

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА имени К.А. ТИМИРЯЗЕВА»
(ФГБОУ ВО РГАУ - МСХА имени К.А. Тимирязева)

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

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
член-корреспондент РААСН,
Белостоцкий Александр Михайлович

Москва – 2019 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДИК, ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ И ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО НДС ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ.....	13
1.1. Общие положения.....	13
1.2 Обзор основных работ, посвященных учету влияния водной среды в рамках статической теории сейсмостойкости.....	14
1.3 Обзор основных работ, посвященных численным методам исследования взаимодействия гидротехнического сооружения с основанием и водохранилищем в рамках динамической теории сейсмостойкости.	17
1.4 Общие численные подходы к моделированию жидкости, контактирующей с твердым телом.....	25
1.5 Современные программно-алгоритмические комплексы для численного моделирования динамического НДС связанных систем.....	27
1.6 Выводы по главе 1.....	28
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА УТОЧНЕННОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО НДС ТРЕХМЕРНЫХ СИСТЕМ «СООРУЖЕНИЕ - ЖИДКОСТЬ» ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ.....	30
2.1 Общие положения.....	30
2.2 Основные уравнения поведения сооружения и жидкости.....	31
2.2.1. Уравнения поведения сооружения.....	31
2.2.2. Уравнения поведения жидкости в терминах давления (постановка Эйлера).....	31
2.3 Численная аппроксимация связанных задач.....	33
2.3.1. Конечноэлементная аппроксимация уравнений поведения сооружения.....	33
2.3.2. Конечноэлементная аппроксимация уравнений поведения жидкости... ..	38
2.4 Программная реализация разработанной методики.....	40
2.4.1. Реализующий базовый программный комплекс.....	40
2.4.2 Используемые конечные элементы для моделирования поведения жидкости в эйлеровой постановке.....	42

2.4.3 Используемые конечные элементы для моделирования поведения жидкости в лагранжевой постановке	44
2.4.4 Используемые конечные элементы для учета жидкости присоединенными массами	48
2.4.5 Используемые конечные элементы для моделирования твердого тела (сооружения, основания).....	49
2.5 Собственные программные разработки.....	50
2.6 Выводы по главе 2.....	52
ГЛАВА 3. ВЕРИФИКАЦИЯ УТОЧНЕННОЙ МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО НДС ТРЕХМЕРНЫХ СВЯЗАННЫХ СИСТЕМ	53
3.1. Общие положения. Выбор верификационных задач.....	53
3.2. Сопоставление форм и частот собственных колебаний жидкости в прямоугольном резервуаре, полученных на модели, с аналитическим решением.....	54
3.2.1. Описание расчетной модели.....	54
3.2.2. Параметры расчета	58
3.2.3. Аналитическое решение	58
3.2.4. Анализ результатов и выводы.....	59
3.3. Колебания свободно поверхности жидкости в жестком прямоугольном резервуаре при динамическом кинематическом воздействии. Сопоставление с экспериментом.....	62
3.3.1. Описание расчетной модели.....	62
3.3.2. Параметры расчета	65
3.3.3. Анализ результатов и выводы.....	65
3.4. Сопоставление различных методов учета жидкости и влияние глубины водохранилища на динамическое НДС бетонной плотины с вертикальной напорной гранью при сейсмическом воздействии, в плоской постановке	68
3.4.1. Описание расчетной модели.....	68
3.4.2. Параметры расчета	74
3.4.3. Анализ результатов и выводы.....	75

3.5. Сопоставление результатов различных методов численного моделирования динамического НДС трехмерной системы «основание - арочная плотина - водохранилище» на примере бенчмарка	89
3.5.1. Описание бенчмарка	89
3.5.2. Описание расчетных моделей	97
3.5.3. Параметры расчета	99
3.5.4. Анализ результатов и выводы.....	100
3.6 Выводы по главе 3.....	103
ГЛАВА 4. АПРОБАЦИЯ УТОЧНЕННОЙ МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО НДС ТРЕХМЕРНОЙ СИСТЕМЫ «ОСНОВАНИЕ – ВОДОХРАНИЛИЩЕ – ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СООРУЖЕНИЕ» ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ.....	106
4.1. Постановка задачи расчетных исследований.....	106
4.2. Описание расчетных моделей ГАЭС шлюза-регулятора №1 каскада кубанских ГЭС	112
4.2.1. Параметры расчетных КЭ-моделей шлюза-регулятора	112
4.2.2. Параметры расчетов	116
4.3. Результаты сопоставительных расчетов шлюза-регулятора №1 каскада кубанских ГЭС при разных способах учета жидкости	117
4.3.1. Собственные частоты и формы колебаний системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение»	117
4.3.2. Динамический расчет системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» на сейсмические воздействия, заданные однокомпонентной акселерограммой.....	119
4.3.3. Анализ и сопоставление результатов	122
4.4. Результаты динамического расчета шлюза регулятора №1 по заданной трехкомпонентной акселерограмме с использованием акустических элементов жидкости	123
4.4.1. Преобразование исходных акселерограмм	123
4.4.2. Анализ динамического напряженно-деформированного состояния системы «грунтовое основание - сооружение шлюза-регулятора №1 – водный массив».....	125
4.5. Выводы по главе 4.....	139

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	141
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	143

ВВЕДЕНИЕ

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 исследования. 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 надлежащей 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.

Объект исследования. Пространственные системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» в условиях действия сейсмических нагрузок.

Предмет исследования. Высокоточное определение трехмерного динамического НДС систем «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» (без введения каких-либо вынужденных и/или необоснованных упрощений).

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.

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.

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.

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДИК, ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ И ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО НДС ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

1.1. Общие положения

При сейсмическом воздействии на гидротехническое сооружение происходят совместные колебания основания, сооружения напорного фронта и водного массива, и в ходе проведения расчетного обоснования приходится иметь дело с задачей контактного взаимодействия (Fluid-Structure Interaction (FSI)). Задачи данного класса являются предметом давнего интереса со стороны ученых-исследователей и инженеров-проектировщиков, так как наличие водной среды 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 гидротехнического сооружения.

Существующие методы сейсмического расчета гидротехнических сооружений с учетом влияния водного массива весьма разнообразны, это и псевдостатические методы, и гораздо более сложные численные методы, к которым, в частности, относятся метод конечных элементов (МКЭ), метод граничных элементов (МГЭ), гибридные МКЭ-МГЭ подходы и разного рода полуаналитические методы.

В данной главе будет представлен аналитический обзор работ, посвященных вопросам взаимодействия сооружения и жидкости, описан историко-научный процесс последовательного уточнения и усложнения расчетных методов для учета существенных факторов (поверхностные гравитационные волны, податливость и геометрические формы сооружения, зарезонансная реакция и другие факторы). Также будут рассмотрены основные методы решения динамических задач и современные программно-

алгоритмические комплексы для численного моделирования динамического напряженно-деформированного состояния (НДС) связанных систем.

1.2 Обзор основных работ, посвященных учету влияния водной среды в рамках статической теории сейсмостойкости

Согласно статической теории сейсмостойкости гидротехнических сооружений, которая широко применялась до 60-х годов, определяется только максимальное значение гидродинамического давления, действующего на напорную грань жесткого (недеформированного) сооружения, основание которого колеблется по заданному (обычно гармоническому) закону. В рамках статической теории проще всего дать предварительную оценку роли гидродинамического давления жидкости в общем комплексе нагрузок, действующих на сооружение. Такой подход до сих пор применим на предварительных стадиях проектирования для экспертных оценок.

Первой работой, посвященной оценке дополнительного гидродинамического давления на плотину с вертикальной напорной гранью, является работа Г.М. Вестергарда [128], выполненная в 1931 г. В результате решения данной задачи была получена известная формула для определения гидродинамического давления на вертикальную грань, которая была положена в основу многих расчетов гидросооружений на сейсмические воздействия. В своей работе Г.М. Вестергардом было установлено, что силы взаимодействия сооружения и жидкости пропорциональны сейсмическим ускорениям и, таким образом, могут приближенно моделироваться с использованием массовой плотности, распределенной по параболическому закону по высоте плотины. В дальнейшем данный подход получил название метода присоединенной массы.

Позже аналогичная задача была рассмотрена Т. Карманом [107], который получил подобные результаты. Предложенная Т. Карманом упрощенная схема движения жидкости основана на предположении, что составляющие ускорения жидкости и гидродинамического давления имеют одинаковый монотонный характер изменения по длине водохранилища. В результате плоская задача

сводилась к интегрированию обыкновенного дифференциального уравнения относительно гидродинамического давления.

В дальнейшем появился ряд работ, посвященных развитию исследований, начатых Вестергардом и Карманом. Например, Н. Мононобе [116] представил решение аналогичное решению Вестергарда, но с учетом волновых эффектов на свободной поверхности водохранилища. Г.А. Братц и Г. Хейлброн [91] провели исследования влияние длины водохранилища на величину гидродинамического давления воды. Работа Л.С. Джекобсена и Л.М. Хоскинсона [104] стала первой в поиске точного решения для определения гидродинамического давления на стенки прямоугольных резервуаров, шлюзов и доков при сейсмических. Полученные теоретические решения были подтверждены результатами экспериментов, проведенных на сейсмической платформе при изучении колебаний резервуаров с жидкостью.

Позже Т. Хатано [103] представил решение для расчетной схемы Вестергарда в наиболее общей форме, описывающей поверхностные и акустические волны. Во всех рассматриваемых выше работах явление резонанса не учитывалось и рассматривались колебания с частотой, меньшей первой собственной частоты жидкости

Существенно позже, в 1956 г., вышла работа П.П. Кульмача [45], которая являлась существенным обобщением задачи о колебаниях сооружения с вертикальной напорной гранью, с учетом влияния водной среды. В этой работе жидкость принималась идеальной и несжимаемой, волновые явления на свободной поверхности не учитывались, но рассматривались произвольные гармонические колебания напорной грани. Задача о горизонтальных поступательных колебаниях является одним из частных случаев полученного решения. В дальнейшем работы Кульмача [43; 44; 46; 47] внесли значительный вклад в развитие вопроса взаимодействия сооружения с жидкостью.

На второй международной конференции по сейсмостойкому строительству, прошедшую в 1960 г., был представлен ряд докладов посвященных сейсмостойкости гидросооружений, в том числе работа С. Коцубо

[108], в которой решалась задача определения сейсмического давления на арочную плотину. Из-за сложной геометрии напорной грани плотины и каньона, не позволяющей получить точное решение, автор упростил задачу и рассмотрел плотину с вертикальной цилиндрической гранью, вписанную в прямоугольный каньон переменного по длине сечения. В результате были получены эпюры гидродинамического давления для различных углов и периодов колебания основания. Кроме того, в работе впервые предлагалась схема для приближенного учета переменности глубины по длине водохранилища.

На той же конференции был представлен доклад М. Хатанака [101] в которой были собраны сводные рекомендации по определению сейсмического давления воды на гравитационные плотины, составленные на основе ряда теоретических, модельных и экспериментальных исследований.

Значимый вклад в изучение динамического давления жидкости на гидротехнические сооружения при сейсмическом воздействии внес Г.П. Мамрадзе рядом своих экспериментальных и теоретических исследований [52–54].

Следует отметить, что в работах многих авторов, выполненных в рамках статической теории сейсмостойкости и посвященных исследованию колебаний жестких конструкций в жидкости, было исследовано влияние многих факторов на величины и распределение гидродинамического давления жидкости: формы напорной грани и вмещающего бассейна (каньона), сжимаемости жидкости, наличия донных отложений, поверхностных волн и т.д. Результаты этих исследований, как будет показано ниже, используются и при расчетах по динамической теории.

Более подробно историко-научный процесс последовательного уточнения и усложнения расчетных аналитических методов для учета влияния жидкости при расчете связанных задач описан в известных монографиях С.Г. Шульмана [79; 80].

1.3 Обзор основных работ, посвященных численным методам исследования взаимодействия гидротехнического сооружения с основанием и водохранилищем в рамках динамической теории сейсмостойкости.

Между псевдостатическими методами расчета связанных задач, о которых говорилось выше и современными численными методами, которые будут освещены ниже, промежуточное место занимает подход, предложенный в статье Г. Фенвеса и А. Чопра [97], так называемый «метод эквивалентной горизонтальной нагрузки». В данном методе принимается во внимание влияние взаимодействия с основанием, так как оно рассматривается как нежесткое.

Метод присоединенной массы является, по сути, основополагающим при сейсмических расчетах бетонных плотин. Несмотря на видимую простоту, он довольно часто используется на практике, особенно в ситуациях, когда применение более совершенных методов численного моделирования связанной системы «плотина – водохранилище» сопряжено со значительным объемом вычислительной работы. Следует подчеркнуть, что подобный подход широко распространен в тех случаях, когда необходимо учитывать нелинейный характер контактного взаимодействия плотины с основанием или блоков бетонирования [85]. Специализированная «продвинутая» модель, использующая аппарат теории пластичности, была предложена в работе Ж. Ли и Г. Фенвеса [112], где нашел применение метод присоединенной массы, так как непосредственная аппроксимация области, занимаемой жидкостью, чревата значительными вычислительными затратами.

