

На правах рукописи

ДМИТРИЕВ ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**УТОЧНЕННЫЙ ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
ТРЕХМЕРНОЙ СИСТЕМЫ «ОСНОВАНИЕ – ВОДОХРАНИЛИЩЕ –  
ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СООРУЖЕНИЕ»  
ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Специальность 05.23.07 – Гидротехническое строительство

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена на кафедре гидротехнических сооружений в ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

Научный руководитель: **Белостоцкий Александр Михайлович**  
доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент РААСН,  
генеральный директор ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО».

Официальные оппоненты: **Козинец Галина Леонидовна**  
доктор технических наук, профессор,  
и.о. директора инженерно-строительного  
института ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский  
политехнический университет Петра Великого»,  
директор высшей школы гидротехнического и  
энергетического строительства инженерно-  
строительного института ФГАОУ ВО «Санкт-  
Петербургский политехнический университет  
Петра Великого»;

**Антонов Антон Сергеевич**  
кандидат технических наук,  
директор аналитического центра безопасности  
оборудования и ГТС Филиала АО «Институт  
Гидропроект» - «НИИЭС».

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Дальневосточный федеральный  
университет» (ФГАОУ ВО ДВФУ).

Защита состоится «25» февраля 2020 г. в 14:00 на заседании  
диссертационного совета Д 220.043.13 на базе ФГБОУ ВО «Российский  
государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» по  
адресу: 127550, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, учебный корпус №28,  
аудитория 201, тел./факс: +7(499)976-21-84.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке  
имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный  
университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета  
<http://www.timacad.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь диссертационного  
совета, кандидат технических наук

М.С. Палиивец

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** На сегодняшний день развитие гидротехнического строительства в сейсмически активных районах, а также повышение требований к уровню безопасности энергетических объектов требует разработки методов расчета, обеспечивающих прочность, надежность и экономичность конструкций гидротехнических сооружений с учетом сейсмического фактора.

Все больше потребности возникает в расчетах гидротехнических сооружений с использованием динамической теории, где сейсмическое ускорение основания задается расчетными акселерограммами. В том числе, появляются нормативные документы, регламентирующие проведение расчетов на сейсмические воздействия по динамической теории на сооружениях I-II класса капитальности.

Особенности расчета гидротехнических сооружений на сейсмостойкость (по сравнению с промышленными и гражданскими сооружениями) связаны с необходимостью учета влияния водной среды, наличие которой приводит к дополнительному (по отношению к гидростатическому) гидродинамическому давлению воды на напорной грани, изменению частот и форм собственных колебаний конструкции, дополнительному демпфированию, что в конечном итоге может существенно сказаться на напряженно-деформированном состоянии (НДС) гидротехнического сооружения. Необходимость учета этого фактора заставляет совершенствовать методы решения задач контактного взаимодействия сооружение-жидкость.

За последнее 80 лет, с момента появления первых работ, посвященных исследованию взаимодействия сооружения и жидкости, разработано большое число инженерных аналитических методов решения проблем данного типа, однако они применимы к узкому числу задач, накладывают ряд существенных ограничений, не позволяют учесть некоторые значимые факторы и требуют больших трудозатрат. Однако современное состояние гидроэнергетической отрасли требует решения гораздо более сложных динамических задач с учетом целого ряда факторов, которые не позволяют учесть упрощенные инженерные методы. Поэтому, одним из основных и, по сути, безальтернативных сегодня подходов для решения этих сложных задач является разработка численной методики расчета системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение». Очевидно, что разработка такой методики представляет собой актуальную и сложную научно-практическую задачу, сопряженную с использованием, развитием и верификацией современных математических моделей и численных методов, а также их реализацией в доступном программном комплексе. Верифицированная и апробированная методика численного моделирования и параметризованные расчетные модели, реализованные по вышеуказанной методике, могли бы лечь в основу систем нормативно регламентированного мониторинга состояния уникальных гидротехнических сооружений.

При этом связанные трехмерные динамические задачи по сей день весьма далеки от своего исчерпывающего решения и требуют научно-методических и программно-алгоритмических разработок и исследований.

**Степень разработанности темы.** Актуальность проблемы адекватного определения динамического НДС комбинированной пространственной системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» при комплексе основных и особых (включая сейсмические) нагрузок и воздействий отмечалась многими исследователями начиная с 30-х годов прошлого столетия. Традиционными подходами, до сих пор широко используемыми в практике проектирования гидротехнических сооружений, являются соответствующие инженерные методы, основывающиеся на классическом аналитическом решении Вестергарда о гидродинамическом давлении жидкости на вертикальную напорную грань сооружения. Следует отметить, что для водоподпорных сооружений с криволинейной напорной гранью (в частности, арочных плотин) распределение гидродинамического давления жидкости по высоте сооружения отлично от полученного из решения Вестергарда. В этой связи настоящее диссертационное исследование необходимо рассматривать с позиций развития современных методов определения динамического НДС связанных гидроупругих систем при динамическом воздействии с надлежущей верификацией и апробацией.

**Цели и задачи исследований.** С учетом выше изложенного целью работы является разработка методики уточненного численного моделирования динамического НДС трехмерной системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» при сейсмических воздействиях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить комплексный обзорно-аналитический обзор методик, численных методов и программных комплексов для расчета гидротехнических сооружений на динамические воздействия.

2. Описать методику уточненного динамического анализа НДС пространственных систем «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» при сейсмических воздействиях.

3. Реализовать предложенную методику в доступном программном комплексе численного моделирования задач механики сплошной среды.

4. Верифицировать реализованную методику и «настроить» ее параметры на ряде тестовых задач, имеющих аналитическое, экспериментальное или альтернативное численное решение.

5. Апробировать и подтвердить работоспособность уточненной численной методики на реальном гидротехническом объекте, с предоставлением результатов и рекомендаций по расчету подобных объектов.

**Научная новизна** полученных в диссертационной работе результатов заключается в следующем:

1. Разработана уточненная методика численного моделирования динамического НДС трехмерной системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» при сейсмических воздействиях, с

применением современного промышленного расчетного комплекса ANSYS, не прибегая к вынужденным и/или необоснованным упрощениям.

2. Обеспечена комплексность подхода при реализации расчетов гидротехнических сооружений с учетом массива основания и водной среды на сейсмические воздействия.

3. Результаты серии сравнительных верификационных расчетов показали эффективность предложенной методики численного моделирования трехмерного динамического НДС системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» с использованием акустических и гидродинамических элементов жидкости и обосновали диапазоны применимости этих элементов.

4. По реализованной методике выполнены расчетные исследования и проанализировано динамическое объемное НДС связанной системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» на примере шлюза-регулятора №1, входящего в состав каскада Кубанских ГЭС.

**Теоретическая и практическая значимость работы** заключается в разработке, исследовании, верификации и апробации методики уточненного численного моделирования трехмерного динамического НДС систем «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» при сейсмическом воздействии.

Разработанная, верифицированная и апробированная методика уточненного численного моделирования динамического НДС трехмерной системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» при сейсмических воздействиях обеспечивает новый, востребованный современной практикой уровень расчетного анализа связанных динамических систем в гидроэнергетической отрасли.

Создано авторское программно-алгоритмическое обеспечение, которое может стать важной составной частью при использовании комплексов программ промышленного типа для конечноэлементного анализа состояния сложных систем.

Результаты, полученные по уточненной численной методике, позволят оптимизировать работы по обеспечению сейсмостойкости гидросооружений и силового оборудования, тем самым повысив общий уровень безопасности энергетических объектов.

В целом, практическая значимость результатов работы определяется, прежде всего, ориентированностью последних на использование в практике профильных проектных и научно-исследовательских организаций, занимающихся моделированием значимых стадий жизненного цикла сооружения (проектирование, строительство, эксплуатация на различных режимах и др.).

Представленные результаты диссертации использованы в научно-исследовательских работах ЗАО «Научно-исследовательский центр СтаДиО», Научно-образовательном центре компьютерного моделирования уникальных зданий, сооружений и комплексов (НОЦ КМ) МГСУ и ОАО «Мособлгидропроект».

Уточненная методика численного моделирования динамического НДС трехмерных связанных систем при сейсмических воздействиях, разрабатывалась по заказу Московского областного института «Гидропроект» для дальнейшего применения при комплексной реконструкции и модернизации каскада Кубанских ГЭС.

**Методология и методы исследования.** При подготовке диссертации были использованы современные достижения прикладной математики и строительной механики в области численных методов определения НДС пространственных комбинированных систем при динамических нагрузках и воздействиях. Реализация авторской методики и алгоритмов проводилась на языке программирования APDL. Для выполнения расчетных исследований и апробации численной методики использовался «тяжелый» программный комплекс ANSYS Mechanical, реализующий метод конечных элементов и численные методы решения динамических задач.

В качестве объекта исследования рассматривались пространственные системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» в условиях действия сейсмических нагрузок.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанная уточненная методика численного моделирования динамического НДС трехмерной системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» при сейсмических воздействиях.

2. Результаты основных верификационных задач, на которых проверялась предложенная методика.

3. Результаты динамического расчета реального гидротехнического сооружения на сейсмические воздействия, заданные акселерограммами, с дальнейшим анализом полученных результатов.

4. Рекомендации для расчетов сейсмостойкости гидросооружений, полученные после анализа результатов апробации предложенной методики.

**Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность и обоснованность научных положений основана на:

1. Строгости используемого математического аппарата; корректности постановок задач в рамках теоретических предпосылок строительной механики, механики деформируемого твердого тела и механики жидкости.

2. Согласованности полученных результатов численного моделирования верификационных примеров с экспериментальными данными, аналитическими и численно-аналитическими решениями.

