

## ОТЗЫВ

Официального оппонента кандидата технических наук, доцента, доцента кафедры гидравлики и гидротехнического строительства ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» Бестужева Александры Станиславовны на диссертацию Федорова Ильи Владиславовича по теме «Методика моделирования бетонных гидротехнических сооружений с учетом нелинейного деформирования при сейсмических воздействиях», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.07 Гидротехническое строительство.

На отзыв представлены диссертация и автореферат. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 211 наименований, приложения. Общий объем диссертации составляет 156 страниц машинописного текста, включая 127 рисунков, 28 таблиц и 1 приложение. Автореферат диссертации отражает основные положения диссертационной работы, содержит список работ соискателя, основные результаты и выводы. В списке работ автора 10 наименований в изданиях, рекомендованных ВАК и 13 публикаций в иных изданиях.

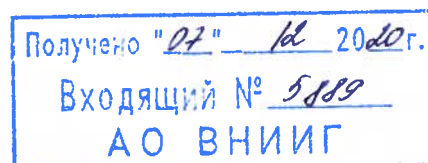
**Актуальность темы исследования.** Численные исследования бетонных гидротехнических сооружений в постановке «сооружение-основание-водохранилище» прочно вошли в методику моделирования в последние 20 лет. Решение динамических задач сейсмостойкости сооружений на заданные акселерограммы является одним из обязательных методов расчетного обоснования для сооружений высокой ответственности, проектируемых в зонах высокой сейсмичности. Прогресс вычислительной техники и распространение универсальных программных комплексов позволяют решать подобные задачи с учетом большого числа факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние сооружений, что требует систематизации знаний по изучению отдельных аспектов работы сооружений.

Одним из вопросов, требующих своего дополнительного исследования, является вопрос моделирования нелинейного поведения бетонного материала за счет появления в нем трещин, что особенно важно для бетонных плотин, у которых напорная грань при землетрясении почти всегда подвержена трещинообразованию в той или иной степени. Другим вопросом, вызывающим дискуссии в научном сообществе, являются вопросы задания граничных условий на контуре расчетной области, в том числе с учетом характера приложения расчетного сейсмического воздействия. Каждое новое исследование этих вопросов пополняет базу научных знаний и является ценным научным результатом.

**Цель и задачи исследования.** Целью исследований поставлена задача усовершенствования методики моделирования напряженно-деформированного состояния бетонных гравитационных плотин при сейсмических воздействиях с учетом нелинейного характера деформирования бетона в зоне трещинообразования при растягивающих напряжениях.

Также поставлены задачи оценки влияния на сейсмостойкость плотин таких расчетных факторов как:

- способ задания сейсмического воздействия;
- свойства затухания колебаний в грунтовых основаниях;



- граничные условия, принятые в расчетной модели;
- учет гидродинамического влияния воды водохранилища.

#### **Научная новизна.**

- проведены численные исследования НДС бетонной гравитационной плотины при сейсмических воздействиях с учетом возможностей программного комплекса ANSYS: по моделированию гидродинамического действия воды при землетрясении, по учету грунтовых условий в основании, по заданию граничных условий на контуре расчетной области, по учету нелинейного поведения бетона в зонах трещинообразования;

- проведены численные исследования НДС железобетонной плиты при импульсном воздействии с целью уточнения параметров модели деформирования бетона в зоне растягивающих напряжений на основе сопоставления результатов численного и физического моделирования;

- проведено численное исследование НДС бетонной гравитационной плотины Бурейской ГЭС при сейсмическом воздействии на фоне эксплуатационных нагрузок, включая температурные воздействия.