В работе Л.Н. Гродко [24] был сделан значительный шаг в изучении вопроса волнообразования на свободной поверхности идеальной несжимаемой жидкости, вызываемого гармонические колебания плотины с вертикальной напорной гранью. В дальнейшем эта тема получила развитие в работах И.С. Шейнина [78], который исследовал влияние поверхностных волн на величины присоединенных масс жидкости.

В работе Б. Чена [93] метод конечных разностей и метод конечных элементов (использовались изопараметрические четырехузловые

четырёхугольные конечные элементы) были применены при моделировании плотины Пайн-Флэт (Pine Flat Dam) для определения нелинейного гидродинамического давления на поверхность плотины и соответствующей динамической реакции сооружения. Следует отметить, что проводились различные варианты расчетов – с учетом и без учета поверхностных волн, с учетом и без учета конвективных ускорений и т.д. Следует отметить, что автор также изучал зависимости между коэффициентом гидродинамического воздействия, подъемом поверхности воды и временем движения земли.

В частности, были установлены следующие факты:

- гибкость плотины может существенно увеличивать коэффициент гидродинамического воздействия, особенно в тех случаях, когда горизонтальная и вертикальная составляющие ускорения земли возбуждаются одновременно;
- вибрация поверхности плотины и вертикальная составляющая ускорения земли не оказывают никакого влияния ни на величину, ни на форму профиля подъема поверхности воды у поверхности плотины;
- в задачах динамического расчета высоконапорной бетонной гравитационной плотины можно не учитывать поверхностные волны и нелинейные конвективные ускорения жидкости;
- исключительно актуальной задачей является разработка методов определения (оценки) уровня подъема поверхности воды.

В 1997 году в работе Ф. Гуана и И. Море [98] был предложен гибридный численный метод для решения задач расчета плотины из грунтовых материалов на многослойном основании. Предложенный метод не предполагал какой-либо аппроксимации жидкости, а для учета водохранилища была использована новая оригинальная техника определения присоединенных масс (зависящих от частоты) и нагрузок, обусловленных влиянием водохранилища на наклонную напорную грань. В упомянутой статье были представлены интересные численные результаты, иллюстрирующие моделирование связанных систем «сооружение – водохранилище» и «сооружение – основание» (в частности, применительно к

плотине La Villita, расположенной в Мексике, при задании акселерограммы землетрясения S90W El Centro (18 мая 1940 года)).

В работе Ш. Хоукуна [105] изучалось поведение арочной плотины при сейсмических воздействиях с учетом динамического взаимодействия плотины с основанием, на примере самой высокой (292 м) арочной плотины Сяовань (Xiawan) в Китае. В рамках проведенных авторами исследований изучалось распространение волны в неоднородной и локально нелинейной среде на основе явной схемы метода конечных элементов с пропускающими границами. Наиболее опасная зона сооружения располагалась на расстоянии 76 метров от пяты плотины, для исследования этой зоны была применена нелинейная модель Друкера-Прагера. Использовалась автоматически сгенерированная программой сетка из 1364 трехмерных восьмиузловых конечных элементов. В целях упрощения, взаимодействие плотины с водохранилищем моделировалось в рамках метода присоединенных масс. При проведении расчетов в качестве исходных данных (поперечные и продольные сейсмические волны) использовалась акселерограмма землетрясения и автershока в китайском городе Таншане (Tangshan) провинции Хэбэй, произошедшего 28 июля 1976 года с амплитудой, масштабированной до значения, составляющего половину от соответствующей проектной величины для рассматриваемого сооружения. В целях адекватного анализа и учета влияния указанной выше опасной зоны плотины рассматривались отдельно три расчетных случая: модель, не содержащая опасной зоны; модель, содержащая опасную зону с линейными свойствами; модель, содержащая опасную зону с нелинейными свойствами.

В реальных условиях дно водохранилища часто бывает покрыто слоем наносов, поглощающая способность которых весьма значительна, что было продемонстрировано в экспериментальных исследованиях Т. Хатано [102]. Вопросам учета поглощения энергии основанием водохранилища и донными наносами при расчете гидротехнических сооружений на сейсмическое воздействие посвящен целый ряд расчетных исследований [94; 109; 110; 125; 129].

В 2003 году в работе Ж. Нассерзара, Я. Ли и Ф. Зейглера [118] был продемонстрирован разработанный алгоритм определения частот и форм собственных и вынужденных колебаний арочно-гравитационной плотины в вакууме. Для учета гидродинамического давления был предложен весьма эффективный алгоритм. Его верификация осуществлялась посредством условной замены плотины некоторой достаточно простой конструкцией с известными в вакууме свойствами. Далее в качестве водоподпорного сооружения была рассмотрена тонкая прямоугольная пластина, шарнирно опертая по трем сторонам с одним свободным краем. Аппроксимация водохранилища производилась в рамках трехмерной линейной постановки, жидкость полагалась невязкой. Расчетный резонанс для изученных примеров сопоставлялся с соответствующими данными практических изысканий. Отдельно рассматривался эффект поглощения волны на дне и берегу водохранилища. Гидродинамическое давление водохранилища вычислялось с привлечением метода граничных элементов. Результаты решения обратной задачи были сопоставлены с соответствующими точными аналитическими решениями и были получены хорошие совпадения.

В статье [82] авторами исследовались контактные взаимодействия в рамках сейсмического расчета систем «плотина – водный массив», «плотина – скальное основание», «плотина – водный массив – скальное основание» в линейной и нелинейной постановках. При определении реакции плотины на гидродинамические воздействия со стороны водохранилища водный массив моделировался специализированными восьмиузловыми конечными элементами, реализующими подход Лагранжа. Численное решение уравнений движения осуществлялось методом шагового интегрирования. Динамическое воздействие задавалось акселерограммами соответствующими землетрясению в Эль-Центро (El-Centro; США, N – S, 1940 год). Анализ полученных в результате исследований результатов позволил сформулировать следующие выводы:

– гидродинамические воздействия оказывают существенное влияние на линейную и нелинейную реакции плотины при сейсмическом движении основания;

– метод шагового интегрирования может быть весьма эффективным как при линейных, так и при нелинейных сейсмических расчетах арочно-гравитационной плотины, причем водный массив может быть корректно аппроксимирован трехмерными восьмиузловыми конечными элементами, реализующими подход Лагранжа;

– одновременный учет гидродинамических воздействий и гибкости основания существенным образом увеличивает линейную и нелинейную реакции плотины при сейсмических расчетах;

– характер контактного взаимодействия плотины и водного массива в рамках линейной и нелинейной постановок практически одинаков для жесткого и гибкого (нежесткого) оснований;

– гидродинамические воздействия оказывают влияние на распределение максимальных растягивающих напряжений на напорной и низовой гранях плотины, причем это указанное влияние одинаково для жесткого и гибкого оснований;

– контактное взаимодействие плотины с водным массивом оказывает более сильное воздействие на реакцию плотины с гибким основанием, чем на реакцию плотины с жестким основанием, причем такая ситуация имеет место как в линейной, так и в нелинейной постановках;

В работе А. Байрактара, Хансера Эбру и М. Аккосе [88] на примере турецкой плотины Сарыйер (Sarıyar) изучалось влияние характеристик скального основания на стохастические динамические характеристики системы «плотина – водохранилище – основание» под действием сейсмических нагрузок в рамках подхода Лагранжа. В качестве исходного динамического воздействия использовались данные о землетрясении Сан-Фернандо в 1971 году. В рамках проведенных исследований использовались различные модели задания сейсмического воздействия: стандартная модель с жестким основанием, модель с безынерционным основанием и так называемая модель *deconvolved-base-rock* [89]. Жидкость полагалась невязкой, обеспечивалась непрерывность нормальных компонент перемещений точек на поверхностях контакта «плотина –

водохранилище» и «плотина – основание». Последнее достигалось посредством использования коротких и практически жестких в продольном направлении ферменных элементов по нормали к указанным поверхностям. Ввиду значительной протяженности водохранилища, необходимо было ограничить расчетную область на достаточно удаленном от плотины расстоянии. Так, для адекватного моделирования гидродинамического воздействия на плотину длина расчетной области должна быть в три раза больше глубины водохранилища. Глубина расположения основания принималась равной глубине водохранилища. Задача решалась в условиях плоской деформации, материал плотины полагался линейно упругим, однородным и изотропным. Коэффициент демпфирования всей системы принимался равным 5%. При проведении модального анализа в рамках подхода Лагранжа приходится иметь дело с колебаниями поверхности жидкости, изменением объема и вращательными частотами и корректный выбор форм имеет таким образом определяющее значение. Следует отметить, что количество форм, связанных с колебаниями поверхности жидкости, индивидуальное для каждой конечноэлементной модели водохранилища, становится весьма значительным даже для начального частотного диапазона. Вместе с тем, эти формы, по сути, не оказывают сколь-либо существенного влияния на поведение плотины. Авторы принимали во внимание первые 30 форм. По результатам проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

- максимальные значения перемещений, напряжений и гидродинамических давлений полученные при использовании модели *deconvolved-base-rock*, меньше тех, что получены в рамках остальных моделей;

- при использовании стандартной модели с жестким основанием значения интересующих величин получаются существенно завышенными;

- представляется, что стандартную модель с жестким основанием нецелесообразно (в силу некорректности) использовать для определения динамических характеристик системы «плотина – водохранилище – основание» под действием случайной нагрузки;

– несмотря на то, что модель с безынерционным основанием не позволяет получить столь же точные результаты как при использовании модели *deconvolved-base-rock*, ее, тем не менее, можно использовать в расчетной практике.

Здесь следует также упомянуть работу В. Лотфи [114] посвященную исследованию динамического НДС гравитационной плотины с учетом водохранилища в плоской постановке.

Исследование нелинейного динамического поведения арочной плотины при различных уровнях водохранилища представлено в работах М. Аккосе, А. Байрактара, М. Туна и А.А. Думаноглу [81; 82]. Для моделирования нелинейного поведения бетона плотины использовалась упругопластическая модель Друкера-Прагера. Вода принималась линейно упругой и невязкой. Для изучения влияния уровня воды в резервуаре на динамические характеристики арочной плотины последовательно проводились расчеты при различных уровнях наполнения водохранилища – 33%, 50%, 67%, 83% и 100 %. По результатам анализа было установлено, что уровень воды в водохранилище оказывает значительное влияние на характер динамического напряженно-деформированного состояния (НДС) арочной плотины в упругопластической постановке. Адекватные и вполне реалистичные результаты (напряжения) могут быть получены, в частности, при использовании модели Друкера-Прагера.

В 2009 году в статье [121] был представлен полуаналитический подход к расчету связанной системы «плотина – водохранилище», основанный на так называемых основных формах колебаний. Основная частота колебаний была определена посредством использования подхода обобщенных координат в сочетании с аналитическим решением волнового уравнения для упругой границы. Результирующим в итоге является частотное уравнение для связанной системы. После его решения было получено поле давлений в жидкости и определены соответствующие распределенные массы. В результате проведенных сопоставлений было выявлено хорошее соответствие конечноэлементного

решения для связанной системы и решения, найденного с использованием метода присоединенной массы.

В статье 2011 года «Влияние колебаний водохранилища на сейсмический отклик массивных бетонных арочных плотин с учетом нелинейности материала» [100] приведены результаты расчетных исследований системы «основание – плотина - водохранилище», где для материала плотины применялась нелинейная модель Виллама-Варнке. В работе приведена оценка влияния уровня водохранилища на напряжения на верховой и низовой гранях плотины и на раскрытие трещин. В результате подтверждено значительное влияние демпфирующих свойств массива жидкости на динамическое НДС сооружения и в частности на развитие трещин в бетоне.

Работе А. Беррабах [89] на примере арочной плотины Брезина (Brezina) в Алжире проводятся расчетные исследования влияния водохранилища и демпфирования основания на динамический отклик плотины. Автором было рассмотрено несколько вариантов учета жидкости и основания в расчетном комплексе ANSYS и получены рекомендации по расчетному динамическому анализу высоконапорных бетонных плотин.

Ращение связанной задачи «сооружение – жидкость» при сейсмическом воздействии и определение гидродинамического давления на напорную грань гравитационной плотины представлено в работе Х. Шариятмадара и А. Мираж [123]. Результаты многочисленных расчетов бетонной гравитационной плотины в двумерной постановке убедительно показали, что корректность и точность моделирования системы «плотина – водохранилище – основание» с учетом соответствующих контактных взаимодействий оказывает самое непосредственное влияние на периоды и формы собственных колебаний, а также на модальное распределение гидродинамических давлений.