Результаты расчетных исследований докладывались и обсуждались на ряде вузовских, всероссийских и международных конференциях:

– V Международный симпозиум РААСН «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», г. Иркутск, 1-6 июля 2014 г.;

– Международная научная конференция молодых учёных и специалистов, посвящённая 150-летию РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, 2-3 июня 2015 г.;

– VI Международный симпозиум РААСН «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений», г. Владивосток, 15-20 августа 2016 г.;

– Научно-техническая конференция «Наука и проектирование», г. Углич, 25-27 мая 2017 г.

Апробация методики проводилась при расчете реального гидротехнического объекта – Шлюза-регулятора №1, входящего в состав Каскада Кубанских ГЭС. Результаты проведенного комплекса расчетов легли в основу серии подобных расчетных исследований на других гидроузлах.

Основные результаты научно-исследовательской работы, изложенные в диссертации, получены лично автором. Совместно с научным руководителем были определены цели, задачи, основные направления исследования и разработаны его этапы и направления. Соискатель самостоятельно выполнил основную часть расчетных исследований, включая построение расчетных моделей их верификацию и оптимизацию. Для решения поставленных задач были разработаны собственные подпрограммы, которые представлены в данной работе.

**Публикации результатов диссертации.** По материалам диссертационных исследований опубликовано 7 статей в научных журналах перечня ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (130 наименований, в том числе – 49 на иностранных языках). Основное содержание диссертационной работы изложено на 158 страницах, включает 58 рисунков и 27 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** представлено обоснование актуальности темы диссертационной работы, описана степень её разработанности, изложены цели и задачи, решаемые в работе, указаны объект и предмет исследования, методология и методы исследования, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены сведения о внедрении результатов исследования, личном вкладе соискателя, апробации работы, публикациях автора, структуре и объеме диссертации, перечислены результаты, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен аналитический обзор научных работ, посвященных учету влияния водной среды при расчетах гидротехнических сооружений. Освящен историко-научный процесс последовательного уточнения и усложнения расчетных аналитических методов в области расчетного обоснования связанных систем, контактирующих с жидкостью. Также проведено обзорно-аналитическое исследование постановок, численных методов и современных программных комплексов для расчетов гидротехнических сооружений при сейсмических воздействиях.

На сегодняшний день сложились три основных направления численного решения задач гидроупругости:

1. Постановка *Эйлера*, описывающая состояние жидкости в теоретически естественных узловых переменных (давление или потенциал скоростей), а сооружения и основания – через узловые перемещения;

2. Постановка *Лагранжа*, с представлением и жидкости, и сооружения (с основанием) уравнениями в перемещениях. Применяется такая постановка в том числе и при рассмотрении движений частиц жидкости на границах, например, при изучении волновых движений свободной поверхности жидкости.

3. Произвольная постановка *Лагранжа-Эйлера* (*постановка ALE*), которая сочетает в себе оба подхода. Данная постановка ориентирована на моделирование сложных течений и задач о взаимодействии жидкости с полностью погруженными телами, где отдельно лагранжевая и эйлеровая постановки не могут быть использованы.

**Во второй главе** представлены основные положения методики уточненного динамического анализа НДС пространственных систем «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» при сейсмических воздействиях. Описаны основные уравнения, описывающие поведения сооружения и жидкости, виды динамического анализа и возможности реализующего методикой программного комплекса.

Основными уравнениями, описывающими работу сооружения, являются Лагранжевы уравнения движения, которые могут быть линейными или нелинейными, в зависимости от свойств применяемых материалов и характера перемещений сооружения:

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \tau + \bar{f}^B, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность;  $\bar{u}$  – вектор перемещений сооружения;  $t$  – время;  $\tau$  – тензор напряжений Коши;  $\bar{f}^B$  – вектор объемных нагрузок; запись типа  $\nabla \cdot$  обозначает действие оператора дивергенции (в деформированном состоянии).

Для конечноэлементной аппроксимации уравнений поведения сооружения используется общее уравнение движения (в форме метода перемещений) линейной системы с малыми перемещениями и деформациями (в матричном виде):

$$M \ddot{u}_t + C \dot{u}_t + K u_t = F_t, \quad (2)$$

где  $M$  – симметричная блочно-редкозаполненная матрица масс,  $C$  – матрица демпфирования,  $K$  – матрица жесткости,  $t$  – время, “точка” означает дифференцирование по времени,  $\{F(t)\}$  – вектор заданных статических и динамических нагрузок,  $u_t$  – искомый вектор обобщенных динамических перемещений.

Для описания описывающих поведение идеальной акустической жидкости, используется уравнения Навье-Стокса (уравнения движения и неразрывности потока), которые преобразуются в волновое уравнение распространения звука:



$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) - \frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left[ \frac{4\mu}{3\rho_0} \nabla \left( \frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t} \right) \right] = - \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Q}{\rho_0} \right) + \nabla \cdot \left[ \frac{4\mu}{3\rho_0} \nabla \left( \frac{Q}{\rho_0} \right) \right]. \quad (3)$$

где  $c = \sqrt{k/\rho_0}$  – скорость распространения звука в акустической жидкости,  $k$  – объемный модуль упругости жидкости,  $\rho_0$  – средняя плотность акустической жидкости,  $\mu$  – динамическая вязкость;  $p$  – акустическое давление;  $Q$  – массовый член;  $\nabla \cdot$  – оператор дивергенции. Из волнового уравнения распространения звука в акустической жидкости с помощью процедур метода Галеркина можно получить конечноэлементную постановку.

В диссертационной работе рассматриваются и реализуются два подхода для моделирования жидкости: постановки Эйлера, описывающая поведение жидкости в терминах давления (акустическая жидкость), и постановка Лагранжа, с представлением жидкости уравнениями в перемещениях. Для реализации этих двух постановок в используемом программном комплексе ANSYS Mechanical представлено два семейства конечных элементов (КЭ):

– *акустические КЭ*, основным из которых является объемный 8ми или 6ти узловой элемент FLUID30;

– *гидродинамические КЭ* с возможностью учета поверхностных гравитационных волн, основным из которых является объемный 8-ми узловой элемент FLUID80.

**Третья глава** посвящена описанию результатов верификации предложенной методики на ряде тестовых задач, имеющих аналитическое, экспериментальное или альтернативное численное решение.

В качестве *первого* верификационного примера выбрана задача о собственных колебаниях свободной поверхности жидкости в прямоугольном сосуде с жесткими стенками, имеющая точное аналитическое решение. В рамках данной верификационной задачи были сопоставлены результаты для двух различным типом конечных элементов FLUID30 и FLUID80.

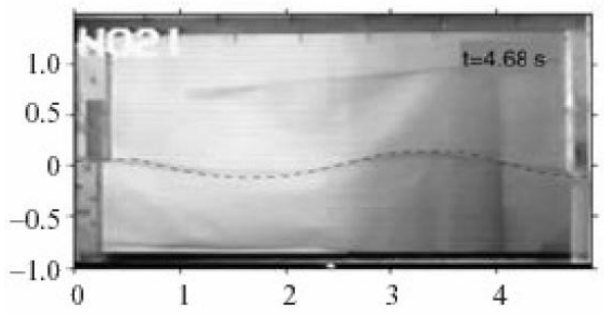
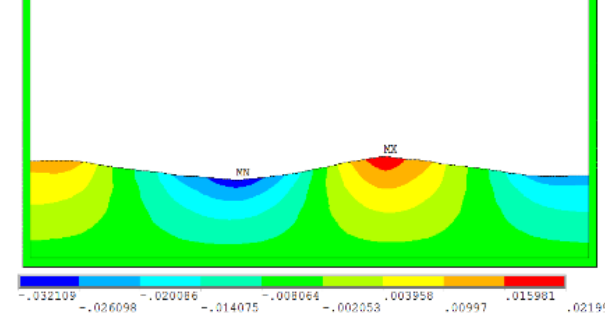
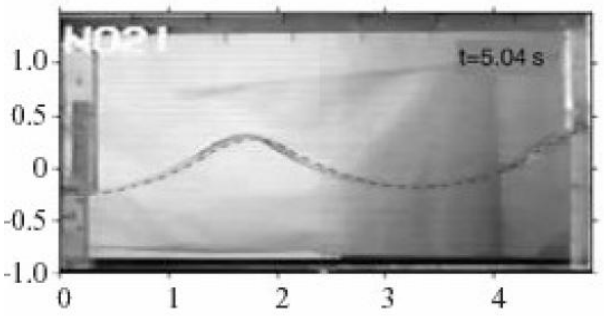
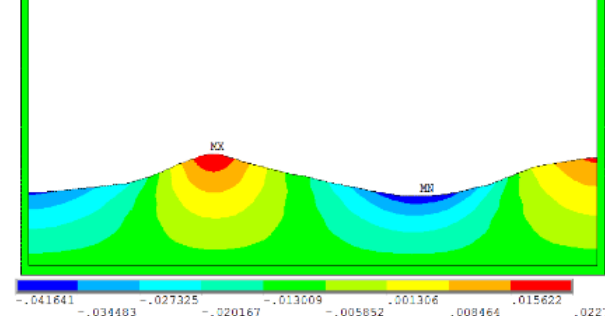
Сравнение частот и форм собственных колебаний жидкости в прямоугольном резервуаре, полученных численными и аналитическим методами, показало хорошее качественное (форма свободной поверхности жидкости) и количественное (частота колебаний) совпадение. Максимальная разница в вычисленных низших трех собственных частотах составила 1,4%. Расхождения на высших формах колебаний (до 3,5% на десятой собственной частоте) объясняются разрешающей способностью, принятой конечноэлементной сетки. Сопоставление форм и частот высших собственных колебаний резервуара с жидкостью при использовании элементов FLUID30 и FLUID80 показало хорошее соответствие, что также позволяет сделать вывод о возможности применения данных элементов при модальном анализе связанных систем.