#### **Практическая значимость работы**

- проведенные исследования позволяют сформировать круг основных вопросов, стоящих перед исследователями при моделировании сейсмических воздействий на бетонные сооружения, работающие совместно с водной и грунтовой средой, а именно: описание геомеханической модели сооружения, способ задания сейсмического воздействия, описание поведения водной среды, описание поведения бетона при появлении в нем трещин, разработка критериев оценки состояния плотины при землетрясении и после него;

- проведенные исследования дополняют существующие представления о поведении плотины при землетрясении и влиянии отдельных факторов на ее НДС, а именно: - влияние гидродинамического давления на пульсации напряжений в плотине при моделировании водной среды с учетом и без учета сжимаемости жидкости; - влияния граничных условий на сейсмический отклик плотины; - влияния демпфирующих свойств наносных отложений, скапливающихся у подножия плотины; - влияние различных моделей деформирования бетона, описываемых диаграммами зависимости напряжений от деформаций;

- в проведенных исследованиях для оценки состояния плотины после землетрясения используется параметр «поврежденности» бетона для уровня сжимающих и растягивающих напряжений;

- проведенные исследования открывают возможности по использованию модели упругопластического поведения бетона на основе теории разрушения с уточнением ее параметров согласно выбранной диаграмме «напряжений-деформаций».

#### **На защиту выносятся следующие результаты:**

- методика численного моделирования системы «сооружение-основание-водохранилище» с учетом нелинейного деформирования бетона в зоне трещинообразования при сейсмических нагрузках;

- результаты проведенных численных исследований НДС, прочности и устойчивости бетонной гравитационной плотины при сейсмических воздействиях с принятой диаграммой поведения бетона в зоне растяжения;

- оценка влияния изменений параметров упругопластической модели бетона на результаты численного моделирования,

- оценка влияния характера задания сейсмического воздействия, условий закрепления узлов на границе расчетной области, учета гидродинамического воздействия со стороны воды водохранилища на результаты численного моделирования и параметры работоспособности плотины при землетрясении.

### **Основное содержание работы**

Во введении диссертации отражены такие характеристики работы как ее актуальность, научная новизна, задачи исследований, научная и практическая значимость работы, личный вклад соискателя в проведенные исследования.

*В первой главе* дан обзор по основным вопросам численного моделирования поведения бетонных плотин при сейсмических воздействиях: -по постановке расчетных схем плотины и основания, -по заданию граничных условий для обеспечения «прозрачности» границ расчетной области для проникновения сейсмических волн, -по моделированию взаимодействия водной среды с сооружением с учетом сжимаемости и не сжимаемости воды, -по моделированию поведения бетона в зоне растягивающих напряжений.

Приводятся описания некоторых моделей разрушения бетона и, как пример, диаграмма поведения бетона, полученная в ходе испытаний бетонных образцов на разрывной машине. Приводятся описания некоторых методов решения задач о распространении трещины в бетоне, основанные на использовании сингулярных элементов, когезионных элементов, а также специальных элементов, обладающих функциями моделирования асимптотического поведения перемещений в устье трещины (X-FEM). Даны основные сведения о параметрах модели хрупкого разрушения Ирвина-Гриффитса, основанные на величинах интенсивности нормальных и касательных напряжений и их критических величин - в качестве критерия разрушения, а также пластической модели «фиктивной трещина» (CDP) с разупрочнением.

*Во второй главе* приведены результаты расчетов пространственной модели бетонной плотины Бурейской ГЭС со зданием ГЭС и водосливной плотиной в составе напорного фронта. Геомеханическая модель включает область берегов и основания плотины, водохранилище. Численное исследование проведено средствами программных комплексов ANSYS и Abaqus. Сейсмическое воздействие в виде трехкомпонентных акселерограмм с максимальным ускорением  $1 \text{ м/с}^2$  по всем компонентам задавалось для одного из двух уровней, либо на уровне свободного основания, либо на уровне нижней границы расчетной области. В последнем случае возникает необходимость подбора свойств вязких демпферов для моделирования беспрепятственного прохождения сейсмических волн сквозь границы расчетной области за счет поглощения колебаний. В тестовых расчетах получено, что в ходе пересчета акселерограммы на нижнюю границу области динамический отклик системы усиливается, что несколько противоречит логике такого пересчета, который как правило выполняют в целях учета демпфирующих свойств «мягких» (трещиноватых) грунтов, находящихся в основании сооружения.