Кроме работ, указанных выше, следует также отметить группу ученых, внесших значимый вклад в развитие методов расчета гидротехнических сооружений: Я.М. Айзенберг [1], Ю.Б. Мгалобелов [55], А.М. Белостоцкий, Акимов П.А. [3–10; 33; 33; 34; 34; 35; 35; 36; 58–62; 64; 119; 120], Гришин М.М.

[20; 23], С.Е. Лисичкин, А.В. Александров, О.Д. Рубин [63; 65–68], Седов Л.И. [71; 72], Бронштейн В.И. [16; 17], Савич, Л.Б. [70; 75], Ляпичев Ю.П., Грошев М.Е. [50; 51], Березин Е.Н. [11], Бирбраер А.Н. [12–15], Вовкушевский А.В. [18; 19], Григолюк Э.И. [21; 22], Елизарова Т.Г. [28], Каганов Г.М. [37], Козинец Г.Л. [41], Кауфман Б.Д. [38–40], Андрианова Е.А. [2], Ломбардо В.Н. [48; 49], Зарецкий Ю.К. [30; 31] и др.

Примеры расчетов сейсмостойкости конструкций гидротехнических сооружений различного назначения с использованием динамической и линейно-спектральной теорий, на основе действующих в России нормативных документов, подробно описаны в методическом пособии 2016 года [69].

Проведенный аналитический обзор научных работ по данной теме позволяет сделать вывод, что расчетное обоснование конструкций и сооружений (в частности гидротехнических), взаимодействующих с жидкостью представляет собой весьма сложную проблему моделирования.

1.4 Общие численные подходы к моделированию жидкости, контактирующей с твердым телом

На сегодняшний день сформировались и развиваются три основных направления численного решения задач гидроупругости:

1. постановка Эйлера [10; 95; 113], описывающая состояние жидкости в теоретически естественных узловых переменных (давление или потенциал скоростей), а сооружения и основания – через узловые перемещения;
2. постановка Лагранжа [83; 92; 99; 117; 126], с представлением и жидкости, и сооружения (с основанием) уравнениями в перемещениях.
3. произвольная постановка Лагранжа-Эйлера (постановка ALE) [90; 111; 115; 122; 124], которая сочетает в себе оба подхода. Данная постановка ориентирована на моделирование сложных течений, где отдельно лагранжевая и эйлерова постановки не могут быть использованы.

Постановка Эйлера основана на изучении параметров движения сплошной среды в каждой фиксированной точке пространства в различные моменты времени. Внимание наблюдателя фиксируется не на самих частицах среды, а на точках пространства, через которые они проходят. Таким образом, к системе координат привязаны не материальные точки (частицы), а характеристики течения среды (скорости, ускорения, давления и пр.). Данный метод широко применяется в практике для решения связанных задач с большими деформациями.

Эта постановка может применяться при решении задач, где основной интерес представляет прочность и надежность контактирующего с жидкостью достаточно жесткого сооружения, например, бетонной плотины.

В соответствии с *постановкой Лагранжа* в некоторый начальный момент времени каждая из отдельных частиц объема «отмечается» путем присвоения ей значений координат, а в дальнейшем прослеживается движение каждой частицы индивидуально – путем определения их траектории, т.е. координат относительно начальных значений (такие координаты называют координатами (переменными) Лагранжа). Вообще постановка Лагранжа удобна при изучении движения систем, у которых отдельные частицы связаны друг с другом (то есть расстояние между ними не изменяется или меняется по простым зависимостям). В этом случае достаточно рассмотреть движение малого количества частиц. Применяется такая постановка в том числе и при рассмотрении движений частиц жидкости на границах, например, при изучении волновых движений свободной поверхности жидкости.

В рамках подхода Лагранжа состояние жидкости и сооружения (с основанием) описывается уравнениями в перемещениях. Основное преимущество в данном случае – это возможность моделирования связанной гидроупругой системы в однородных неизвестных (перемещениях).

В произвольной постановке Лагранжа-Эйлера при моделировании поведения конструкций и сооружений традиционно используется постановка Лагранжа, а для жидкости – постановка Эйлера. Данный подход является более «продвинутым» и, в последнее время, получил широкое применение. Такой

подход зачастую применяется для решения задач о взаимодействии жидкости с полностью погруженными телами.

1.5 Современные программно-алгоритмические комплексы для численного моделирования динамического НДС связанных систем

В таблице 1.5.1. представлены наиболее продвинутые и популярные современные программных комплексов (ПК) для динамического расчета сложных связанных систем. Условно все имеющиеся программные продукты можно разделить на две неравнозначные группы: коммерческие ПК и исследовательские с открытым программным кодом. Среди коммерческих продуктов можно выделить универсальные программные комплексы, такие как ANSYS, Simulia ABAQUS и MD Nastran (мировые лидеры), и специализирующиеся на задачах контактного взаимодействия (Fluid-Structure Interaction (FSI)) ПК ADINA и COMSOL.

Таблица 1.5.1. Наиболее известные программные комплексы для решения задач динамики в связанных постановках

Специализированные коммерческие программные комплексы		Исследовательские (в том числе с открытым программным кодом)
ANSYS		OpenFOAM
LS-DYNA		OpenPALM
ABAQUS		CANT-SD
MD Nastran		CODE_ASTER
ADINA		Oomph-lib

Специализированные коммерческие программные комплексы	Исследовательские (в том числе с открытым программным кодом)
COMSOL 	ПК СТАДИО
Altair AcuSolve 	
SAP 2000 	
DIANA FEA 	
MrCCI 	

Все перечисленные в таблице 1.5.1. ПК имеют свои особенности, реализуют различные численные постановки и при использовании для конкретных типов задач требуют дополнительной настройки и верификации.

1.6 Выводы по главе 1

1. Проведено обзорно-аналитическое исследование постановок, численных методов и программных комплексов для расчетов гидротехнических сооружений при сейсмических воздействиях, в том числе рассмотрены:

- процесс последовательного уточнения и усложнения расчетных аналитических методов для учета влияния жидкости при расчете связанных систем;
- классические и современные методы расчета гидротехнических сооружений с учетом контактного взаимодействия с жидкостью;
- современные численные методы моделирования контактного взаимодействия сооружения и жидкости на примерах расчетов реальных сооружений;

- некоторые общие принципы моделирования взаимодействия сооружения и жидкости.

2. На основе выполненного аналитического обзора существующих подходов к расчетам гидротехнических сооружений с учетом жидкости обосновывается необходимость развития методики уточненного динамического анализа трехмерных систем «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» и ставятся следующие задачи настоящего диссертационного исследования:

- реализация методики уточненного динамического анализа трехмерных систем «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» на базе современного программного комплекса;
- верификация и «настройка» параметров предложенной методики на ряде тестовых задач, имеющих аналитическое, экспериментальное или альтернативное численное подтверждение;
- апробация реализованной методики на реальном гидротехническом сооружении с предоставлением результатов и рекомендаций по расчету подобных объектов.

Главы 2-4 диссертационного исследования посвящены описанию решения поставленных задач.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА УТОЧНЕННОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО НДС ТРЕХМЕРНЫХ СИСТЕМ «СООРУЖЕНИЕ - ЖИДКОСТЬ» ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

2.1 Общие положения

В настоящей главе приведено описание предложенной методики уточненного численного моделирования динамического НДС трехмерной система «грунтовое основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» при сейсмических воздействиях. Общая структурная схема диссертационных исследований представлена на рисунке 2.1.1.



Рисунок 2.1.1. – Общая структурная схема диссертационных исследований

В нижеследующих параграфах настоящей главы представлены основные положения разработанной методики. Описаны основные уравнения, описывающие поведения сооружения и жидкости, виды динамического анализа и возможности реализующего методику программного комплекса. В конце главы также приведены данные о собственных программных разработках автора.

2.2 Основные уравнения поведения сооружения и жидкости

2.2.1. Уравнения поведения сооружения

Лагранжевы уравнения движения для сооружения имеют вид:

$$\rho \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \tau + \bar{f}^B \quad (2.2.1)$$

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

Уравнения (2.1) могут быть линейными или нелинейными, в зависимости от применяемых определяющих соотношений для материала и характера перемещений сооружения (большие или малые) [86; 87].

Соответствующие граничные условия могут быть записаны следующим образом:

$$\bar{u} = \bar{u}_s \text{ на части границы } S_u; \quad (2.2.2)$$

$$\tau \bar{n} = \bar{f}_s \text{ на части границы } S_f, \quad (2.2.3)$$

где S_u и S_f – части границы, на которых соответственно заданы перемещения \bar{u}_s и усилия \bar{f}_s ; \bar{n} – единичный вектор внешней нормали к границе.

2.2.2. Уравнения поведения жидкости в терминах давления (постановка Эйлера)

Для вывода определяющего волнового уравнения в массиве акустической жидкости применяют следующие допущения:

- безвихревой характер движения частиц акустической среды;
- акустическая жидкость сжимаемая (за счет изменения давления меняется плотность среды);
- отсутствие среднего потока акустической жидкости.

Для идеальной сжимаемой акустической жидкости, так называемое уравнение состояния имеет вид:

$$P = P(\rho), \quad (2.2.4)$$

где $P = P(x, y, z, t)$ - давление в акустической жидкости, ρ – плотность. Кроме уравнения состояния в систему уравнений, описывающих поведение идеальной акустической жидкости, входят уравнения движения Навье-Стокса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v_x}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_x)}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + R_x + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + T_x; \end{aligned} \quad (2.2.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v_y}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_y)}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + R_y + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) + T_y; \end{aligned} \quad (2.2.6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v_z}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_z)}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + R_z + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + T_z, \end{aligned} \quad (2.2.7)$$

где g_x, g_y, g_z – проекции ускорения в глобальной системе координат, μ_e – эффективная акустической жидкости вязкость; R_x, R_y, R_z – распределенные сопротивления; T_x, T_y, T_z – члены, обусловленные потерями на внутреннее трение (диссипацию).

Также в описании движения акустической жидкости участвует уравнение неразрывности потока:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0, \quad ($$

где V_x, V_y, V_z , – проекции вектора скорости в декартовой системе координат, t – время, ρ – плотность.

Исходя из допущений об акустической жидкости, перечисленных в начале раздела, и используя известные преобразования из уравнений (2.2.4 – 2.2.8) получаем волновое уравнение распространения звука в акустической жидкости:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) - \frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left[\frac{4\mu}{3\rho_0} \nabla \left(\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t} \right) \right] = - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q}{\rho_0} \right) + \nabla \cdot \left[\frac{4\mu}{3\rho_0} \nabla \left(\frac{Q}{\rho_0} \right) \right], \quad (2.2.9)$$

где $c = \sqrt{k/\rho_0}$ – скорость распространения звука в акустической жидкости, k – объемный модуль упругости жидкости, ρ_0 – средняя плотность акустической жидкости, μ – динамическая вязкость; p – акустическое давление; Q – массовый член; $\nabla \cdot$ – оператор дивергенции.

Для давления, изменяющегося по гармоническому закону определяется как:

$$P = \bar{P} e^{i\omega t}, \quad (2.2.10)$$

где \bar{P} – амплитуда давления, $i = \sqrt{-1}$ – комплексное число (мнимая единица), $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, f – частота колебаний давления. Тогда уравнение (2.2.10) приобретает вид уравнения Гельмгольца:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) + \frac{\omega^2}{\rho_0 c^2} p + i\omega \nabla \cdot \left[\frac{4\mu}{3\rho_0} \nabla \left(\frac{1}{\rho_0 c^2} p \right) \right] = -i\omega \left(\frac{Q}{\rho_0} \right) + \nabla \cdot \left[\frac{4\mu}{3\rho_0} \nabla \left(\frac{Q}{\rho_0} \right) \right], \quad (2.2.11)$$

Уравнения поведения жидкости в терминах перемещений (постановка Лагранжа) подробно описаны в работе [60].

2.3 Численная аппроксимация связанных задач

2.3.1. Конечноэлементная аппроксимация уравнений поведения сооружения

Для численной реализации описанных выше задач применяется широко известный, универсальный метод конечных элементов (МКЭ). Общее уравнение

движения (в форме метода перемещений) линейной системы с малыми перемещениями и деформациями в матричном виде будет иметь вид:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\} + [C]\{\dot{u}(t)\} + [K]\{u(t)\} = \{F(t)\}, \quad (2.3.1)$$

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.

Назначением матрицы демпфирования $[C]$ является аппроксимацией диссипации энергии системы, на практике матрица $[C]$ задается постоянной, строится путем задания величин демпфирования на различных модах или аппроксимируется через матрицы $[M]$ и $[K]$ (по Релею).

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K], \quad (2.3.2)$$

где α и β коэффициенты демпфирования Релея, соответствующие инерционному и конструкционному демпфированию.

Частными случаями решения общего уравнения движения (2.3.1) являются задачи динамики, которая занимается изучением поведения конструкции под действием меняющихся во времени нагрузок (в том числе сейсмических).