*Вторым* верификационным примером была принята задача колебания прямоугольного резервуара, частично заполненного жидкостью, при динамическом воздействии. Данный пример имеет эталонное экспериментальное решение, с которым сопоставлялись полученные

результаты. На данном примере оценивалась возможность использования конечных элементов типа FLUID80 в лагранжевой постановке для оценки формы свободно поверхности жидкости при динамическом воздействии.

Полученные результаты показали хорошее совпадение с экспериментом по форме свободной поверхности жидкости. На основании этого можно сделан вывод о возможности использования элементов FLUID80 при расчетах связанных систем на динамические воздействия, не смотря на значительное упрощение уравнений гидроупругости. Акустические элемента FLUID30 не использовались в данном верификационном примере из-за отсутствия возможности адекватного отображения формы свободной поверхности.

Таблица 3.1 – Визуальное сопоставление форм свободной поверхности жидкости, полученных в эксперименте и численным методом

Эксперимент	Лагранж, FLUID80
Время, $t = 4,68$ с	
	
Время, $t = 5,04$ с	
	

Третий верификационный пример посвящен сопоставлению результатов динамического расчета водоподпорного сооружения с вертикальной напорной гранью при разных способах учета жидкости и влиянию глубины водохранилища на динамическое НДС системы. В качестве результата, с которым проводилось сопоставление, принимались данные полученные при учете водного массива присоединенными массами, что является наиболее распространённым методом в современной практике динамических расчетов гидротехнических сооружений.

Были рассмотрены 4 варианта высоты плотины, с напором на сооружение  $H=5,10$ м (низконапорные),  $H=25$ м (средненапорная) и  $H=50$ м (высоконапорная). Для каждого из принятых вариантов водохранилище

моделировалось 3-мя способами (присоединенными массами, акустическими элементами FLUID30 и гидродинамическими элементами FLUID80). Для всех четырех вариантов, принятая расчетная схема имела упрощенный вид (рисунок 3.1), в частности, водоподпорное сооружение с вертикальной напорной гранью представляет собой прямоугольную стену с соотношением ширины к высоте – 1/4. Со стороны верхнего бьефа задан водный массив с соотношением глубины к длине водохранилища – 1/12.

К моделям прикладывалось динамическое воздействие по оси X (горизонтально, вдоль потока), заданное акселерограммой. Время акселерограммы 10 с максимальное значение ускорений  $9,10 \text{ м/с}^2$ , шаг по времени 0,2 с (рисунок 3.1). Качественная форма принятой акселерограммы соответствует реальной, однако значения ускорений были намеренно завышены, для получения большего отклика системы. Ускорение прикладывалось в качестве инерционной нагрузки. Расчеты проводились без учета общесистемного демпфирования.

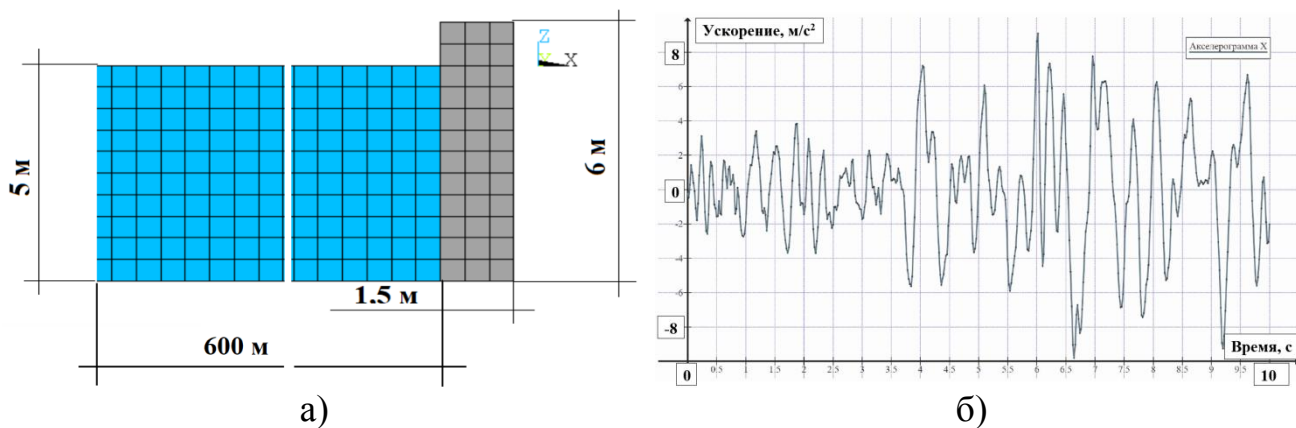


Рисунок 3.1 – Расчетная конечноэлементная модель бетонной плотины с вертикальной напорной гранью. Вариант №1. Напор – 5 м (а)  
Прикладываемое ускорение вдоль оси X (б)

Для анализа отклика системы на динамическое воздействие важным параметром является частота и форма собственных колебаний. Поэтому, на первом этапе, в каждом из 4-х расчетных вариантов были определены низшие собственные частоты и формы колебания сооружения с учетом различных вариантов моделирования водохранилища. Следует отметить, что результаты с применением акустических и гидродинамических элементов хорошо соотносятся между собой и различаются в пределах 1%. А частота колебаний плотины при учете жидкости присоединенными массами в среднем на 3-4% ниже двух других вариантов учета водохранилища.

Основными показателями, по которым проводилось сопоставление результатов расчета на сейсмическое воздействие, были:

- перемещения (UX) крайнего узла на верховой грани (гребне) плотины, со стороны верхнего бьефа;
- ускорения (AX) того же узла.

Результаты динамических расчетов при различных способах моделирования жидкости представлены на рисунках 3.2 и 3.3 для двух крайних вариантов (напор 5м и 50м).