Изменение условий закрепления на боковых границах расчетной области (от свободной границы до заделки) показало, что эти условия крайне незначительно влияют на

напряженное и деформированное состояние плотины, что, по-видимому, можно объяснить значительными размерами геомеханической модели вмещающего основания, существенно превышающими рекомендуемые СП значения (две высоты сооружения по всем направлениям). В то же время можно отметить, что и при свободе горизонтальных смещений узлов на боковой границе, и при заделке пиковые перемещения узлов на гребне плотины все же превышают те, которые имеют место при подобранном демпфировании, что говорит о возможном появлении отраженных волн в этих случаях.

Моделирование гидродинамического действия водной среды на колебания плотины проведено в двух постановках – с учетом сжимаемости воды и без учета, последнее, согласно гипотезе Вестергарда, реализуется за счет задания дополнительных сосредоточенных масс по направлениям гидродинамического воздействия. Для учета сжимаемости воды при моделировании в ANSYS предусмотрены акустические элементы (Эйлера), характеризуемые полем давления (FLUID30), также моделирование гидродинамического давления воды с учетом ее сжимаемости возможно твердотельными элементами (Лагранжа).

Исследования показали, что учет сжимаемости жидкости при моделировании элементами FLUID30 иногда более чем вдвое увеличивает пиковые значения перемещений на гребне плотины по сравнению с учетом присоединенных масс, изменяется также частотный характер колебаний, а при моделировании твердотельными элементами амплитудные значения изменяются незначительно.

Включение в расчетную область слоя наносов на дне водохранилища совместно с применением акустических элементов для моделирования колебаний водной среды показало, что наибольшее демпфирующее влияние слой наносов в 13м оказывает на вертикальные колебания плотины, снижая их в 1,5-2 раза.

Моделирование поведения межблочных швов в плотине при сейсмическом воздействии проведено с целью получения размеров области раскрытия швов и длительности вертикального раскрытия швов. Такое моделирование возможно при задании в указанных сечениях специальных контактных элементов.

*В третьей главе* приведены сведения о построении диаграмм деформирования бетона на участке сжатия и растяжения. Перелом в диаграмме растяжения устанавливается на уровне 90% прочности на растяжение, деформации, соответствующие пределу прочности на растяжение, принимаются равными 0,00015. Напряжения и деформации бетона в зоне разрушения, на ниспадающей ветви диаграммы связываются с фиктивным раскрытием трещины. Моделью деформирования и разрушения бетона в программном комплексе ANSYS принята пластическая модель CDP. Модель CDP требует задания ряда дополнительных параметров, одним из них является угол дилатации бетона, значения которого не определены. Для численного поиска возможных значений угла дилатации поставлен эксперимент с численным сравнением расчетных результатов с данными испытания железобетонной балки на двух опорах на изгиб с приложенной нагрузкой. Геометрическая модель балки с элементами армирования была рассчитана с разными значениями угла дилатации и различающимися диаграммами работы бетона в зоне растяжения. В ходе сопоставления результатов численного и физического моделирования получены наиболее адекватные значения углов дилатации, подобраны значения для кусочно-линейной аппроксимации диаграммы деформирования бетона при растяжении.

В п.3.4.1 (стр.82-94) проведены исследования НДС преднапряженной железобетонной плиты на опорах от взрывной волны, заданной в форме импульса в программном комплексе Abaqus. В рамках квазистатического подхода и динамического метода проведено сопоставление результатов. В задаче не указаны размеры плиты, но результаты расчетов представляются фантастическими – до 57МПа растяжения и 83 МПа сжатия!

В п.3.4.2 (стр.94-102) приведено решение о НДС плотины при землетрясении в виде полей остаточных перемещений по окончанию землетрясения. Используются разные диаграммы поведения бетона при появлении трещин, при этом наибольшие горизонтальные смещения гребня различаются очень незначительно 2.2см, 2.4см, 2.6см. Для оценки прочностного состояния бетона приводится параметр «поврежденности» бетона и получено значение этого параметра на уровне оголовка плотины 0,99. Не понятно, каков критерий работоспособности бетона в этом случае.