Существует три вида динамического анализа (рисунок 2.3.1.):

- модальный анализ;
- динамический анализ переходных процессов;
- гармонический анализ.

В рамках диссертационного исследования в основном проводились расчеты на собственные значения (модальный анализ) и прямые динамические расчеты с интегрированием по времени (анализ переходных процессов). Поэтому ниже приведено краткое описание этих видов динамического анализа.

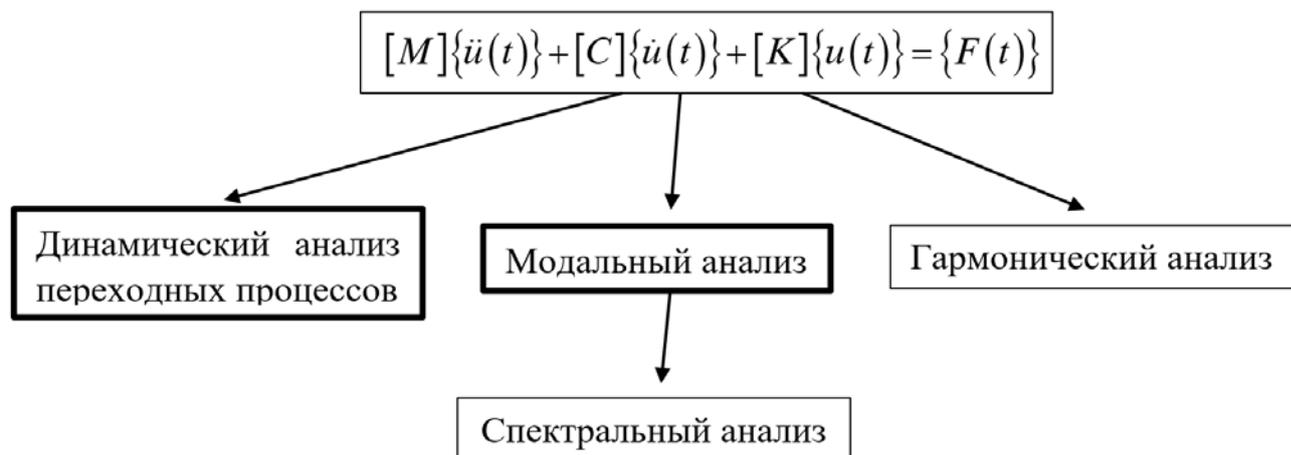


Рисунок 2.3.1. – Основные виды динамического анализа (в общем виде)

2.3.1.1. Модельный анализ

Модальный анализ проводится для определения частот и форм (мод) собственных колебаний объекта и часто является первым этапом для других видов динамического анализа. В данном виде анализа любые виды нелинейности (физические и геометрические) игнорируются и предполагается, что внешние силы и демпфирование равно нулю. Уравнение собственных колебаний в матричном виде будет иметь вид:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\}, \quad (2.3.3)$$

Для линейной системы собственные колебания являются гармоническими и могут быть записаны в виде:

$$\{u\} = \{\varphi\}_i \cdot \cos \omega_i t, \quad (2.3.4)$$

где $\{\varphi\}_i$ – собственный вектор, представляющий форму (моду) колебаний,

ω_i – собственная круговая частота колебаний (рад/с); t – время.

Подставляя (2.3.4) в (2.3.3), получим:

$$(-\omega_i^2 \cdot [M] + [K]) \cdot \{\varphi\}_i = \{0\}, \quad (2.3.5)$$

Данное равенство удовлетворяется, если $\{\varphi\}_i = \{0\}$ или определитель матрицы $(-\omega_i^2 \cdot [M] + [K]) = \{0\}$ равен нулю, для существования нетривиальных решений $\{\varphi\}_i \neq \{0\}$.

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi}, \quad (2.3.6)$$

Для решения проблемы собственных значений системы применяют итеративный подпространственный метод, прямой блочный метод Ланцоша, редуцированный метод Хаусхолдера, метод Ланцоша с предобуславливанием (PCG), метод для несимметричных матриц и др. Для систем большой размерности доказано преимущество прямого блочного метода Ланцоша.

2.3.1.2. Динамический анализ переходных процессов

Динамический анализ переходных процессов используется для получения отклика системы на воздействие меняющейся во времени, или нестационарной, вынуждающей нагрузки. Данный тип анализа не предполагает ни каких ограничений, в нем доступны все виды нелинейностей

Общее уравнение движения (2.3.1) в динамическом анализе переходных процессов можно записать в общем виде:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\}, \quad (2.3.7)$$

В рассматриваемом виде анализа используется схема прямого интегрирования по времени для нахождения неизвестных перемещений используются такие методы, как полный метод, редуцированный метод и метод суперпозиции.

Схема прямого интегрирования по времени, которая используется в динамическом анализе переходных процессов, является неявной и безусловно устойчивой (при линейном анализе) и базируется на методе Ньюмарка.

Неявность схем интегрирования заключается в том, что вектор перемещения $\{u\}$ является функцией как предыдущих (известных), так и текущих (неизвестных) перемещений, скоростей и ускорений.

Термин безусловно устойчивый означает, что независимо от шага интегрирования по времени Δt решение линейной системы является сходящимся. Величина Δt определяется как разница между двумя последовательными моментами времени:

$$\Delta t = t_n - t_{n-1} \quad (2.3.8)$$

С помощью схемы Ньюмарка уравнение движения (2.3.7) приобретает следующий вид:

$$\begin{aligned} (a_0 [M] + a_1 [C] + [K]) \{u_t\} = & \{F(t)\} + \\ + [M] (a_0 \{u_t - \Delta t\} + a_2 \{\dot{u}_t - \Delta t\} + a_3 \{\ddot{u}_t - \Delta t\}) + & \\ + [C] (a_1 \{u_t - \Delta t\} + a_4 \{\dot{u}_t - \Delta t\} + a_5 \{\ddot{u}_t - \Delta t\}) & \end{aligned} \quad (2.3.9)$$

где a_0, \dots, a_5 – постоянные интегрирования, являющиеся функциями параметров γ и Δt (γ – числовая погрешность).

Если присутствуют нелинейности, то уравнение может быть решено итеративным способом за один шаг по времени при произвольном числе равновесных итераций:

$$\begin{aligned} (a_0 [M] + a_1 [C] + [K^i_t]) \{u^{i+1}_t\} = & \{F_t\} - \{F^{nr,i}_t\} + \\ + [M] (a_0 \{u_t - \Delta t\} - \{u^i_t\} + a_2 \{\dot{u}_t - \Delta t\} + a_3 \{\ddot{u}_t - \Delta t\}) & \\ + [C] (a_1 \{u_t - \Delta t\} - \{u^i_t\} + a_4 \{\dot{u}_t - \Delta t\} + a_5 \{\ddot{u}_t - \Delta t\}) & \end{aligned} \quad (2.3.10)$$

Критерий сходимости в динамическом анализе переходных процессов идентичен критерию, используемому в статическом анализе.

2.3.2. Конечноэлементная аппроксимация уравнений поведения жидкости

Из волнового уравнения распространения звука в акустической жидкости (2.2.9) с помощью процедур метода Гадеркина [130] можно получить следующую конечноэлементную постановку:

$$\begin{aligned} \iint_{\Omega_F} \frac{1}{\rho_0 c^2} w \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} dv + \iiint_{\Omega_F} \nabla w \cdot \left(\frac{4\mu}{3\rho_0^2 c^2} \nabla \frac{\partial p}{\partial t} \right) dv + \iiint_{\Omega_F} \nabla w \cdot \left(\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) dv - \\ \oint_{\Gamma_F} w \left(\frac{1}{\rho_0} + \frac{4\mu}{3\rho_0^2 c^2} \frac{\partial}{\partial t} \right) \hat{n} \nabla p ds + \oint_{\Gamma_F} w \frac{4\mu}{3\rho_0^2} \hat{n} \nabla Q ds = \iiint_{\Omega_F} w \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial Q}{\partial t} dv + \iiint_{\Omega_F} \nabla w \cdot \left(\frac{4\mu}{3\rho_0^2} \nabla Q \right) dv, \end{aligned} \quad (2.3.11)$$

где dv – дифференциальный элемент акустического объема Ω_F , ds – дифференциал на поверхности Γ_F ; \hat{n} – вектор внешней нормали.

Из уравнения сохранения импульса нормальная скорость на границе акустической области определяется как:

$$\frac{\partial v_{n,F}}{\partial t} = \hat{n} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = - \left(\frac{1}{\rho_0} + \frac{4\mu}{3\rho_0^2 c^2} \frac{\partial}{\partial t} \right) \hat{n} \nabla p + \frac{4\mu}{3\rho_0^2} \hat{n} \nabla Q, \quad (2.3.12)$$

Пусть \bar{v}_F – вектор скорости частицы акустической жидкости:

$$\frac{\partial v_{n,F}}{\partial t} = \hat{n} \frac{\partial^2 \bar{u}_F}{\partial t^2}, \quad (2.3.13)$$

Подставляя (2.3.12) в (2.3.11) получаем следующую формулировку:

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega_F} \frac{1}{\rho_0 c^2} w \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} dv + \iiint_{\Omega_F} \nabla w \cdot \left(\frac{4\mu}{3\rho_0^2 c^2} \nabla \frac{\partial p}{\partial t} \right) dv + \iiint_{\Omega_F} \nabla w \cdot \left(\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) dv + \\ + \oint_{\Gamma_F} w \hat{n} \frac{\partial^2 \bar{u}_F}{\partial t^2} ds = \iiint_{\Omega_F} w \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial Q}{\partial t} dv + \iiint_{\Omega_F} \nabla w \cdot \left(\frac{4\mu}{3\rho_0^2} \nabla Q \right) dv \end{aligned} \quad (2.3.14)$$

Соответствующие выражения для аппроксимации узловых неизвестных в пределах конечного элемента через функции формы имеют вид:

$$\begin{aligned} \bar{p} &= N_p^T \bar{P}_e; \\ \bar{u} &= N_u^T \bar{u}_e, \end{aligned} \quad (2.3.15)$$

где N_p – функция формы конечного элемента для давлений; N_u – функция формы конечного элемента для перемещений; \bar{P}_e – вектор узловых значений

давлений (элементный); \bar{u}_e – вектор узловых значений перемещений (элементный) с компонентами u_{xe}, u_{ye}, u_{ze} .

На основании (2.3.15) имеем соответствующие выражения для вторых производных по времени и виртуального приращения давления:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial t^2} &= N_p^T \ddot{\bar{p}}_e; & \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2} &= N_u^T \ddot{\bar{u}}_e; \\ \delta \bar{p} &= N_p^T \delta \bar{p}_e. \end{aligned} \quad (2.3.16)$$

Подставив (2.3.15) в (2.3.14) можем переписать (2.3.12) в виде:

$$\begin{aligned} &\left(\iiint_{\Omega_F} \frac{1}{\rho_0 c^2} N_p N_p^T dv \right) \ddot{\bar{p}}_e + \left(\iiint_{\Omega_F} \frac{4\mu}{3\rho_0^2 c^2} (\nabla N_p)^T (\nabla N_p) dv \right) \ddot{\bar{p}}_e + \\ &+ \left(\iiint_{\Omega_F} \frac{1}{\rho_0} (\nabla N_p)^T (\nabla N_p) dv \right) \ddot{\bar{p}}_e + \left(\oint_{\Gamma_F} N_p \bar{n}^T N_u^T ds \right) \ddot{\bar{u}}_{e,F} = \left(\iiint_{\Omega_F} \frac{1}{\rho_0} N_p N_p^T dv \right) \ddot{\bar{q}} + \\ &+ \left(\iiint_{\Omega_F} \frac{4\mu}{3\rho_0^2} (\nabla N_p)^T (\nabla N_p) dv \right) \ddot{\bar{q}}, \end{aligned} \quad (2.3.17)$$

где \bar{n} – вектор внешней нормали на границе жидкости; $\ddot{\bar{q}}$ и $\ddot{\bar{q}}$ – вектор узловых массовых членов и соответствующая первая производная по времени.

Матричное представление (2.3.17) уравнения следующее:

$$M_F \ddot{\bar{p}}_e + C_F \ddot{\bar{p}}_e + K_F \bar{p}_e + \bar{\rho}_0 R^T \ddot{\bar{u}}_{e,F} = \bar{f}_F, \quad (2.3.18)$$

$$\text{где } M_F = \bar{\rho}_0 \iiint_{\Omega_F} \frac{1}{\rho_0 c^2} N_p N_p^T dv; \quad C_F = \bar{\rho}_0 \iiint_{\Omega_F} \frac{4\mu}{3\rho_0^2 c^2} (\nabla N_p)^T (\nabla N_p) dv; \quad (2.3.19)$$

$$K_F = \bar{\rho}_0 \iiint_{\Omega_F} \frac{1}{\rho_0} (\nabla N_p)^T (\nabla N_p) dv; \quad R^T = \oint_{\Gamma_F} N_p \bar{n}^T N_u^T ds; \quad (2.3.20)$$

$$\bar{f}_F = \bar{\rho}_0 \left(\iiint_{\Omega_F} \frac{1}{\rho_0} N_p N_p^T dv \right) \ddot{\bar{q}} + \bar{\rho}_0 \left(\iiint_{\Omega_F} \frac{4\mu}{3\rho_0^2} (\nabla N_p)^T (\nabla N_p) dv \right) \ddot{\bar{q}}; \quad (2.3.21)$$

M_F – матрица масс для акустической жидкости; C_F – матрица демпфирования для акустической жидкости; K_F – матрица жесткости для акустической жидкости; R^T – граничных условий для акустической жидкости; \bar{f}_F

– вектор нагрузок для акустической жидкости.