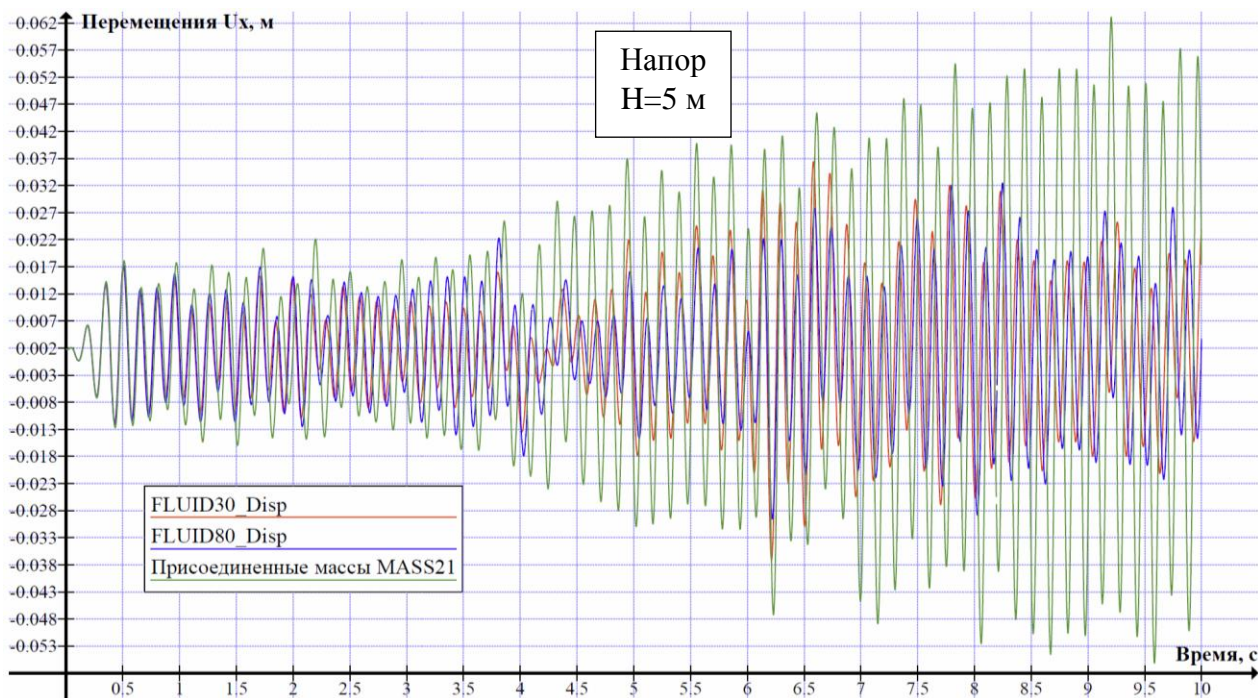


Рисунок 3.2 – Вариант №1. Напор – 5м

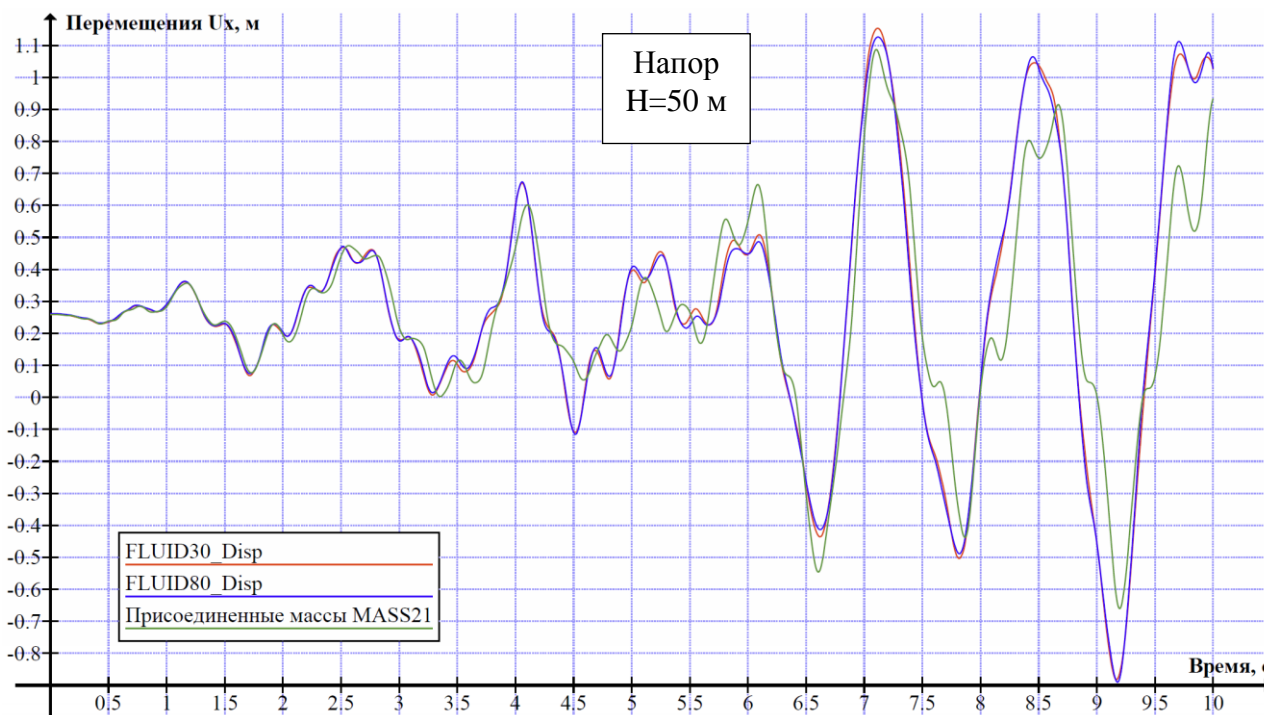


Рисунок 3.3 – Вариант №4. Напор – 50м. Горизонтальные перемещения узла на верхней грани (гребне) плотины ( $U_x$ , м). Красный график – элементы водного массива (FLUID30), синий – элементы водного массива (FLUID80), зеленый – вода учтена как присоединенная масса

Анализ перемещений для вариант №1 (H=5м) показал значительное расхождение значений (начиная с 4-ой секунды) при учете жидкости присоединенными массами относительно акустических и гидродинамических элементов (FLUID30 и FLUID80). Максимальные значения перемещений для варианта с присоединенными массами превышает максимальные перемещения для остальных вариантов более чем на 40%.

Максимальные значения перемещений при моделировании жидкости акустическими (FLUID30) и гидродинамическими элементами (FLUID80) отличаются незначительно, однако характер перемещений имеет расхождения, что объясняется влиянием поверхностной волны, которая учитывается в элементах FLUID80.

Для варианта №2 (H=10м) максимальные значения перемещений для модели с присоединенными массами по сравнению с акустическими и гидродинамическими элементами ниже на 35%, но характер перемещений, начиная с 4-ой секунды имеет другой вид.

Анализ перемещений для вариантов №3 и №4 (H=25 и 50м) показал хорошее качественное и количественное совпадение результатов для акустических и гидродинамических элементов (FLUID30 и FLUID80), что объясняется снижением влияния поверхностной волны. Перемещения при задании присоединенных масс по максимальным значениям отличаются незначительно, но в характере перемещений имеется нарастающий сдвиг по фазе.

По результатам проведенных расчетных исследований оценивались колебания водного массива. Для акустических элементов (FLUID30) – по распределению внутреннего давления, а для гидродинамических элементов (FLUID80) – по форме поверхностной волны. В таблице 3.2 представлены значения максимальной высоты волны возле сооружения для всех 4-х вариантов расчетной модели (с высотой плотины 5, 10, 25 и 50м).

Таблица 3.2 – Максимальная высота волны возле сооружения, полученная на моделях с гидродинамическими элементами (FLUID80)

Максимальная высота волны возле сооружения, м	Вариант №1	Вариант №2	Вариант №3	Вариант №4
	H = 5м	H = 10м	H = 25м	H = 50м
	0,59 м	0,87 м	1,27 м	1,54 м

По результатам анализа полученных результатов можно сделать вывод о неприменимости подхода с присоединенными массами для низконапорных гидроузлов (H<10м), в частности, в связи со значительным завышением результирующих перемещений.

Сколько-нибудь значимые отличия результатов при моделировании жидкости элементами FLUID30 и FLUID80 проявляются только на малых глубинах водохранилища (H<10м), когда вклад поверхностной волны в величину гидродинамического давления оказывается существенным.

И в качестве *четвертой* верификационной задачи был принят «бенчмарк» (контрольная задача) предложенный на 12-ом Международном

семинаре по вопросам численного моделирования плотин, который организует международная комиссия по большим плотинам (ICOLD). Рассматривалась арочная плотина высотой 220м с водохранилищем конечной длины при сейсмическом воздействии, заданном трехкомпонентной акселерограммой. Свои результаты по этой задаче представили 13 коллективов из 10 стран, с которыми и проводилось сопоставление. Рассматриваемая в бенчмарке арочная плотина была разработана специально для тестирования и не является аналогом реально существующей плотины. Конечноэлементная модель (рисунок 3.4), включая КЭ-аппроксимацию, свойства материалов и граничные условия, и трехкомпонентная акселерограмма были представлены участникам в качестве исходных данных.

По условиям бенчмарка, все участники должны были провести три основных расчета:

1. статический расчет (перемещения и напряжения в характерных сечениях);
2. определение сейсмически значимых собственных частот и форм колебаний плотины (первые 10 частот и форм) (рисунок 3.5);
3. динамический расчет при сейсмическом воздействии, заданном трехкомпонентной акселерограммой (перемещения и напряжения в характерных сечениях).

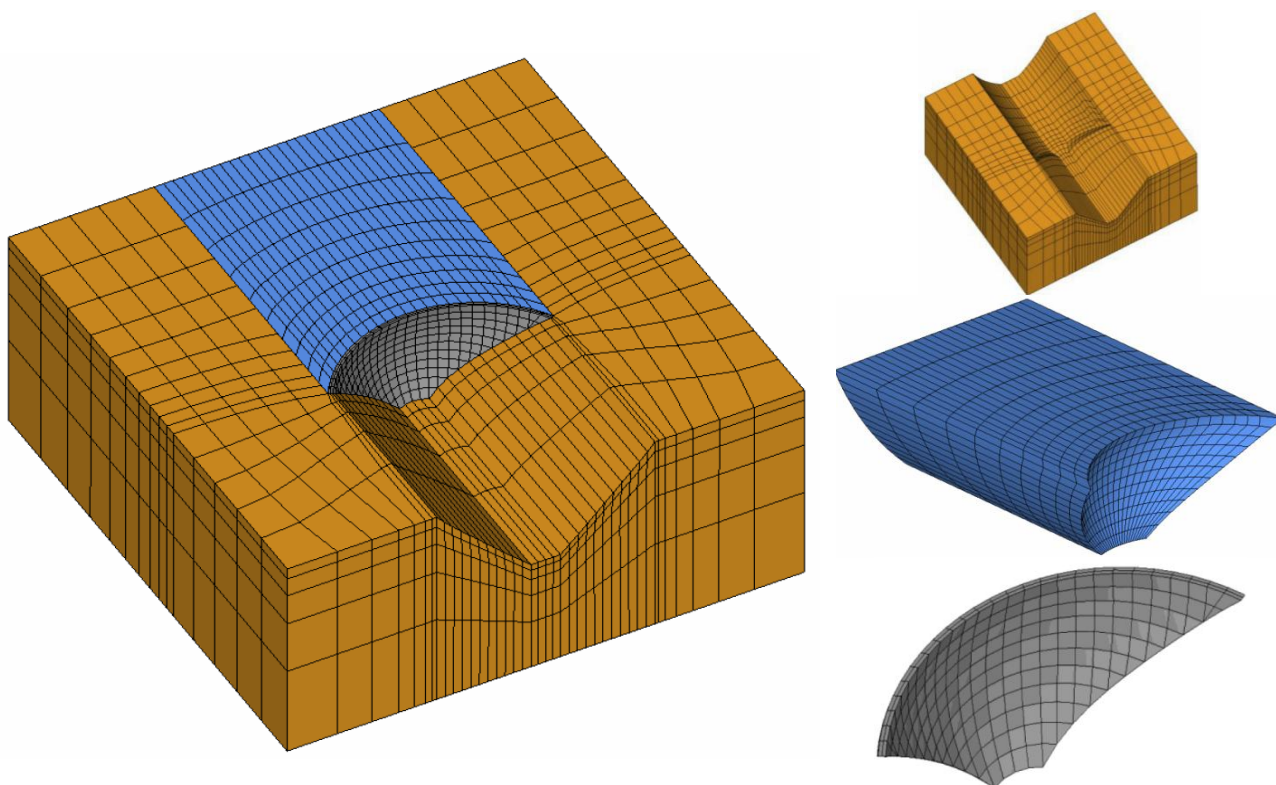


Рисунок 3.4 – Конечноэлементная модель системы «основание - водохранилище - арочная плотина»

Расчеты для модели с гидродинамическими элементами FLUID80 показал некорректные результаты по перемещениям водного массива.

Подробный анализ данной модели показал связь между формой конечных элементов и значениями перемещений. Дальнейшие исследования подтвердили невозможность применения элементов FLUID80 для расчетов объемных связанных задач, где массив жидкости ограничен криволинейными поверхностями.

