а) и вторая (б) формы собственных колебаний уточненной модели плотины Бурейской ГЭС, соответствующие значениям частот 2,27 и 2,78 Гц

При использовании линейно упругой постановки задача моделирования может быть разделена на две независимые подзадачи: определение НДС плотины при действии нагрузок основного сочетания и рассмотрение изменения во времени параметров НДС плотины при действии сейсмических нагрузок. Существенный вклад в формирование величин эксплуатационных нагрузок основного сочетания вносят температурные воздействия, связанные с сезонными колебаниями температур. Распределение температур в исследуемых секциях плотины было определено по плоским схемам, после чего полученные поля температур переносились в пространственную модель для определения соответствующих им напряжений и деформаций с учетом других эксплуатационных статических нагрузок.

Для формирования расчетных особых сочетаний нагрузок и воздействий использовались результаты расчета на наиболее интенсивное сейсмическое воздействие, соответствующее Среднебурейской зоне возможных очагов землетрясений. По результатам расчетов для основного сочетания нагрузок и сформированных сейсмических нагрузочных состояний были построены НДС плотины для особых сочетаний нагрузок, включающих сейсмические воздействия. При определении суммарных напряжений, использовались значения максимальных по абсолютной величине расчетных сейсмических напряжений, отвечающие пиковым значениям хронограммы напряжений (рисунок 9) и экстремальных значений (максимальных и минимальных, с учетом их знака) статических напряжений.

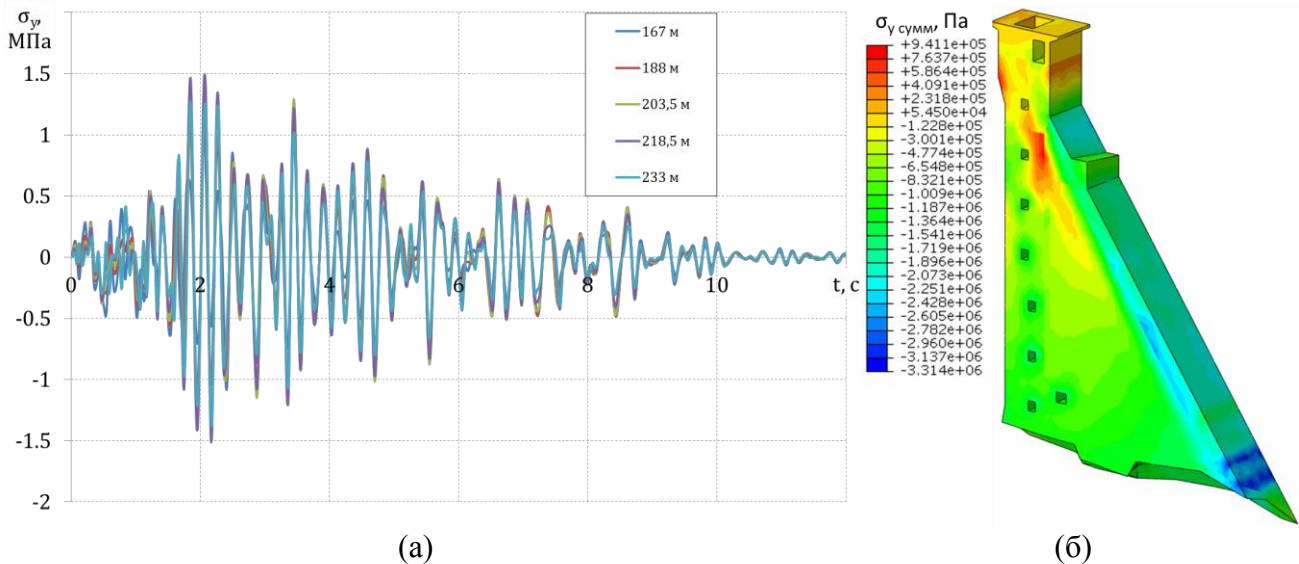


Рисунок 9. Хронограммы вертикальных напряжений σ_y , МПа на разных отметках в контрольных точках по результатам расчета на сейсмическое воздействие (а) и поля распределения суммарных вертикальных напряжений $\sigma_{y \text{ сумм}}$, Па модели 16 секции при действии нагрузок особого сочетания

Оценка прочности бетонной гравитационной плотины Бурейской ГЭС осуществлялась в соответствии с нормативными документами. Анализ результатов моделирования показал, что условия прочности при сжатии выполняются, как для основных, так и для особых сочетаний нагрузок и воздействий. Условия прочности при растяжении не выполняются для ряда особых сочетаний в нескольких контрольных точках. Появление локальных зон трещинообразования можно считать допустимым, поскольку при сейсмическом воздействии уровня МРЗ (максимальное расчетное землетрясение) допускаются повреждения сооружения, не приводящие к его разрушению, или прорыву напорного фронта.