На границе между жидкостью и твердым телом задаются условия:

$$\overline{\overline{\sigma}}(\overline{u}_s)\overline{n} + p\overline{n} = 0; \quad \overline{n} \cdot \overline{u}_s - \overline{n} \cdot \overline{u}_F = 0, \quad (2.3)$$

где $\overline{\overline{\sigma}}(\overline{u}_s)$ – вектор напряжений для твердого тела; p – акустическое давление; \overline{u}_s – перемещения в твердом теле; \overline{u}_F – перемещения в акустической жидкости; \overline{n} – вектор внешней нормали для области, занимаемой жидкостью; второе условие фактически отражает отсутствие трения между средами.

Для адекватного описания взаимодействия жидкости с твердым телом в правую часть уравнения движения твердого тела добавляется давление жидкости, действующее на границе. Тогда уравнение движения твердого тела записывается следующим образом:

$$M_S \overline{\ddot{u}}_e + C_S \overline{\dot{u}}_e + K_S \overline{u}_e - R \overline{p}_e = \overline{f}_S, \quad (2.3)$$

где M_S , C_S , K_S – соответственно матрицы масс демпфирования и жесткости для твердого тела; \overline{f}_F – вектор нагрузок для твердого тела.

Итак, конечноэлементная формулировка решения связанной задачи «твердое тело – акустическая жидкость» имеет вид:

$$\begin{bmatrix} M_S & 0 \\ \overline{\rho}_0 R^T & M_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\ddot{u}}_e \\ \overline{\ddot{p}}_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_S & 0 \\ 0 & C_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{\dot{u}}_e \\ \overline{\dot{p}}_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_S & -R \\ 0 & K_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{u}_e \\ \overline{p}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{f}_S \\ \overline{f}_F \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

В результате решения (2.3.24) определяются значения перемещений в конструкции и давления в акустической жидкости. Для модального анализа могут использоваться процедуры симметризации уравнения (2.3.24) [57].

2.4 Программная реализация разработанной методики

2.4.1. Реализующий базовый программный комплекс

Основные расчетные исследования, верификация и апробация разработанной методики проводились на базе Научно-исследовательского центра СтаДиО с использованием базового лицензионного универсального

программного комплекса (ПК) ANSYS Mechanical. В выбранном базовом ПК программно реализована численная методика решения динамических задач сейсмостойкости в связанной постановке. С использованием внутреннего языка программирования APDL проведена оптимизация и параметризация многовариантных расчетных исследований.

Универсальный программный комплекс ANSYS весьма широко распространен в мире (в последние 15 лет – и в России) и имеет более миллиона легальных пользователей. Пакет сертифицирован по основным зарубежным стандартам (ISO-9001, ISO 9000-3, British standard BS 5750, Lloyd's Register's software certification, NAFEMS QA certification и многим другим). Имеется сертификат Госатомнадзора России (Регистрационный номер ПС в ЦОЭП при РНЦ КИ № 490 от 10.09.2002г., регистрационный номер паспорта аттестации ПС № 145 от 31.10.2002г.).

В 2010 г. ПК ANSYS Mechanical верифицирован согласно требованиям Российской академии архитектуры и строительных наук [29] (свидетельство РААСН №02/ANSYS/2010).

Универсальный ПК ANSYS позволяет решать инженерные и наукоемкие линейные и нелинейные, стационарные и нестационарные пространственные задачи механики деформируемого твёрдого тела (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач акустики, механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, а также механики связанных полей.

Структурно ПК ANSYS Mechanical состоит из трех основных модулей:

- препроцессор ANSYS-Pre (создание геометрической и конечноэлементной моделей, задание физических параметров материалов, определение граничных и начальных условий, нагрузок и др.);
- решатель (солвер) ANSYS-Solver (задание типа расчета и определение физического времени счета и шага по времени, задание

параметров расчета, выбор численных схем, определение количества итераций на шаге по времени и проведение расчета др.);

- постпроцессора ANSYS-Post (визуализация результатов в виде изображений, видео, графиков и таблиц).

Программный комплекс ANSYS Mechanical содержит представительную библиотеку конечных элементов. Используемые в данной работе конечные элементы описаны следующих подразделах.

Программный комплекс ANSYS Mechanical имеет широкие возможности «допрограммирования» на внутреннем языке APDL, что позволяет с помощью специальных программ (макросов) автоматизировать и параметризовать многовариантные расчетные исследования конечноэлементных моделей.

2.4.2 Используемые конечные элементы для моделирования поведения жидкости в эйлеровой постановке

Для моделирования жидкости в акустическом приближении (постановка Эйлера) в программном комплексе ANSYS Mechanical предусмотрено семейство конечных элементов:

- плоский (2D) элемент FLUID29 (3х или 4х узловой) и применяемый с ним элемент FLUID129, для моделирования неотражающей границы;
- объемные (3D) 8ми или 6ти узловой элемент FLUID30;
- объемные (3D) элементы более высокого порядка 20ти узловые FLUID220 и 10ти узловые FLUID221.

У всего семейства акустических элементов в качестве узловых степеней свободы используется давление, для элементов, контактирующих с другой средой (сооружением), в узловые степени свободы добавляются линейные перемещения. В данной диссертационной работе основные расчетные исследования проводились с использованием конечного элемента FLUID30.

Для данного элемента применяется изотропный материал со следующими обязательными характеристиками: плотность (DENS), скорость звука в жидкости (SONIC) и динамическая вязкость (VISC).

2.4.2.1 Обеспечение контакта акустическая жидкость – твердое тело

Для обеспечения связи уравнений движения твердого тела (сооружения, основания) и уравнений колебания акустической жидкости на поверхности контакта используются специальные изопараметрические контактные элементы сирендипова семейства (это те же элементы FLUID30 с включенной опцией Fluid Structure Interaction). Узлы контактного элемента геометрически попарно совпадают и образуют два слоя. Узлы первого слоя имеют по три степени свободы, соответствующие поступательным перемещениям по направлениям осей глобальной декартовой системы координат, а узлы второго – по одной степени свободы, соответствующей давлению в жидкости. Элементы жидкости и элементы сооружения на контакте должны иметь общие узлы.

2.4.2.2 Учет свободной поверхности жидкости

В некоторых случаях в акустической жидкости можно отобразить форму свободной поверхности (при небольших перемещениях), для этого на узлы свободной поверхности накладывались условия FREE, при этом она должна находиться в плоскости с координатой $z = 0,0$.

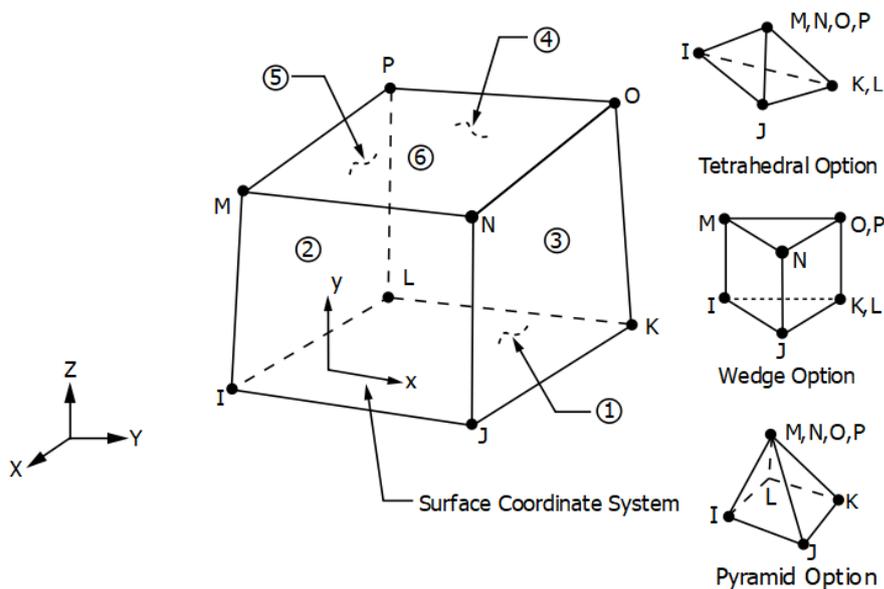


Рисунок 2.4.1. – Конечный элемент акустической жидкости FLUID30

При модальном анализе в настройках конечного элемента FLUID30 устанавливается опция Present for modal. В этом случае элементы имеют несимметричную элементную матрицу.

2.4.3 Используемые конечные элементы для моделирования поведения жидкости в лагранжевой постановке

Для моделирования жидкости с возможностью учета поверхностных гравитационных волн (постановка Лагранжа) в программном комплексе ANSYS Mechanical предусмотрено семейство конечных элементов:

- плоский (2D) 4х узловой элемент FLUID79;
- объемный (3D) 8ми узловой элемент FLUID80;
- специализированный объемный 2х узловой элемент FLUID116, для моделирования жидкости протекающей в трубах.

У элементов этого семейства в качестве узловых степеней свободы используются линейные перемещения. В данной диссертационной работе основные расчетные исследования проводились с использованием конечного элемента FLUID80.

FLUID80 – объемный 8ми конечный элемент, имеющий форму гексаэдра. Форма призмы или тетраэдра у элементов данного класса не предусмотрена (в отличие от объемных КЭ механики деформируемого твердого тела класса SOLID), что значительно ограничивает их применимость в задачах со сложными объемами.

Этот КЭ является модификацией объемного элемента SOLID45 с нулевой сдвиговой жесткостью. Все узлы элемента имеют по три степени: линейные перемещения в направлении x , y , z в узловой системе координат [84]. Геометрия элемента, расположение узлов и система координат показаны на рисунке 2.4.2.

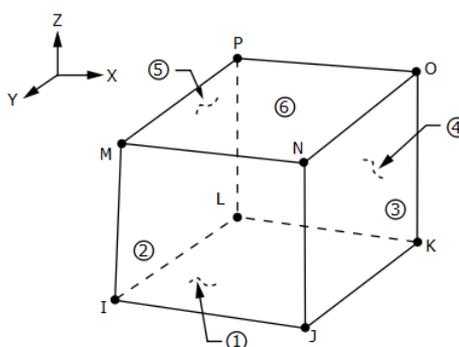


Рисунок 2.4.2. – Конечный элемент FLUID80

Для данного элемента применяется изотропный материал со следующими

обязательными характеристиками: плотность (DENS), объемный модуль упругости (EX) и динамическая вязкость жидкости (VISC), которая используется для вычисления матрицы демпфирования в динамическом анализе.

2.4.3.1 Учет свободной поверхности жидкости

Форма свободной поверхности жидкости вычисляется с использованием специальных элементов – аналогов «пружин». Принцип их работы можно продемонстрировать на примере соединяющихся сосудов с жидкостью (рисунок 2.4.3).

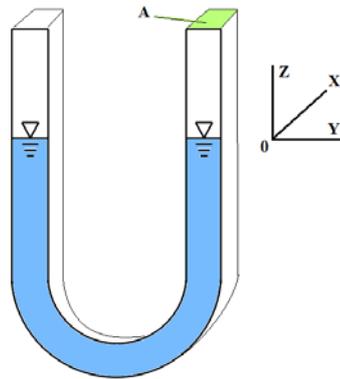


Рисунок 2.4.3. Соединяющиеся сосуды с жидкостью

Если из левого сосуда (рисунок 2.4.3.) столб жидкости выдавить вниз на глубину перемещенная масса жидкости будет равна:

$$M_D = \Delta h A \rho \quad (2.4.1)$$

где:

Δh – величина смещения;

A – площадь сечения соединяющихся сосудов;

ρ – плотность жидкости.

Тогда сила, необходимая для удержания жидкости на месте, будет равна:

$$F_D = M_D g \quad (2.4.2)$$

И, наконец, жесткость условной «пружины» на свободной поверхности жидкости для удержания ее в начальном положении будет равна силе F_D , деленной на глубину Δh , или:

$$K_s = \frac{F_D}{\Delta h} = \rho A g \quad (2.4.3)$$

Уравнение (2.4.3) можно записать следующим образом:

$$K_s = \rho A_F (g_x C_x + g_y C_y + g_z C_z) \quad (2.4.4)$$

где:

A_F – площадь поверхности (свободной) элемента;

$C_{x,y,z}$ – компонента нормали к поверхности жидкости.