Акустические элементы FLUID30 показали адекватные результаты, сопоставимые с результатами, полученными с использованием других численных методов. Подтверждена возможность применения элементов FLUID30 для динамических расчетов гидротехнических сооружений произвольной формы в объемной постановке.

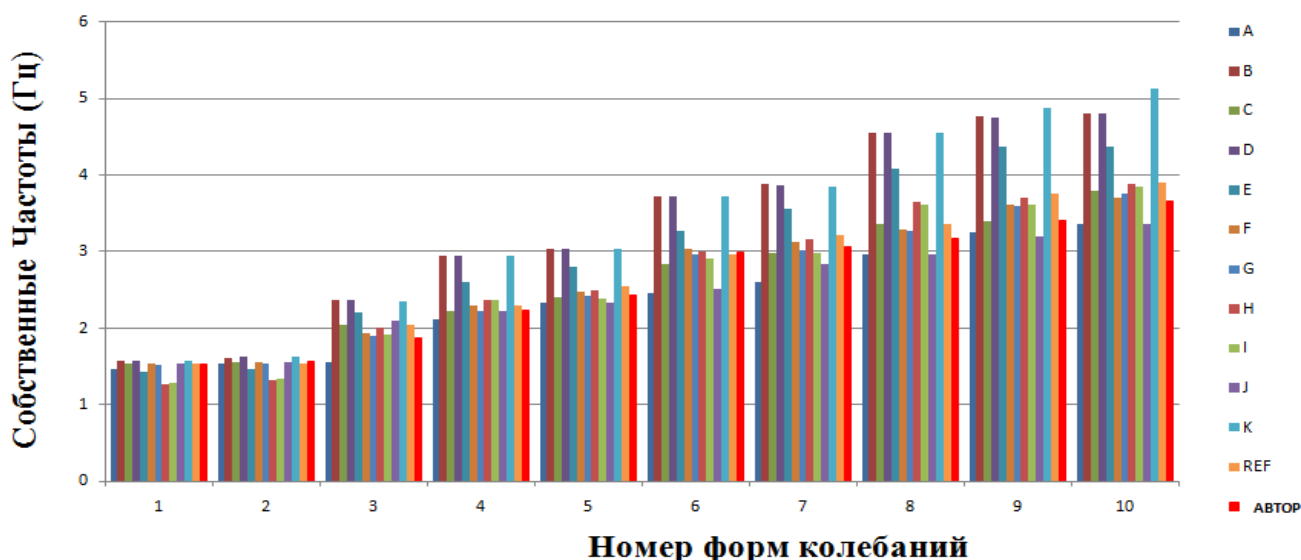


Рисунок 3.5 – Частоты собственных колебаний арочной плотины, полученные всеми участниками бенчмарка

В четвертой главе представлены результаты апробации уточненной численной методики моделирования динамического НДС трехмерной системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» при сейсмическом воздействии, заданном трехкомпонентной 8-ми бальной акселерограммой, в сочетании с постоянными статическими нагрузками (собственный вес конструкций, нагрузки от оборудования, гидростатическое давление).

В качестве объекта исследования выбрано низконапорное гидротехническое сооружение - шлюз-регулятор №1 (ШР-1) Кубанских ГЭС. Сооружение представляет собой трехпролетный водослив с широким порогом, выполненный из монолитного железобетона. Ширина каждого пролета 6м, высота 2,3м. Напор на пороге при НПУ составляет 5,95м. Плановые размеры подводной части сооружения равны 18,4×10,0 м, высота – 8,0м. Надводная часть шлюза представлена одноэтажным каркасным зданием со следующими размерами: в плане 23,45 × 5,4м, высотой 7,5м (рисунок 4.1). Колонны и подкрановые балки выполнены из сборного железобетона, стены (ограждающие конструкции) и перегородки кирпичные.

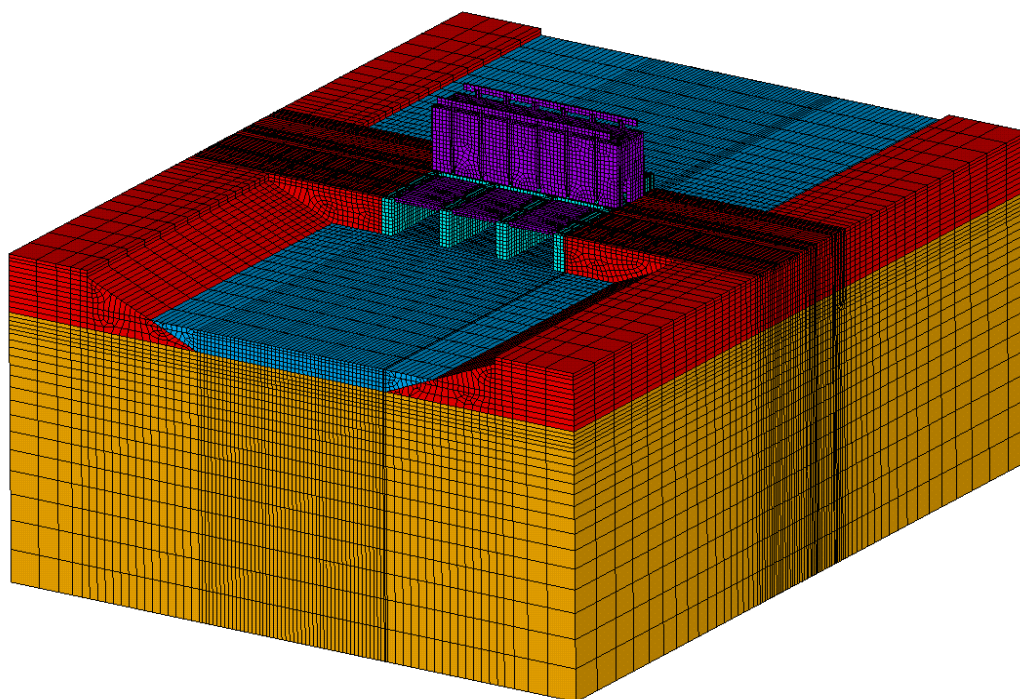


Рисунок 4.1 – Общий вид КЭ-модели шлюз-регулятор №1

На первом этапе расчетных исследований водный массив учитывался тремя различными способами:

1. объемными акустическими элементами типа FLUID30;
2. объемными гидродинамическими элементов типа FLUID80;
3. присоединенными массами, с использованием нагрузочных элементов типа SURF154.

Необходимо отметить значительную сложность назначения присоединенных масс на напорную грань шлюза-регулятора произвольной формы (рисунок 4.2). В действующих нормативных документах значения присоединенных масс зависят от расстояния между сооружением и противоположным ему берегом водоема или между противоположными стенками конструкции, что в случае с произвольной формой напорной грани вызывает определенные сложности.

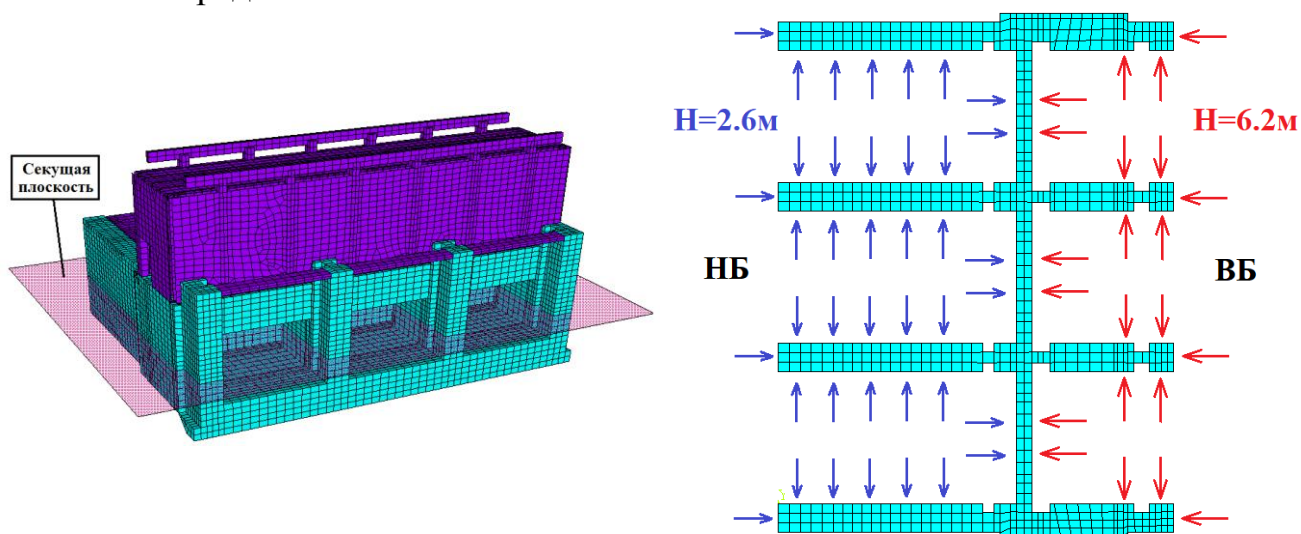


Рисунок 4.2 – Форма напорной грани ШР-1. Вид сверху



Проведен модальный анализ и динамический расчет на сейсмическое воздействие, заданное однокомпонентной акселерограммой, для трех вариантов учета водного массива.

Анализ результатов модального расчета показал значительное отличие по собственным частотам для трех вариантов. Низшие три формы собственных колебаний близки, начиная с четвертой возникает расхождение и в формах колебаний.