Проведена оценка устойчивости на плоский сдвиг по контакту с основанием. Полученные значения коэффициента надежности по устойчивости оказались больше установленного нормами значения на протяжении всего времени воздействия рассмотренных сейсмических нагрузок. Это позволило сделать вывод об устойчивости плотины на сдвиг при совместном действии статических и сейсмических нагрузок.

Для уточнения положения областей возможного распространения трещин при сейсмическом воздействии уровня МРЗ использована упругопластическая модель повреждаемости бетона, рассмотренная в главе 3. При моделировании нелинейного поведения плотины Бурейской ГЭС в трехмерной постановке использовались две модификации пространственной модели системы «сооружение-основание-водохранилище». Модель 1 включает одну (16-ю) секцию плотины, модель 2 – всю плотину. Таким образом, были рассмотрены два крайних случая сопряжения секций: свободная граница и идеальный контакт.

Результаты выполненных расчетов показали, что при совместном действии статических и сейсмических нагрузок возможно возникновение зон трещинообразования, охватывающих преимущественно верхнюю часть сечения плотины (рисунок 10). При использовании модели 1 основная область разрушения развивается от угла со стороны низовой грани до верховой грани, что, в целом совпадает с картинками, полученными по двумерной расчетной модели (ри-

сунок б). В модели 2, где учтена вся плотина, соседние секции обеспечивают дополнительную пространственную жесткость, в результате чего область разрушения существенно меньше, но остается значительной и может представлять опасность для конструкции.

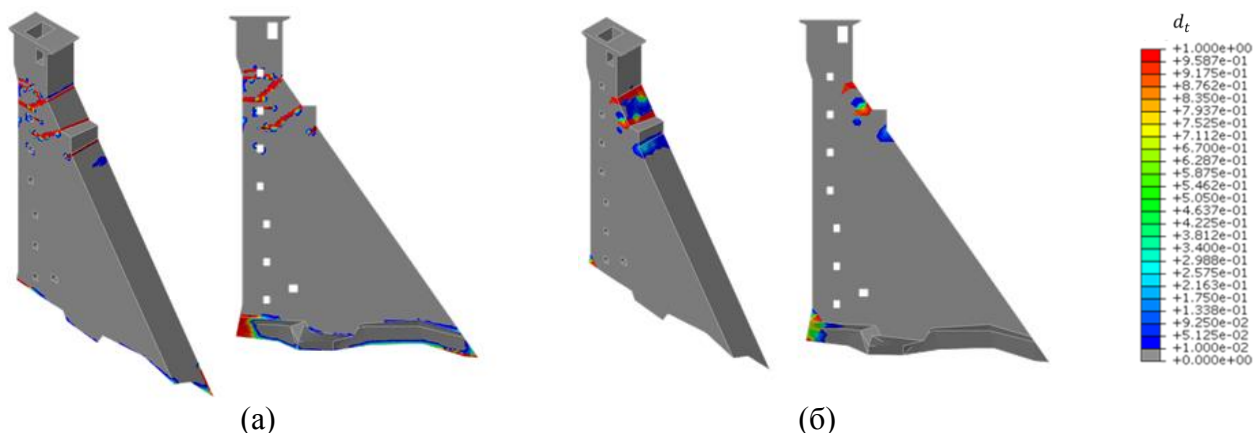


Рисунок 10 – Поля поврежденности 16-й секции плотины Бурейской ГЭС по окончании действия сейсмической нагрузки, полученные на основе трехмерных математических моделей, включающих одну секцию (а) и всю плотину (б)

С использованием отдельных элементов разработанной методики были выполнены расчетные исследования НДС стационарной секции бетонной плотины Бурейской ГЭС, вызванного действием эксплуатационных динамических нагрузок. При этом учитывались как инерционные, так и упругие (сжимаемость) характеристики воды, находящейся внутри напорного водовода, спиральной камеры и отводящей трубы.