Характерной особенностью данного типа конечных элементов является то, что свободная поверхность жидкости должна находиться в плоскости с координатой $z = 0,0$. Это, в свою очередь, накладывает определенные ограничения на использование данного элемента в задачах, где имеется два и более массивов жидкости на разных отметках, например, верхний и нижний бьеф гидроузла (рисунок 2.4.4.).

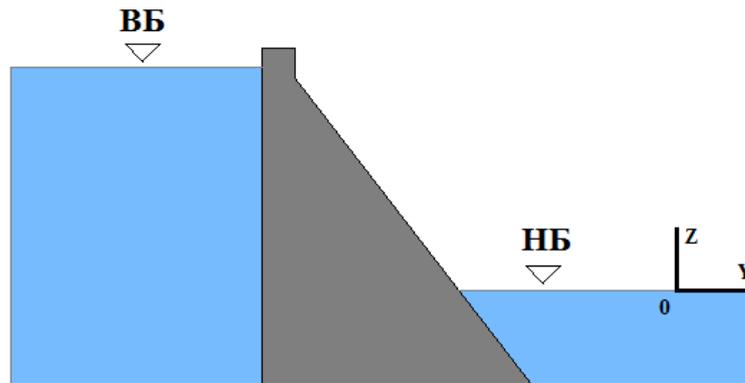


Рисунок 2.4.4. – Пример задачи с двумя свободными поверхностями жидкости на разных отметках

2.4.3.2 Особенности статического расчета

Наличие пружинного эффекта на свободной поверхности жидкости, как правило, отклоняет значения статических перемещений элементов жидкости от их истинных значений. Динамические перемещения не наследуют этого паразитического численного эффекта.

Из определения объемного модуля перемещения можно представить в виде:

$$u_s = \int_0^H \frac{P}{K} dz \quad (2.4.5)$$

где:

u_s – вертикальные перемещения статического столба жидкости;

H – высота столба жидкости;

P – давление в жидкости;

K – объемный модуль упругости;

z – расстояние до свободной поверхности жидкости.

Давление в массиве жидкости, как правило, определяется следующим образом:

$$P = \rho g z \quad (2.5.6)$$

Но значение давления снижается при наличии поверхностных пружин, так что:

$$P = \rho g z - K_s u_s = \rho g (z - u_s) \quad (2.5.7)$$

Объединив уравнения (2.4.5) (2.5.7) и проинтегрировав, получим:

$$u_s = \frac{1}{1 + \frac{H\rho g}{K}} \frac{\rho g}{2} \frac{H^2}{2} \quad (2.5.8)$$

Если бы не было никаких поверхностных пружин, то (2.5.8) было записано:

$$u_s = \frac{\rho g}{K} \frac{H^2}{2} \quad (2.5.9)$$

Таким образом, ошибкой для статического расчета является отклонение от 1,0 первого члена уравнения (2.5.8) ($1/(1+H\rho g/K)$), которое обычно весьма мало. Однако при использовании конечных элементов с трапецеидальной формой в сечении (рисунок 2.4.5. б), в массиве жидкости при статическом расчете возникают значительные паразитические перемещения, которые следует рассматривать, как неэнергетические вихревые токи. Следует отметить, что наличие данной особенности может запутать пользователя [26].

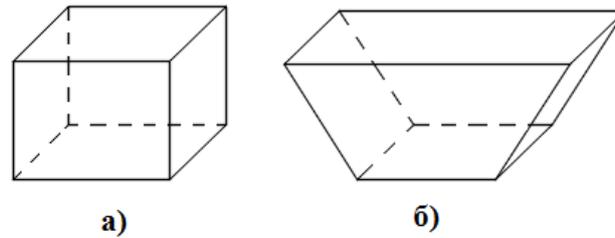


Рисунок 2.4.5. – Форма КЭ FLUID80.

а) прямоугольная форма, б) произвольная форма

2.4.3.3 Особенности задания контакта

Для задания контакта жидкости и сооружения (основания) они не должны иметь общих узлов, но координаты узлов на контактных поверхностях могут (и это весьма желательно) совпадать. Это необходимо для объединения узловых перемещений в направлении, перпендикулярном плоскости контакта, что обеспечивает возможность перемещения (скольжения) элементов жидкости по контактной поверхности. Объединение нормальных перемещений в узлах производится с помощью команды CPINTF, которая позволяет объединять узловые степени свободы даже у несовпадающих узлов.

Объединять необходимо только перемещения, перпендикулярные плоскости контакта, что требует в ряде случаев разворота узловой системы координат и значительно усложняет процесс моделирования. В случае, если контактная поверхность имеет криволинейную форму, разворот узловых систем координат на данной поверхности нужно проводить крайне тщательно, т.к. результаты могут приобретать неадекватные значения в случае, если объединяемые узловые перемещения не перпендикулярны плоскости контакта.

2.4.4 Используемые конечные элементы для учета жидкости присоединенными массами

Для учета жидкости присоединенными массами в программном комплексе ANSYS Mechanical предусмотрены конечные элементы типа MASS21.

КЭ MASS21 представляет собой элемент точки, имеющий до шести степеней свободы: линейные перемещения вдоль осей X, Y и Z узловой системы

координат и повороты вокруг осей. Каждому направлению системы координат могут быть присвоены различные значения масс и момент инерции.

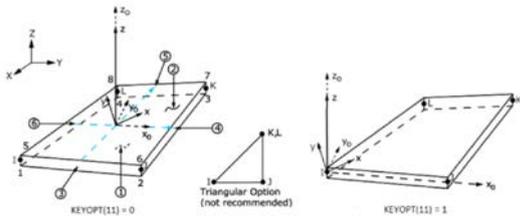
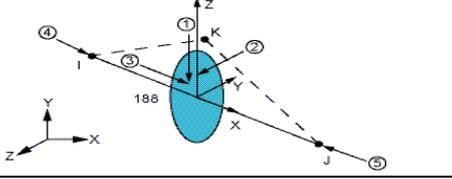
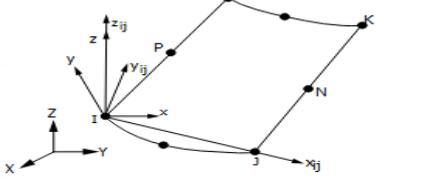
Иным элементом с возможностью полного описания масс (с недиагональными членами) является элемент MATRIX27, но в данном диссертационном исследовании он не использовался.

2.4.5 Используемые конечные элементы для моделирования твердого тела (сооружения, основания)

Для моделирования зданий, сооружений и массивов основания в программном комплексе ANSYS Mechanical имеется обширная библиотека конечных элементов.

Конечные элементы, используемые в расчетных исследованиях данной диссертационной работы, перечислены в таблице 2.5.1.

Таблица 2.5.1. Конечные элементы, применяемые для моделирования твердого тела (сооружений, основания)

№ n/n	Тип элемента	Описание элемента	Схема
1	SHELL181 (SHELL43)	3-х или 4-х узловой оболочечный элемент, реализующий теорию Миндлина-Рейсснера	
2	BEAM188 (BEAM44)	2-х узловой пространственный балочный элемент, реализующий теорию Тимошенко. 3-й узле необходим для ориентации сечения в пространстве.	
3	MPC184	Элемент кинематических ограничений.	-
4	SURF154	Элемент поверхностных эффектов. Количество узлов элемента зависит от типа конечного элемента к которому он применяется.	
5	LINK180	2-х узловой пространственный стержневой элемент, работающий на растяжение или сжатие. Имеет три степени свободы в каждом	

		узле: перемещения в направлении осей X, Y и Z узловой системы координат	
6	COMBIN14	Специальный элемент пружины с заданной жесткостью в направлении глобальной оси z. 2-х узловой с тремя степенями свободы в каждом узле (перемещения в направлении осей X, Y и Z узловой системы координат)	-

2.5 Собственные программные разработки

Для проведения многовариантных расчетных исследований, посвященных верификации (глава 3) и апробации (глава 4) разработанной методики с помощью языка программирования Python и встроенного в ПК ANSYS – APDL разработаны программы, позволяющие частично автоматизировать и параметризовать процесс создания расчетных сеток и КЭ-моделей и обработку полученных результатов. Краткое описание и назначение основных программных разработок автора представлено в таблице 2.5.2.

Данные программные разработки, позволяющие значительно ускорить процесс проведения динамических расчетов систем «основание – водохранилище - сооружение», внедрены в расчетную практику Научно-исследовательского центра СтаДиО и использованы при выполнении ряда наукоемких работ, в том числе:

- НИР «Расчетные исследования статического и динамического напряженно-деформированного состояния батопорта сухого дока судоверфи» (2011 г.);
- НИР «Комплексная реконструкция и модернизация Каскада Кубанских ГЭС. Разработка, верификация и апробация численных методик расчета системы «грунтовое основание - сооружение напорного фронта ГТС» на сейсмические воздействия, заданные акселерограммами. ГАЭС Шлюз-регулятор №1» (2011-2013 гг.);

- НИР «Численное моделирование напряженно-деформированного состояния основных гидротехнических сооружений, интеграция разработанных адаптивных моделей в программно-аппаратный комплекс (ПАК) мониторинга и прогнозирования надежности сооружений Загорских ГАЭС» (2015-2017 гг.).

Таблица 2.5.2. Краткое описание собственных программных разработок

Название макроса	Раздел диссертации	Назначение
Tank_F30.mac Tank_F80.mac	Глава 3 п.3.2.	Автоматизация создания геометрии и КЭ сетки. Назначение условий контакта и граничных условий для двух вариантов учета жидкости.
DIN_F80.mac	Глава 3 п.3.3.	Приложение динамического воздействия в виде акселерограммы. Расчет и назначение параметров демпфирования. Постпроцессинговая обработка результатов, построение графиков и отображение форм.
Dam...F30.mac Dam...F80.mac Dam...M21.mac	Глава 3 п.3.4.	Проведение многовариантных расчетов. Расчет и назначение присоединенных масс для различных высот плотины. Постпроцессинговая обработка результатов, построение графиков и вывод растровых изображений.
FLUID80.mac	Глава 4 п.4.2.	Выбор объемов, принадлежащих водному массиву. Создание компонент, используемых в дальнейшем при разбиении сетки и наложении граничных условий. Назначение реальных констант. Создание конечных элементов FLUID80 с необходимыми опциями. Создание материала для жидкости со всеми необходимыми свойствами. Наложение условий объединения перемещений по нормали узлам контактных поверхностей.
DIN_ACS.mac	Глава 4 п.4.2.	Динамический расчет по заданным акселерограммам. Настройка препроцессора. Создание массивов для записи акселерограмм. Считывание заготовленных файлов с ускорениями.

Название макроса	Раздел диссертации	Назначение
		Графическое отображение акселерограмм. Настройка решателя и приложение динамического воздействия. Расчет. Обработка полученных результатов. Вывод результатов в графичной и табличной формах.
GRAUND.mac	Глава 4	Создание геометрической модели грунтового массива и его параметризация. Наложение условий шага разбиения. Создание материала и назначение ему необходимых свойств. Разбиение объема, являющегося грунтовым массивом. Наложение граничных условий (ограничение узловых степеней свободы).

2.6 Выводы по главе 2

1. Теоретически обоснована методика уточненного динамического анализа НДС трехмерной системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» при сейсмических воздействиях.

2. Методика реализует современные подходы математического моделирования, включая постановку Лагранжа и Эйлера для моделирования жидкости.

3. Описаны реализующий программный комплекс численного моделирования (универсальный ПК ANSYS Mechanical), собственные программные разработки и используемые в расчетных исследованиях типы конечных элементов (со всеми особенностями их применения).

4. В ходе верификации на представительном наборе задач (глава 3) и апробации на реальном объекте (глава 4) предполагается определить возможности и ограничения реализуемой методики, а также обосновать диапазоны применимости элементов FLUID80 и FLUID30 для моделирования жидкости при динамических расчетах гидротехнических сооружений.

ГЛАВА 3. ВЕРИФИКАЦИЯ УТОЧНЕННОЙ МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО НДС ТРЕХМЕРНЫХ СВЯЗАННЫХ СИСТЕМ

3.1. Общие положения. Выбор верификационных задач

Ввиду того, что результаты модального анализа дают очень важные динамические характеристики системы, которые в свою очередь могут являться исходными данными для других видов динамического анализа, в том числе спектрального анализа, а также ввиду имеющегося точного аналитического решения, в качестве *первого* верификационного примера выбрана задача о собственных колебаниях свободной поверхности жидкости в прямоугольном сосуде с жесткими стенками. Также данный верификационный пример позволит сопоставить результаты для двух различным типом конечных элементов FLUID30 и FLUID80, моделирующих жидкость.