Для случая учета жидкости присоединенными массами отличия в частотах и формах от варианта с акустическими элементами объясняется недостатками методики расчета присоединенных масс жидкости для произвольной формы напорной грани. Для варианта с использованием гидродинамических элементов типа FLUID80, более высокие собственные частоты объясняются существенными вынужденными изменением расчетной схемы (исключение боковых призм массива жидкости) из-за выявленных особенностей/ограничений данного конечного элемента. Исключение из расчетной схемы значительной части водного массива и уменьшение за счет этого его массы объясняет увеличение частоты собственных колебаний.

Сопоставление результатов динамического расчета на горизонтальное сейсмическое воздействие при различных способах учета жидкости показало картину, соответствующую результатам *третьего* верификационного примера. Для низконапорного гидротехнического сооружения учет жидкости присоединенными массами показывает завышенный результат по перемещениям и ускорениям относительно вариантов с применением акустических и гидродинамических элементов (рисунки 4.3).

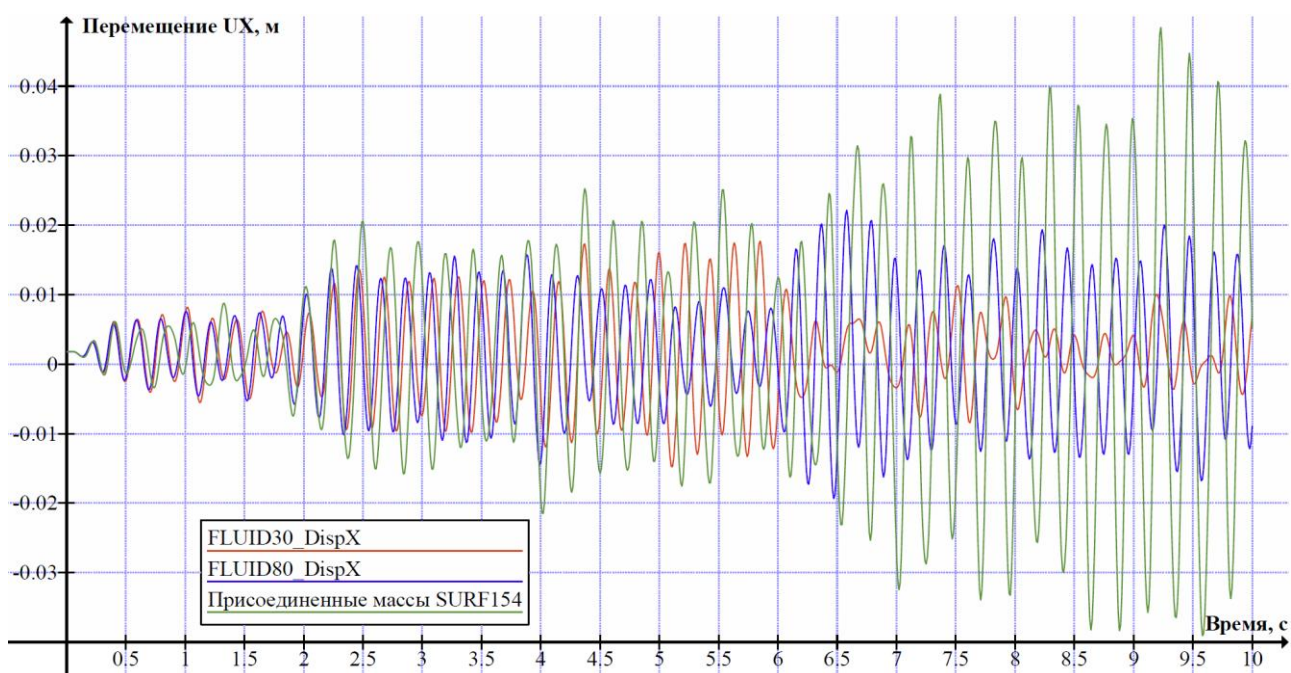


Рисунок 4.3 – Горизонтальные перемещения ( $U_x$ ) (вдоль потока) узла покрытия

Отличие результатов между расчетными моделями с акустическими (FLUID30) и гидродинамическими элементами (FLUID80) объясняется существенным уменьшением объемов водного массива при использовании гидродинамических элементов (FLUID80), из-за их ограничений.

Полный расчетный анализ динамической НДС системы «грунтовое основание - сооружение шлюза-регулятора №1 – водный массив» с учетом предварительных результатов был выполнен на модели с использованием акустических элементов (FLUID30). При расчете на сейсмическое воздействие использовалась реальная трехкомпонентная 20-ти секундная акселерограмма, полученная по данным сейсмического микрорайонирования участка расположения сооружения.

При решении задачи в динамической постановке использовался метод интегрирования Ньюмарка. Параметры интегрирования Ньюмарка  $\alpha$ ,  $\delta$  по умолчанию приняты равными  $\alpha=0.2525$  и  $\delta=0.505$ . Шаг интегрирования по времени принят кратным шагу исходной акселерограммы, для исключения возможности пропуска пикового значения и равным  $1/6$  от минимального периода собственных колебаний конструкции. Значение шага интегрирования принято равным  $0,005$ с. Для железобетонных конструкций сооружения задавалось 5% демпфирование Релея, константы демпфирования принимали следующие значения ( $\alpha=4,44$  и  $\beta=0,000379$ ). Для массива грунта коэффициент  $\xi$  задавался равным 15% от критического.

По результатам проведенного динамического расчета на сейсмическое воздействие были получены данные по перемещениям, усилиям и напряжениям в ключевых несущих элементах сооружения шлюза-регулятора №1 и НДС основания.

В оценке НДС несущих конструкций здания шлюза-регулятора ключевое значение имеют колонны. В качестве одного из результатов динамического расчета был получен график изменения продольной силы в основании одной из крайних колонн (рисунок 4.4). Также были получены изменения во времени изгибающих моментов во всех колоннах.

Возможность оценить гидродинамическое давление жидкости на гидротехническое сооружение является преимуществом применяемого метода уточненного динамического анализа связанных систем. В данной задаче рассматривалось изменение давления жидкости на затвор со стороны верхнего бьефа. Получен график изменения давления жидкости в нижней точке затвора во время сейсмического воздействия (рисунок 4.5). Статическое давление в рассматриваемой точке составляет  $58,4$  кПа, при напоре  $5,95$  м. Максимальное по времени давление составляет  $110,59$  кПа, а минимальное –  $12,55$  кПа.

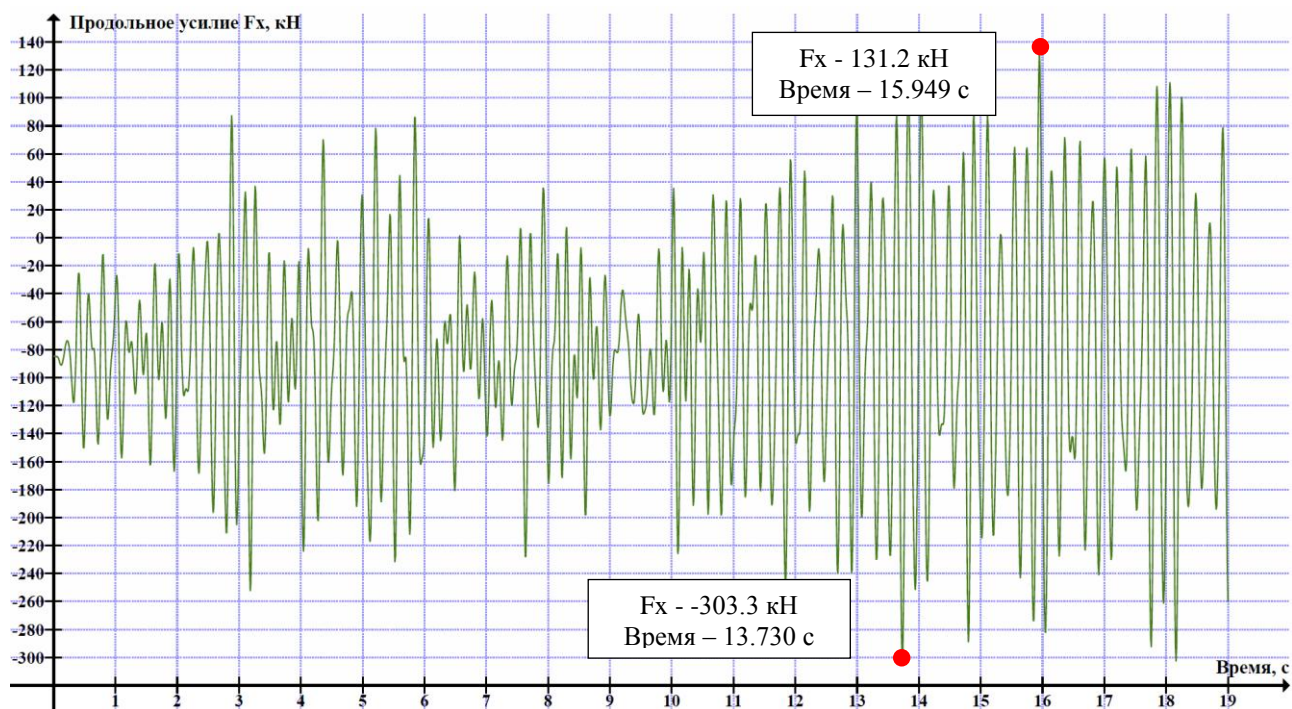


Рисунок 4.4 – Продольное усилие в основании крайней колонны  
 $F_{x\max}=131,2$  кН (15,949 с) (растяжение).  $F_{x\min}=-303,3$  кН (13,730 с) (сжатие)