*В четвертой главе* проведен расчет плотины Бурейской ГЭС на сейсмическое воздействие по трехкомпонентной акселерограмме с учетом эксплуатационных нагрузок в виде поля температурных напряжений, полученных по результатам натурных измерений температур. Расчеты проведены для двух моделей плотины, одной - в виде отдельно стоящей секции плотины, второй – полной модели плотины, что дает возможность моделировать состояние плотины с учетом межсекционных швов. Результаты расчетов с учетом упругопластической модели поведения бетона представлены распределением параметров поврежденности бетона после землетрясения. Для обеих схем присутствует зона разрушения в основании со стороны напорной грани, а также в основании оголовка плотины.

**Достоверность полученных результатов** подтверждена сериями тестовых, модельных и расчетных сопоставлений и обосновывается расчетами в широко известных универсальных программных комплексах ANSYS и Abaqus.

#### **Замечания**

1. К сожалению, в работе не представлены ни суммарные хронограммы, ни эпюры полного напряженного состояния плотины в моменты времени наибольших динамических пульсаций напряжений, по которым можно было бы судить о наличии/отсутствии растягивающих напряжений (суммарных со статическими) в плотине в тот или иной момент времени в той или иной зоне плотины.

2. Не понятно, почему в один и тот же момент времени растягивающие напряжения на напорной грани плотины при учете раскрытия межблочных швов (12,4МПа) выше, чем без учета раскрытия (4,6МПа) (рис.2.28 и 2.29) и чем объясняется такая большая величина растягивающих напряжений?

3. При оценке состояния плотины при сейсмических нагрузках в диссертации используется параметр «поврежденности» бетона, который изменяется от 0 до 1, что в последнем случае означает полное разрушение материала (стр.66). Для модели 1, описывающей колебания отдельной секции плотины, получено крайне негативное распределение этого параметра в районе оголовка плотины, и, если этот параметр имеет связь с наличием трещин в бетоне, то должна изменяться схема действующих нагрузок на плотину, и как решен этот вопрос в рамках программного комплекса?

4. По диссертации не понятно, учитывалась ли модель нелинейного деформирования при образовании трещин в скальном основании плотины?

## Заключение

Указанные в отзыве замечания не снижают научной и практической ценности проведенных исследований и полученных результатов. Диссертация является полностью завершенной, самостоятельной, отвечающей требованиям к научно-квалификационным исследованиям работой, выполнена на актуальную тему, содержит научные выводы и рекомендации, отличающиеся новизной и практической значимостью, связанные с учетом важных факторов численного моделирования реальных нагрузок, действующих на плотину при землетрясении. Публикации автора отражают основное содержание диссертационной работы.

Тематика диссертационной работы Федорова Ильи Владиславовича «Методика моделирования бетонных гидротехнических сооружений с учетом нелинейного деформирования при сейсмических воздействиях» соответствует паспорту научной специальности 05.23.07 – гидротехническое строительство по п.2 «Совершенствование методов математического моделирования условий работы бетонных гидротехнических сооружений в различных климатических условиях».

Считаю, что диссертационная работа Федорова Ильи Владиславовича по теме «Методика моделирования бетонных гидротехнических сооружений с учетом нелинейного деформирования при сейсмических воздействиях» отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (Постановление правительства РФ №842 от 24.09.2013) для диссертаций, представленных на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Федоров Илья Владиславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.07 гидротехническое строительство.

### Официальный оппонент, контактные данные:

**ФИО:** Бестужева Александра Станиславовна

**Ученой степень:** кандидат технических наук;

**Ученое звание:** доцент

**Специальность, по которой защищена диссертация:** 05.23.07- гидротехническое строительство.

**Должность:** доцент кафедры Гидравлики и гидротехнического строительства ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

**Почтовый адрес:** Россия, 129337, Москва, Ярославское шоссе, д.26

**Контактный телефон:** +7(499)2874914(1416), +7(916)8613807.

**E-mail:** [BestuzhevaAS@mgsu.ru](mailto:BestuzhevaAS@mgsu.ru)

«01» декабря 2020г.



/ Бестужева А.С./

Подпись Бестужевой А.С. заверяю



Стор. 17 Дир. О.И. Тугрелев