В качестве *второго* верификационного примера принята задача колебания прямоугольного резервуара, частично заполненного жидкостью, при динамическом воздействии. Данный пример имеет эталонное экспериментальное решение [96; 127], с которым сопоставлялись полученные результаты. Основным результатом, по которому сопоставлялись полученные данные являлась форма свободной поверхности жидкости в разные моменты времени. На данном примере оценивалась возможность использования конечных элементов типа FLUID80 в лагранжевой постановке для оценки формы свободно поверхности жидкости при динамическом воздействии.

Следующий, *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.

И в качестве *четвертой* верификационной задачи был принят бенчмарк (контрольная задача) [106] предложенный на 12-ом международном семинаре по вопросам численного моделирования плотин, который организует международная комиссия по большим плотинам (ICOLD). В данном бенчмарке рассматривается арочная плотина высотой 220 м 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.

Основным критерием при выборе серии верификационных задач являлось наличие их достоверного расчетного и экспериментального подтверждения.

3.2. Сопоставление форм и частот собственных колебаний жидкости в прямоугольном резервуаре, полученных на модели, с аналитическим решением

Определение собственных частот и форм колебания свободной поверхности жидкости в прямоугольном сосуде является классической задачей, имеющей точное аналитическое решение. Решением данной проблемы занимались такие ученые, как Пуассон, Релей, Кирхгоф и др.

3.2.1. Описание расчетной модели

В качестве верификационного примера рассматривался гипотетический прямоугольный сосуд с жесткими стенками имеющий следующие геометрические параметры: ширина резервуара – 27 м, толщина стенок резервуара – 1 м, глубина воды в резервуаре – 5 м [7]. Геометрическая форма и размеры модели резервуара показаны на рисунке 3.2.1.

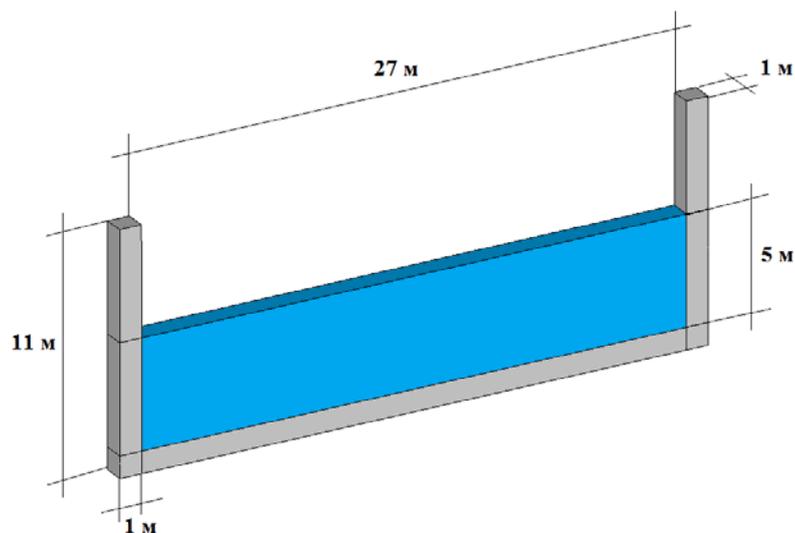


Рисунок – 3.2.1. Геометрические параметры резервуара

Жидкость в резервуаре моделировалась двумя способами:

1. С использованием объемных восьми узловых конечных элементов FLUID80 (элементов несжимаемой жидкости с эффектом свободной поверхности);
2. С использованием объемных восьми узловых акустических конечных элементов FLUID30.

Резервуар моделировался конечными элементами SOLID185, стенки резервуара принимались толщиной 1 м, материал - бетон. Расчетная сетка полностью структурированная (Рисунок 3.2.2 и 3.2.3.) и для обоих случаев моделирования жидкости, расчетная модель имеет одинаковую размерность (элементов –730, узлов - 1752). Задача решалась в плоской постановке, реализовывался случай плоской деформации, для этого всем узлам модели были ограничены перемещения UY. Основание резервуара жестко закреплялось. Физико-механические характеристики материалов, применяемых в расчетной модели, приведены в таблице 3.2.1.

Таблица 3.2.1. Физико-механические характеристики материалов и сред

<i>Вариант 1 (FLUID80)</i>		<i>Вариант 2 (FLUID30)</i>	
<i>Бетон (резервуар)</i>			
Плотность ρ , кг/м ³	2500	Плотность ρ , кг/м ³	2500
Модуль упругости E , Па	3×10^{10}	Модуль упругости E , Па	3×10^{10}
Коэффициент Пуассона ν	0.23	Коэффициент Пуассона ν	0.23
<i>Жидкость (вода)</i>			
Плотность ρ , кг/м ³	1000	Плотность ρ , кг/м ³	1000
Динамическая вязкость η , Па·с	0.001	Динамическая вязкость η , Па·с	0.001
Модуль упругости E , Па	2.068×10^9	Скорость звука в жидкости ν , м/с	1400
Коэффициент Пуассона ν	0.49		

3.2.1.1. Вариант 1 (конечные элементы FLUID80)

Моделирование жидкости элементами FLUID80 имеет специфические особенности, связанные со свойствами конечных элементов. Моделирование проводится так, чтобы элементы жидкости и сооружения (в данном случае резервуара) не имели общих узлов, но на контакте узлы совпадали (имели одинаковые координаты). У этих узлов, командой CPINTF, объединяется одна степень свободы - перемещение в направлении перпендикулярном плоскости контакта (рисунок 3.2.2.). Это обеспечивает возможность перемещения элементов жидкости вдоль стенок резервуара.

Для вычисления собственных частот и форм колебаний жидкости использовался редуцированный метод. Для использования этого метода, все узлы свободной поверхности жидкости приводятся к системе ведущих степеней свободы (мастер-степени). В качестве ведущих степеней выбраны линейные перемещения в направлении перпендикулярном свободной поверхности жидкости.

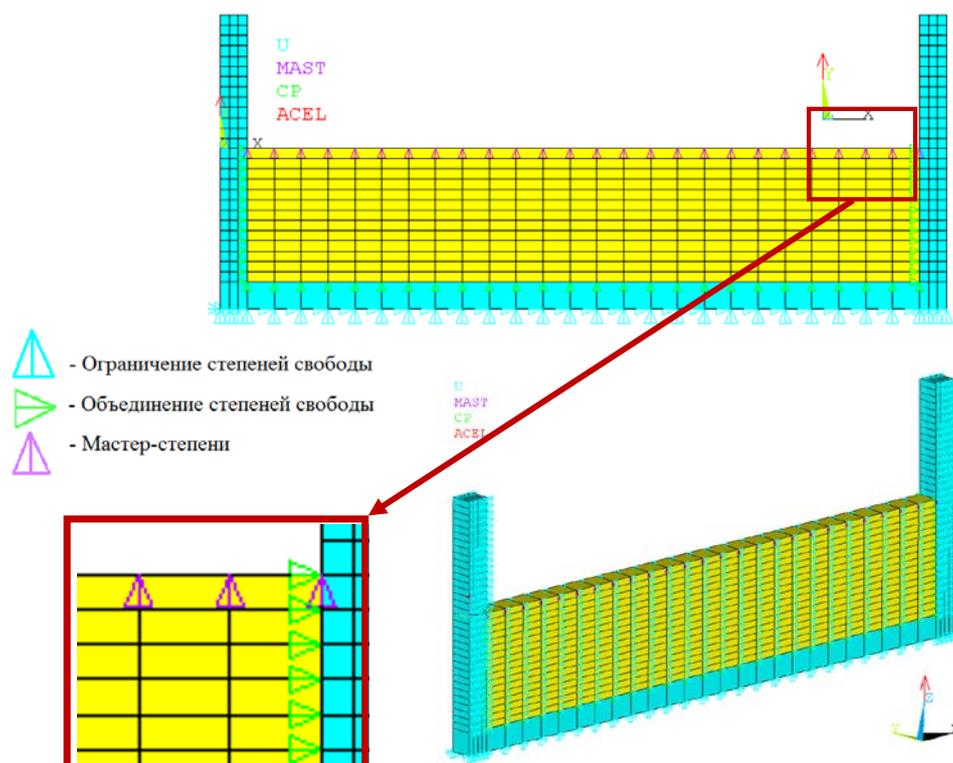


Рисунок – 3.2.2. Расчетная модель для Варианта 1.

3.2.1.2. Вариант 2 (конечные элементы FLUID30)

При моделировании жидкости с использованием акустических элементов FLUID30, в расчетной модели элементы жидкости и элементы резервуара на контакте должны иметь общие узлы, на которые накладываются условия контакта FSI (Fluid Structure Interaction). При модальном анализе в опциях элементов FLUID30 параметр KEYOPT(2) установлена в положение Present for modal. В этом случае элементы имеют несимметричную элементную матрицу. На узлы свободной поверхности жидкости накладывались условия FREE, этот параметр добавляет в выбранных элементах, помимо давления PRESS, дополнительные узловые степени свободы – перемещения UZ, UX, UY) (рисунок 3.2.3.).

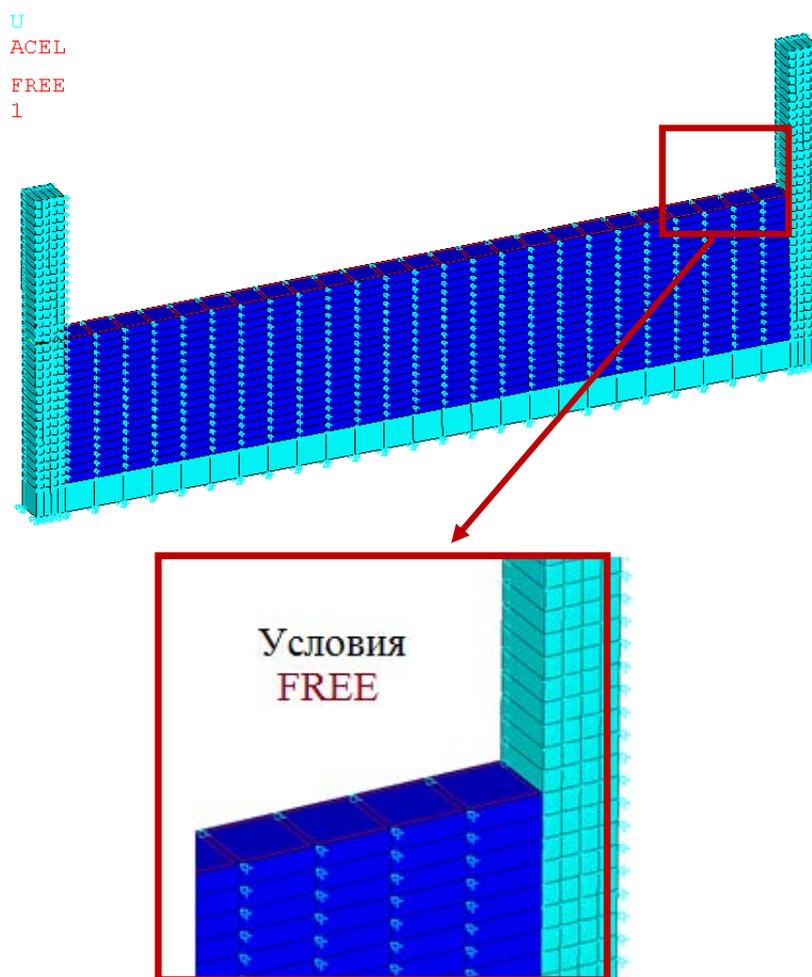


Рисунок – 3.2.3. Расчетная модель для Варианта 2.

3.2.2. Параметры расчета

Для обоих вариантов были посчитаны первые 10 частот собственных колебаний. Для варианта с использованием элементов жидкости FLUID80 использовался редуцированный метод расчета (Хаусхолдера). Для варианта с элементами FLUID30 применялся блочный метод расчета (Ланцоша).

3.2.3. Аналитическое решение

Согласно [56] собственная круговая частота жидкости в прямоугольном сосуде равна:

$$\omega_i^2 = g \cdot k \cdot th(kH) \quad (3.2.1)$$

где:

$$k = \frac{\pi n}{L} \text{ (волновое число)} \quad (3.2.2)$$

где $n = 1, 2, 3 \dots$ (число полуволн на свободно поверхности жидкости)

Из уравнения (3.2.1) и (3.2.2) получаем:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{g\pi n}{L} \cdot th\left(\frac{\pi H n}{L}\right)} \quad (3.2.3)$$

Частота колебаний связана с круговой частотой уравнением:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (3.2.4)$$

Подставив уравнение (3.2.4) в (3.2.3) получаем:

$$f_i = \frac{\sqrt{\frac{g\pi n}{L} \cdot th\left(\frac{\pi H n}{L}\right)}}{2\pi} \quad (3.2.5)$$

где g – ускорение свободного падения; H – глубина воды в сосуде; L – ширина сосуда с жидкостью.