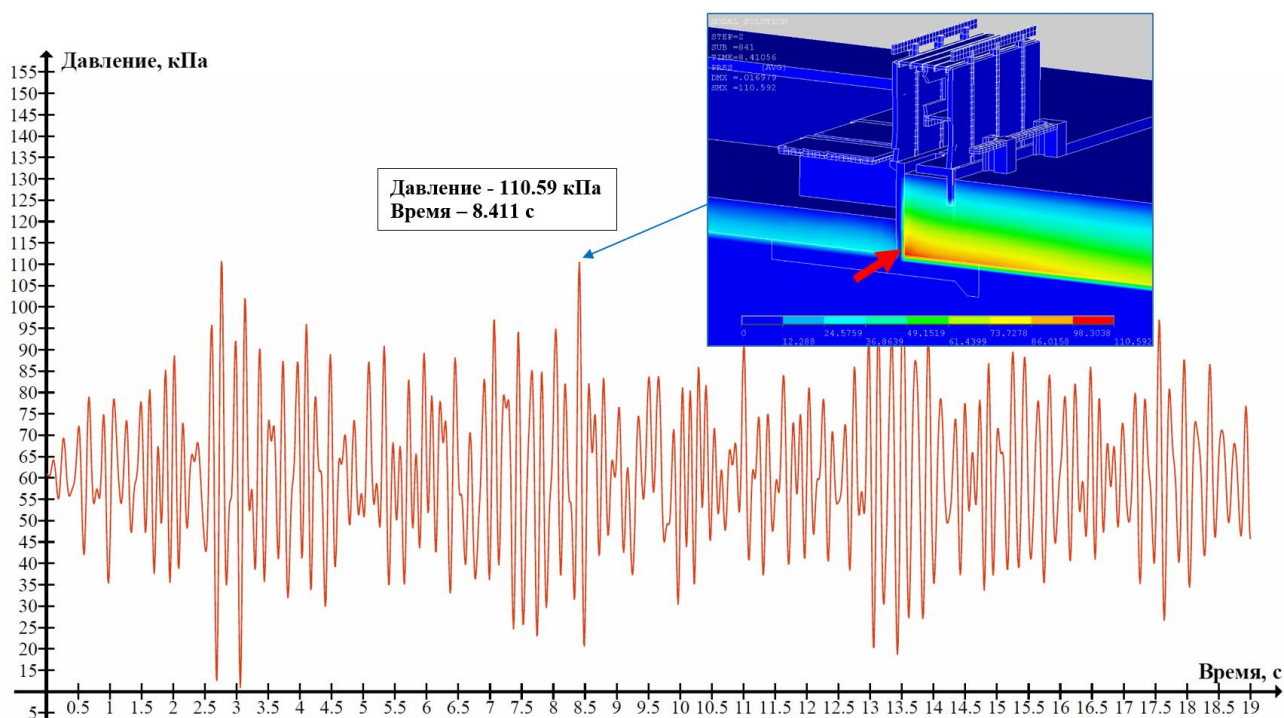


Рисунок 4.5 – Давление жидкости в нижней точке затвора (показана красной стрелкой) со стороны верхнего бьефа, кПа.  $P_{\max}=110,59$  кПа (8,411 с)

Оценка сейсмостойкости оборудования гидроэнергетических сооружений является важной составляющей обоснования безопасности сооружения. В случае установки оборудования в здании гидроэлектростанции или на гидротехническом сооружении, расчетное сейсмическое воздействие (для оборудования) должно быть определено как реакция сооружения (ответная

акселерограмма, спектр ответа) на сейсмическое воздействие в месте установки оборудования, исходя из сейсмического расчета сооружения. Спектр ответа определяется по ответной акселерограмме численным интегрированием по времени (с использованием безусловно устойчивых разностных схем) уравнений колебаний линейных осцилляторов с представительным набором частот при заданном уровне демпфирования. В качестве примера, для данной задачи была выбрана точка расположения шкафа автоматики на полу аппаратной внутри здания шлюза-регулятора, для которой из ответной акселерограммы получен спектр ответа (ускорений).

В результате проведенного расчета были определены напряжения в массивной железобетонной части сооружения (фундаментная плита, бычки и боковые устои). На рисунках 4.6 – 4.7 приведены компоненты статических напряжений и динамических напряжений в фундаментной плите в характерный момент времени.

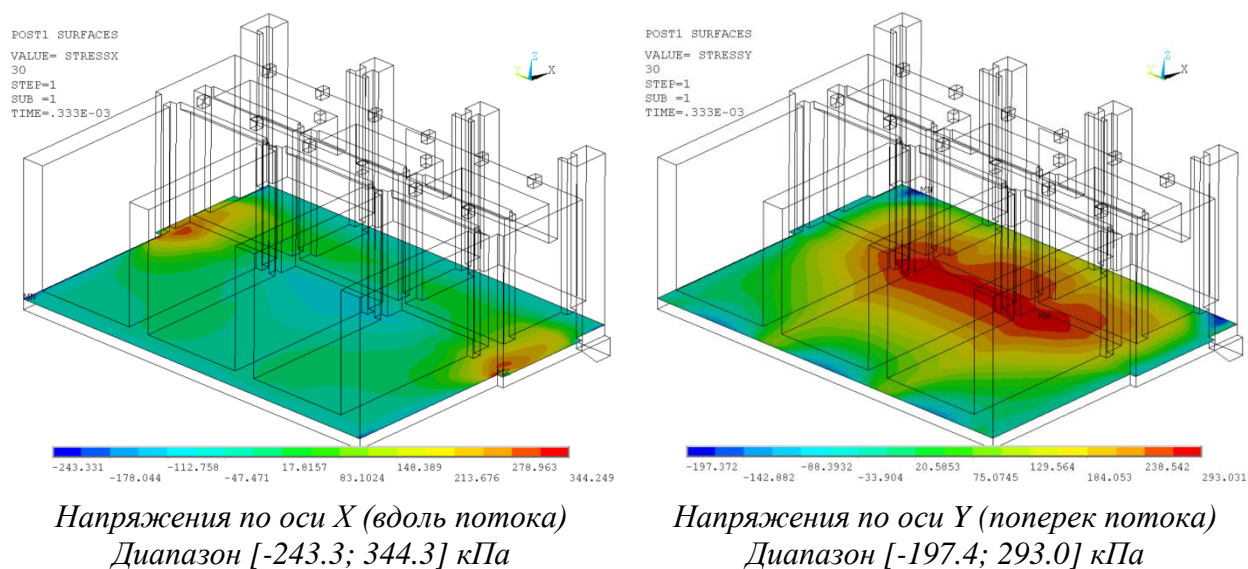


Рисунок 4.6 – Расчетные статические напряжения в фундаментной плите

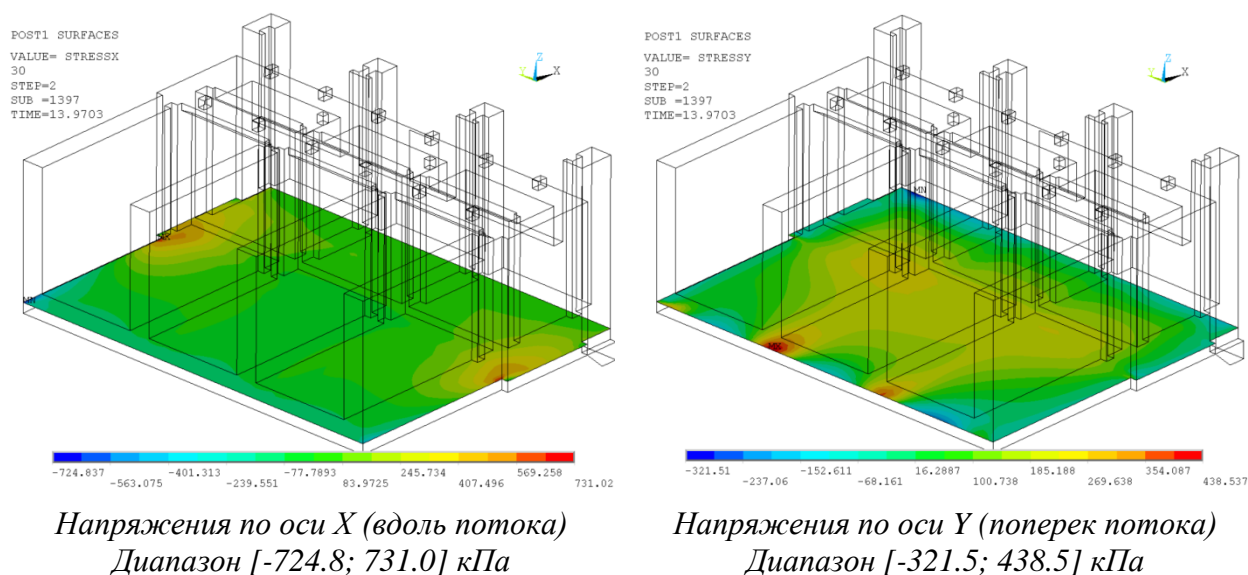
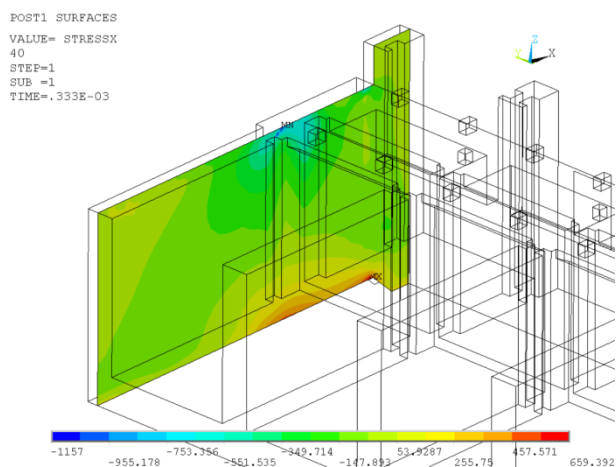
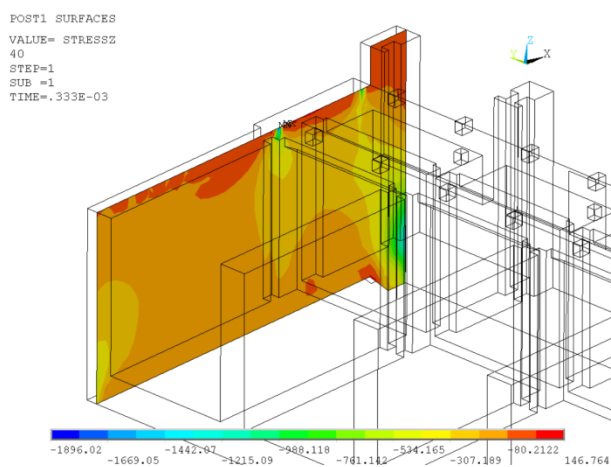


Рисунок 4.7 – Расчетные напряжения в фундаментной плите (время – 13,970 с)

На рисунках 4.8 – 4.9 приведены компоненты статических и динамических напряжений в сечении правобережного устоя в характерный момент времени.