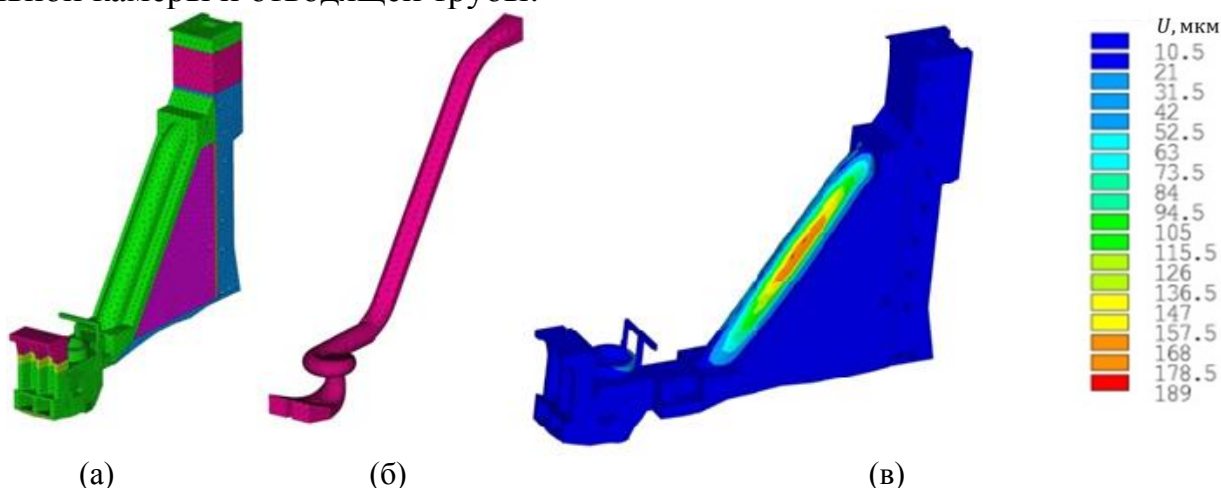


Рисунок 11 – конечно-элементная модель секции плотины и агрегатного блока (а); конечные элементы, моделирующие жидкость в водоводе, спиральной камере, отсасывающей трубе (б); поле амплитуды перемещений U , мм вызванных действием нагрузок от работы агрегата (в)

На основе разработанной модели стационарной секции плотины Бурейской ГЭС проведена оценка влияния разброса механических свойств системы «плотина–основание» на результаты численного моделирования. При определенных комбинациях значений параметров модели выявлен резонанс системы, проявляющийся в виде локального максимума амплитуд перемещений, который сглаживается усилением демпфирующих свойств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика математического моделирования динамического напряженно-деформированного состояния бетонных гидротехнических сооружений при сейсмических воздействиях, которая позволяет учесть особенности совместной работы системы «сооружение-основание-водохранилище», а также влияние на НДС сооружения нелинейного деформирования бетона, связанного с трещинообразованием. Методика применена для определения параметров НДС двумерных и пространственных конечно-элементных моделей системы «сооружение-основание-водохранилище» при динамических воздействиях.
2. Для апробации предложенной методики разработана пространственная конечно-элементная модель системы «сооружение-основание-водохранилище» плотины Бурейской ГЭС и проведены расчетные исследования по определению параметров ее НДС при действии нагрузок особых сочетаний, включающих сейсмические воздействия.
3. На основе анализа результатов моделирования НДС плотины Бурейской ГЭС проведена оценка ее прочности при действии нагрузок основных и особых сочетаний. Определены области возможного трещинообразования при действии нагрузок особого сочетания, включающего сейсмические воздействия уровня МРЗ.
4. На примере глухой секции гравитационной плотины продемонстрирована возможность применения разработанной методики при моделировании динамического поведения массивных бетонных ГТС с использованием как двумерных, так и трехмерных расчетных схем. Это позволяет выполнять расчетные исследования в соответствии с требованиями ряда нормативных документов РФ о необходимости учета нелинейного деформирования бетона, связанного с трещинообразованием.
5. Показано, что при моделировании системы «сооружение-основание-водохранилище» Бурейской ГЭС учет сжимаемости воды в водохранилище приводит к увеличению расчетных значений параметров НДС бетонной плотины по сравнению с нормативным подходом, основанным на учете присоединенных масс.
6. Показано, что учет демпфирующих свойств наносов на дне водохранилища позволяет снизить максимальные расчетные значения напряжений и деформаций.
7. Показано влияние учета сжимаемости воды в водопроводящем тракте на расчетные значения параметров НДС стационарной секции плотины Бурейской ГЭС при проведении расчетных исследований на действие эксплуатационных динамических нагрузок.
8. Рассмотрен подход к построению аппроксимации полной диаграммы зависимости напряжений от деформаций бетона при растяжении на основе учета параметров бетона, содержащихся в нормативных документах, при известном значении удельной энергии разрушения.
9. На ряде примеров продемонстрировано влияние учета нелинейного деформирования бетона и полной диаграммы зависимости напряжений от

деформаций, описывающей эффекты трещинообразования, на результаты моделирования НДС бетонных и железобетонных конструкций.