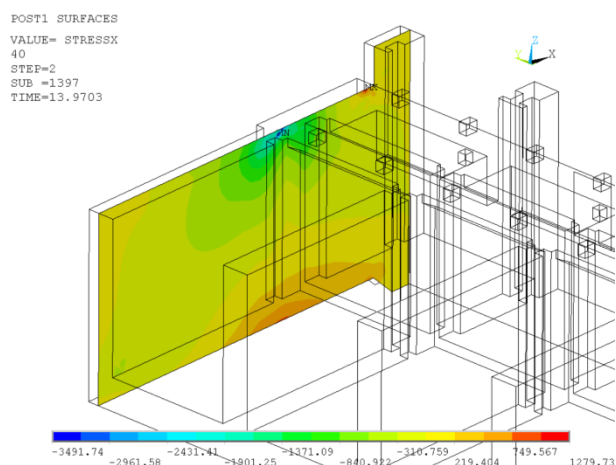


*Напряжения по оси X (вдоль потока)  
Диапазон [-1157.0; 659.4] кПа*

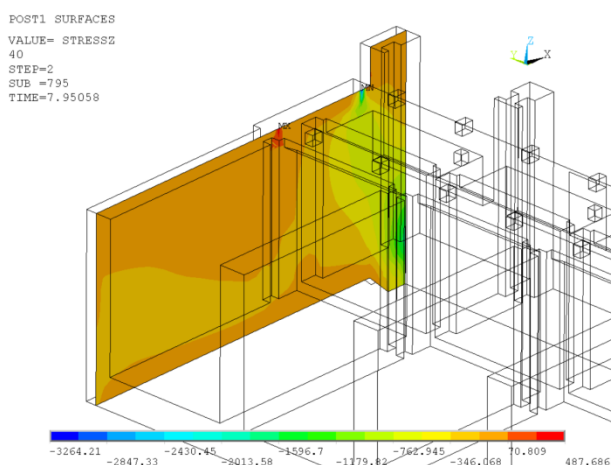


*Напряжения по оси Z (вертикально)  
Диапазон [-1896.0; 146.8] кПа*

**Рисунок 4.8 – Расчетные статические напряжения в правобережном устое**



*Напряжения по оси X (вдоль потока)  
Диапазон [-3491.7; 1279.7] кПа*



*Напряжения по оси Z (вертикально)  
Диапазон [-3264.2; 487.7] кПа*

**Рисунок – 4.9 Расчетные напряжения в правобережном устое (время – 13.970 с)**

Также по результатам проведенного расчета получены качественные (распределение) и количественные (значения) данные НДС грунтового массива в основании шлюза-регулятора №1 Кубанских ГЭС.

Расчеты показали в целом ожидаемую картину распределения статического и динамического НДС в основании и несущих конструкциях шлюз-регулятор №1 Кубанских ГЭС. Продемонстрирована возможность проведения оценки сейсмостойкости оборудования гидроэнергетических объектов или выдачи рекомендаций для его изготовления в сейсмостойком исполнении по полученным расчетным спектрам ответа, привязанным к местам его установки.

Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанную методику к применению для широкого класса комбинированных большеразмерных систем «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение», в том числе, для низконапорных гидротехнических сооружений со сложными формами напорной грани и ложа водохранилища.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных расчетных исследований можно сделать следующие основные выводы:

1. По результатам выполненного обзорно-аналитического исследования существующих подходов к расчету гидротехнических сооружений с учетом влияния водохранилища на динамические (в том числе, сейсмические) воздействия обоснована необходимость развития уточненного численного моделирования трехмерных систем «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» и выполнена конкретизация задач диссертационного исследования.

2. Предложена методика уточненного численного моделирования динамического напряженно-деформированного состояния произвольных трехмерных систем «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение». Методика базируется на объемных схемах метода конечных элементов в перемещениях и акустическом приближении, неявных схемах прямого интегрирования уравнений динамики, реализована в программном комплексе ANSYS Mechanical APDL и, по необходимости, дополнена собственными программными разработками.

3. Верификация методики проведена на серии из четырех представительных тестовых примеров, имеющих либо точное аналитическое решение, либо экспериментальное, либо альтернативное численное подтверждение. Среди них – тестовая задача (бенчмарк) «Взаимодействие арочной плотины, водохранилища и основания при сейсмическом воздействии», которая показала близость результатов, полученных автором, к результатам мировых лидеров в данной области.

4. На серии верификационных задач обоснованы результаты применимости альтернативных способов учета жидкости (гидродинамическими элементами с возможностью учета поверхностных гравитационных волн, акустическими элементами или присоединенными массами) при динамических расчетах связанных задач. Наиболее универсальными показали себя гидродинамические элементы, но они обладают ограничениями по форме области водохранилища и конечных элементов, и не применимы для произвольных систем.

5. Верификационные исследования также показали, что для низконапорных гидроузлов ( $H < 10\text{м}$ ) учет водохранилища методом присоединенных масс дает завышенные результаты, а более адекватную картину динамического НДС показывают модели акустическими или гидродинамическими конечными элементами жидкости.

6. Для апробации предложенной методики разработана и исследована подробная объемная динамическая конечноэлементная модель системы «основание – водохранилище – шлюз-регулятор №1 Кубанских ГЭС». Анализ полученных результатов показал непротиворечивую картину динамического НДС основания и несущих конструкций шлюза-регулятора №1.

7. Показано, что для низконапорных гидроузлов с произвольной формой напорной грани и подводящего канала наиболее приемлемым по точности является учет жидкости акустическими элементами, в том числе, из-за неустраняемых ограничений гидродинамических элементов для этих случаев.

8. Представленные результаты диссертационного исследования позволяют рекомендовать реализованную методику численного моделирования и результаты решения верификационных и апробационных задач в практике расчетных исследований динамики гидротехнических сооружений различных классов на значимых этапах их жизненного цикла.

9. Перспективой дальнейшей разработки данной темы представляется наукоемкая интеграция предложенной методики численного моделирования системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» в разрабатываемые и действующие системы мониторинга состояния гидротехнических сооружений, а также учет значимых видов (физической, геометрической, структурной и генетической) нелинейностей.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Дмитриев, Д.С. Сравнение методов динамического расчета гидротехнических сооружений по заданным акселерограммам (с использованием программного комплекса ANSYS) / А.М. Белостоцкий, Д.С. Дмитриев // *Природообустройство*. – 2013. – № 5. – С. 43-46.

2. Дмитриев, Д.С. Постановка, конечноэлементная аппроксимация и алгоритмы решения задач расчетного обоснования связанных систем «сооружение–жидкость» / А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов, Т.Б. Кайтуков, И.Н. Афанасьева, В.В. Вершинин, Д.С. Дмитриев, А.Р. Усманов, А.С. Чужинов, С.В. Щербина // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2014. – 5(256). – С. 21-27.

3. Дмитриев, Д.С. Верификация методики численного моделирования динамического напряженно-деформированного состояния трехмерных систем «сооружение – жидкость» / А.М. Белостоцкий, Д.С. Дмитриев, Нгуен Тай Нанг Лыонг // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. – 2015. – № 4. – С. 124-132.

4. Дмитриев, Д.С. Сравнительный анализ методик численного моделирования динамики трехмерных систем «основание – плотина – водохранилище» при сейсмических воздействиях / А.М. Белостоцкий, Нгуен Тай Нанг Лыонг, Д.С. Дмитриев, С.В. Щербина // *International Journal for*

Computational Civil and Structural Engineering. – 2016. – №2. – С. 65-74.

5. Дмитриев, Д.С. Методика численного моделирования напряженно-деформированного состояния системы «основание – плотина – водохранилище» при сейсмических воздействиях / А.М. Белостоцкий, Д.С. Дмитриев, Нгуен Тай Нанг Лыонг // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2016. – №4. – С. 80-86.

6. Дмитриев, Д.С. Особенности использования конечных элементов с возможностью учета поверхностных гравитационных волн при динамическом расчете связанных систем «гидротехническое сооружение-жидкость» / Д.С. Дмитриев // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2017. – № 3. – С. 50-58.

7. Дмитриев, Д.С. Апробация численной методики расчета динамического НДС трехмерной системы «основание – сооружение напорного фронта ГТС – водохранилище» на примере шлюза-регулятора Кубанских ГЭС / Д.С. Дмитриев // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2018. – №4. – С. 26-35.