10. Показано существенное влияние величины удельной энергии разрушения и угла дилатации на результаты численного моделирования бетонных и железобетонных конструкций при нагрузках, приводящих к трещинообразованию. Это свидетельствует о необходимости совершенствования имеющейся нормативной базы и проведения дополнительных расчетно-экспериментальных исследований по определению указанных параметров бетона для получения более точного прогноза последствий аварийных и сейсмических воздействий на бетонные и железобетонные ГТС.

К направлениям дальнейших исследований можно отнести:

- распространение разработанной методики на другие типы сооружений и виды нагрузок;
- применение разработанной методики для расчетных исследований влияния трещинообразования на НДС отдельных элементов конструкций гидротехнических сооружений, например, водоводов;
- совершенствование экспериментальных методов определения полной диаграммы деформирования бетона при растяжении и удельной энергии разрушения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Бенин, А.В. Конечно-элементное моделирование процессов неупругого деформирования и разрушения элементов железобетонных конструкций / А.В. Бенин, А.С. Семёнов А.С, С.Г. Семёнов, И.В. Фёдоров // Морские интеллектуальные технологии. – 2011. – №. S3. – С. 102-105.
2. Дерюгин, Г.К. Исследование колебаний основных бетонных сооружений ГЭС, вызванных воздействием гидродинамических нагрузок на водосливную часть плотины и русло / Г.К. Дерюгин, С.А. Ле-Захаров, И.В. Федоров, Б.В. Цейтлин, Д.В. Щерба // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2014. № 4. С. 50–54
3. Цейтлин, Б.В. Теоретические исследования колебаний бетонных гидротехнических сооружений при действии сейсмических нагрузок / Б.В. Цейтлин, Е.Ю. Витохин, С.А. Ле-Захаров, И.В. Федоров // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2014. – Том 271. – С. 120-137.
4. Федоров, И.В. Учет неупругих деформаций бетона при расчете плотин сейсмические воздействия / И.В. Федоров, Б.В. Цейтлин // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2014. № 4. С. 27–28.
5. Витохин, Е.Ю. Расчетная оценка напряженно-деформированного состояния системы плотина-основание при взаимных смещениях берегов сейсмогенерирующих разломов / Е.Ю. Витохин, С.А. Ле-Захаров, И.В. Федоров, Б.В. Цейтлин // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2016. – Том 279. С. 53–64.
6. Vitokhin, E.Ju. Mathematical modeling of the stress-strain state of concrete dam and rock foundation caused by tectonic fault slip / E.Ju. Vitokhin, S.A. Le-Zakharov, I.V. Fedorov, B.V. Tseytlin //Materials Physics and Mechanics. – 2016. – Vol. 26. – №. 1. – С. 53-56.
7. Федоров И.В. Учет нелинейного поведения бетона в отечественной и зарубежной нормативных базах // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2019. – Том 292. С. 39–47.
8. Федоров, И.В. Исследование динамического поведения железобетонных конструкций при аварийных воздействиях с использованием упругопластической модели // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2020. – № 1 (44). С. 26–29.
9. Федоров, И.В. Моделирование гравитационной плотины при действии сейсмической нагрузки с использованием упругопластической модели повреждаемости бетона // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2020. – Том 295. С. 21–30.

10. Федоров, И.В. Применение упругопластической модели бетона в расчетах железобетонных конструкций на примере задачи об изгибе балки / И.В. Федоров, С.А. Костыря, Ю.П. Федоренко // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2020. № 297. С. 74–82.

Другие публикации и материалы конференций:

11. Федоров, И.В. Конечно-элементное моделирование процессов деформирования и разрушения при вытягивании арматурного стержня из бетонного блока/ И.В. Федоров, С.Г. Семенов, А.С. Семенов, А.В. Бенин // XXXIX Неделя науки СПбГПУ, материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2010. С. 81-82.
12. Федоров, И.В. Сравнительный анализ результатов конечно-элементного моделирования вытягивания арматуры из бетона с использованием различных моделей процесса разрушения связей сцепления блока/ И.В. Федоров, С.Г. Семенов, А.С. Семенов, А.В. Бенин // XXXIX Неделя науки СПбГПУ, материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург, 2010. С. 366-367.
13. Федоров, И.В. Исследование колебаний системы «плотина - агрегатный блок - водохранилище – основание» под действием эксплуатационных нагрузок / И.В. Федоров, Б.В. Цейтлин, С.А. Ле-Захаров, Е.Ю. Витохин // XVIII зимняя школы по механике сплошных сред: Тезисы докладов. – Пермь, 18-22 февраля 2013. С. 360.
14. Федоров, И.В. Исследование колебаний плотины Бурейской ГЭС под действием сейсмических и гидродинамических нагрузок при сбросе воды / И.В. Федоров, Б.В. Цейтлин, С.А. Ле-Захаров, Е.Ю. Витохин // XVIII зимняя школа по механике сплошных сред: Тезисы докладов. – Пермь, 18-22 февраля 2013. С. 222.
15. Ле-Захаров, С.А. Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния бетонной плотины Бурейской ГЭС, вызванного действием сейсмических нагрузок / С.А. Ле-Захаров, Б.В. Цейтлин, И.В. Федоров // Седьмая научно-техническая конференция «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии»: Доклады и выступления. – Санкт-Петербург, 2013.
16. Витохин, Е.Ю. Исследования сейсмостойкости гравитационной бетонной плотины Бурейской ГЭС / Е.Ю. Витохин, С.А. Ле-Захаров, И.В. Федоров, Б.В. Цейтлин // XXV Международная конференция «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов» (ВЕМ&FEM 2013): Тезисы докладов. – Санкт-Петербург, 23-26 сентября 2013. С. 59.
17. Цейтлин, Б.В. Методика учета влияния тектонических разломов на напряженно-деформированное состояние плотин и оснований высоконапорных ГЭС / Б.В. Цейтлин, С.А. Ле-Захаров, Е.Ю. Витохин, А.Д. Евстифеев, И.В. Федоров, А.М. Юделевич // Восьмая научно-практической конференции «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии»: Те-

- зисы докладов. – Санкт-Петербург, 23-25 октября 2014 г., часть 2, С. 132–133.
18. Витохин, Е.Ю. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния в системе бетонная плотина - скальное основание при взаимных смещениях берегов сейсмогенных разрывов / Е.Ю. Витохин, С.А. Ле-Захаров, Б.В. Цейтлин, И.В. Федоров // XXVI Международная конференция «Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций. (МСМ 2015)»: Тезисы докладов. – Санкт-Петербург, 2015. С. 351–352.
 19. Витохин, Е.Ю. Методика учета влияния тектонических разломов на напряженно-деформированное состояние плотин и оснований высоконапорных ГЭС / Е.Ю. Витохин, А.Д. Евстифеев, С.А. Ле-Захаров, И.В. Федоров, Б.В. Цейтлин, А.М. Юделевич // Восьмая научно-техническая конференция «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии»: доклады и выступления на секциях конференции (приложение на CD-диске). – Санкт-Петербург, 2015. С. 224–232.
 20. Цейтлин, Б.В. Расчетно-экспериментальные исследования напряженного состояния оболочки водовода Усть-Илимской ГЭС. Часть 2. Расчетные исследования / Б.В. Цейтлин, Е.Ю. Витохин, И.В. Федоров // Девятая научно-техническая конференция «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии»: Тезисы докладов. – Санкт-Петербург, 2015. С. 98.
 21. Цейтлин, Б.В. Расчетно-экспериментальные исследования напряженного состояния оболочки водовода Усть-Илимской ГЭС. Часть 2. Расчетные исследования / Б.В. Цейтлин, Е.Ю. Витохин, И.В. Федоров // Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии Доклады и выступления: электронный ресурс. – Санкт-Петербург, 2016. С. 187–205.
 22. Волынчиков, А.Н. Разработка математической модели гидроузла для обоснования надежной эксплуатации Богучанской ГЭС при пропуске паводка / А.Н. Волынчиков, Б.В. Цейтлин, Е.Ю. Витохин, И.В. Федоров // XI научно-техническая конференция «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии»: Тезисы докладов. – Санкт-Петербург, 2017. С. 60.
 23. Федоров, И.В. Моделирование нелинейного поведения железобетонной оболочки резервуара хранения СПГ // XI научно-техническая конференция «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии»: Тезисы докладов. – Санкт-Петербург, 2017. С. 254.

Типография ООО «ПК Марка»
195220, Санкт-Петербург, Гжатская ул., 21.
Объем 1,0 п.л. Тираж 100.