Используя уравнение (3.2.5) можно посчитать частоты собственных колебаний жидкости в прямоугольном сосуде.

3.2.4. Анализ результатов и выводы

Полученные на модели частоты собственных колебаний сопоставлялись с результатами аналитического решения и определялось расхождение в процентах.

В таблице 3.2.2. представлено сопоставление частот собственных колебаний.

Таблица 3.2.2. Сопоставление значений частот собственных колебаний

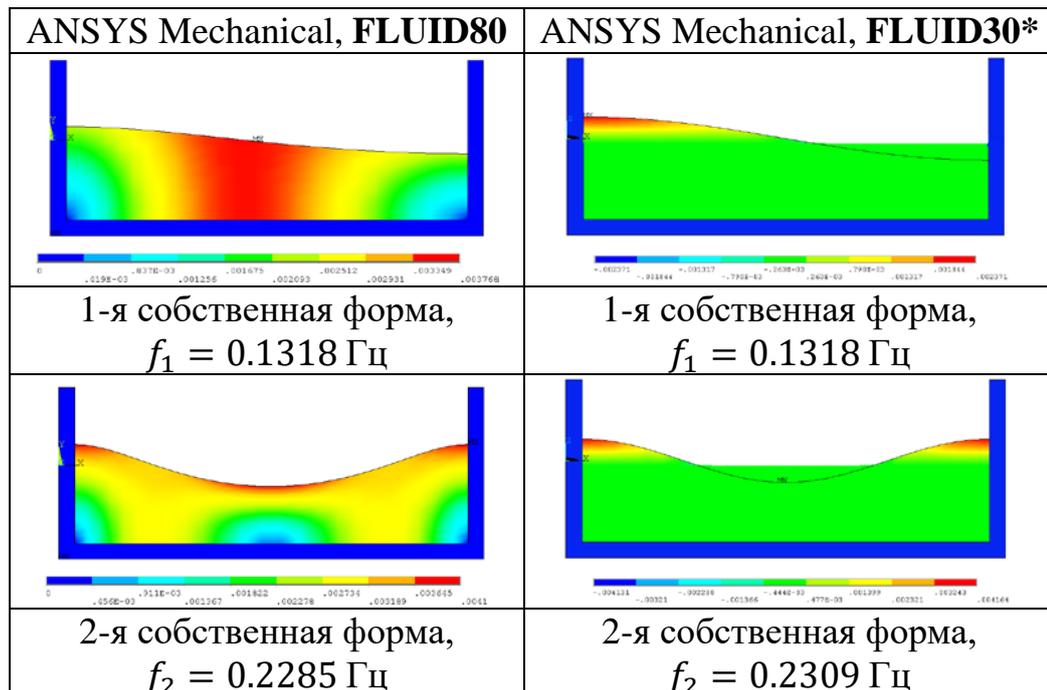
№ фор мы	Аналитическое решение [56]	Лагранж, ANSYS Mechanical	
		Fluid80 (3D) / расхождение с аналитическим решением	Fluid30 (3D) / расхождение с аналитическим решением
		f_n [Гц]	f_n [Гц] / %
1	0.1319	0.1318 / 0.1	0.1319 / 0.0
2	0.2305	0.2286 / 0.8	0.2309 / 0.2
3	0.2992	0.2951 / 1.4	0.3002 / 0.3
4	0.3512	0.3494 / 0.5	0.3532 / 0.6
5	0.3945	0.3948 / 0.1	0.3980 / 0.9
6	0.4327	0.4322 / 0.1	0.4382 / 1.3
7	0.4676	0.4672 / 0.1	0.4757 / 1.7
8	0.4999	0.5030 / 0.6	0.5113 / 2.2

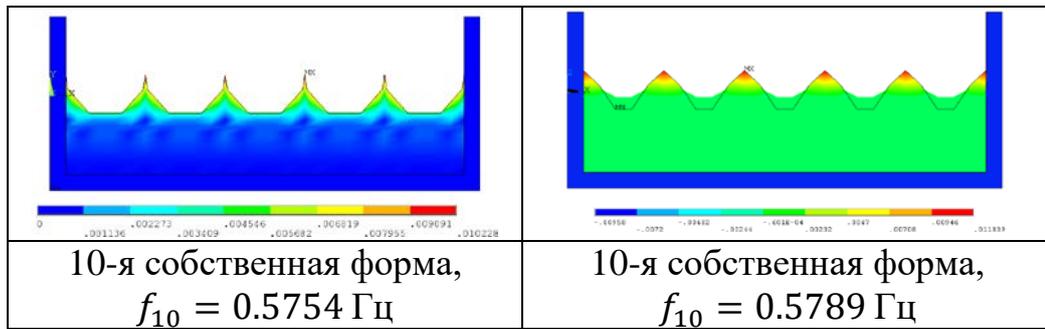
9	0.5303	0.5392 / 1.7	0.5456 / 2.8
10	0.5589	0.5754 / 2.9	0.5789 / 3.5

Также проводилось сопоставление форм собственных колебаний поверхности жидкости для двух расчетных вариантов, в таблице 3.2.3. представлена визуализация форм.

В результате дополнительных расчетов определялись высшие формы и частоты собственных колебаний, когда начинал колебаться сам резервуар. Э также сопоставлялись, так как влияние жидкости на динамические характеристики сооружения (в данном случае резервуара) имеет ключевое значение при динамическом анализе связанных систем. В таблице 3.2.4. показаны формы колебания резервуара.

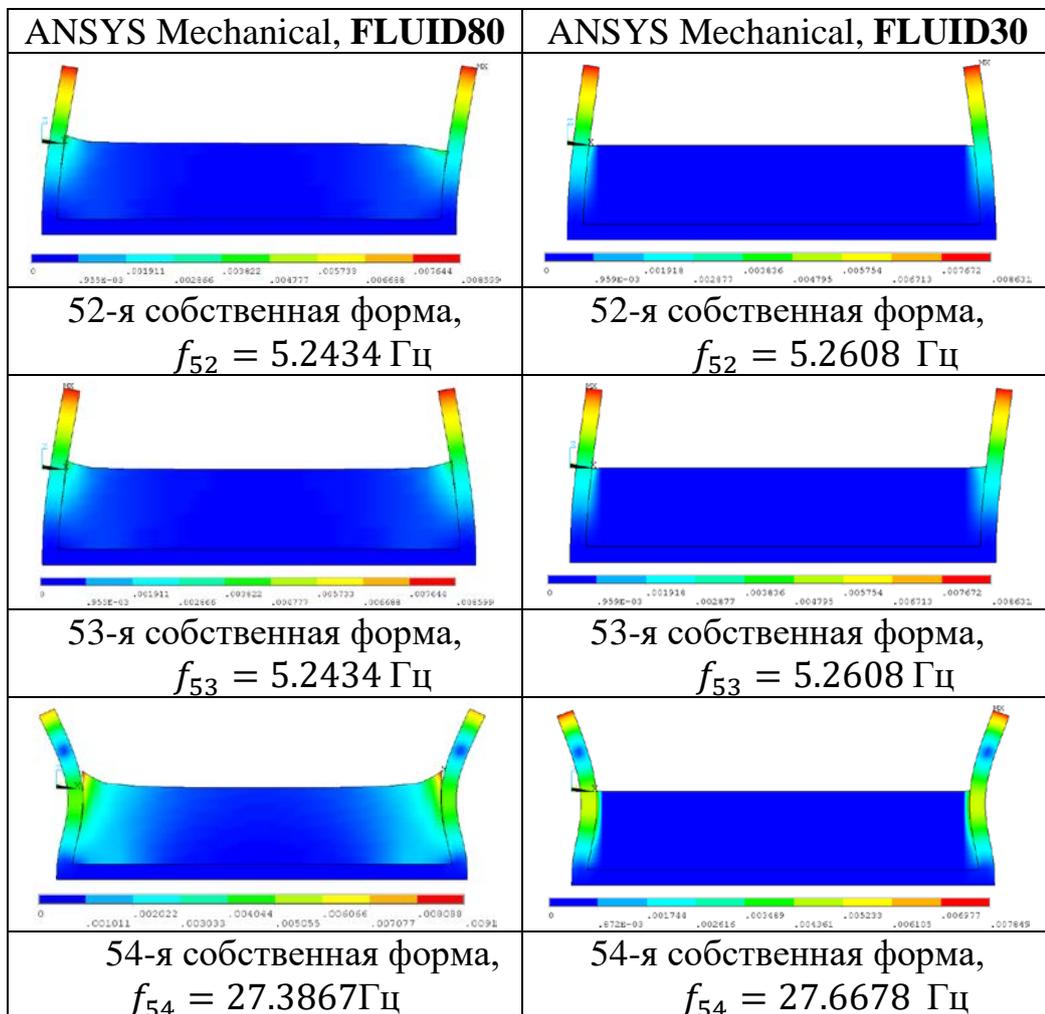
Таблица 3.2.3. Низшие собственные частоты и формы колебания жидкости в прямоугольном сосуде.





*Примечание: такая картина отображения суммарных перемещений связана с отсутствием у всех акустических элементов FLUID30, кроме поверхностных, линейных перемещений в качестве узловых степеней свободы.

Таблица 3.2.4. Высшие собственные частоты и формы колебания резервуара с жидкостью



Выводы по результатам верификационного примера.

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. Расхождения на высших формах колебаний объясняются разрешающей способностью, принятой конечноэлементной сетки.

Хорошее совпадение полученных результатов с аналитическим решением подтверждает возможность применения рассматриваемых конечных элементов при динамическом расчете гидротехнических сооружений с учетом влияния жидкости линейно спектральным методом, где модальный анализ является первым этапом расчета.

Недостаток в отображении форм колебания жидкости при использовании элементов FLUID30 связан с отсутствием у основной части акустических элементов линейных перемещений в качестве узловых степеней свободы. Однако расхождение с аналитическим решением по количественному показателю (частота собственных колебаний) находится в пределах 1% на первых пяти формах, что позволяет применять эти элементы в данном типе динамического анализа.

Сопоставление форм и частот высших собственных колебаний резервуара с жидкостью при использовании элементов FLUID30 и FLUID80 показало хорошее совпадение, что также позволяет сделать вывод о возможности применения данных элементов при модальном анализе связанных систем.

3.3. Колебания свободно поверхности жидкости в жестком прямоугольном резервуаре при динамическом кинематическом воздействии. Сопоставление с экспериментом

Данный верификационный пример довольно широко известен и имеет эталонное экспериментальное решение.

3.3.1. Описание расчетной модели

В рассматриваемой верификационной задаче моделировался прямоугольный резервуар, частично заполненный жидкостью (водой) [7]. Геометрические размеры модели резервуара, а также физические свойства

жидкости и характер моделируемого динамического воздействия полностью соответствуют эксперименту [96].

Стенки «экспериментального» резервуара были выполнены из оргстекла толщиной 10 мм, в расчетной модели стенки резервуара принимались, как условно абсолютно жесткие (модуль упругости материала был принят равным 1×10^{15} Па таблица 3.3.1.). Резервуар имеет следующие габаритные размеры $1480 \times 400 \times 750$ мм, а толщина слоя жидкости – 210 мм (рисунок 3.3.1.). Прикладываемое динамическое воздействие представляет собой синусоидальный график зависимости перемещения дна резервуара от времени. Общая продолжительность динамического воздействия составляла 11 секунд. Первые 2.37 секунды воздействие прикладывалось в горизонтальной плоскости (для возбуждения свободной поверхности жидкости), начиная с 2.38 секунды по 11 секунду воздействие прикладывалось по вертикали. График внешнего динамического воздействия представлен на рисунке 3.3.2.

Таблица 3.3.1. Физико-механические свойства материалов

<i>Оргстекло (резервуар)</i>	
Плотность ρ , кг/м ³ :	0
Модуль упругости E , Па:	$3 \cdot 10^{15}$
Коэффициент Пуассона ν :	0.2
<i>Жидкость (вода)</i>	
Плотность ρ , кг/м ³ :	1000
Динамическая вязкость η , Па·с:	0.001
Модуль упругости E , Па:	$2.068 \cdot 10^9$
Коэффициент Пуассона ν :	0.49

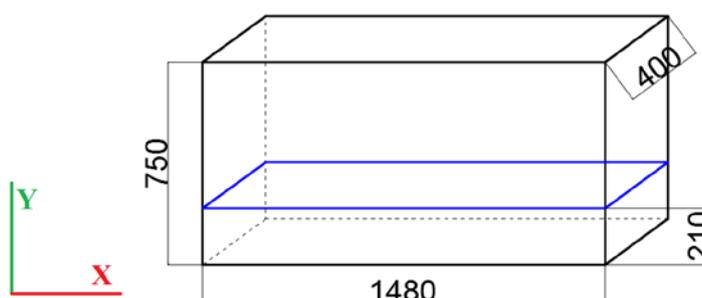


Рисунок – 3.3.1. Геометрические характеристики резервуара

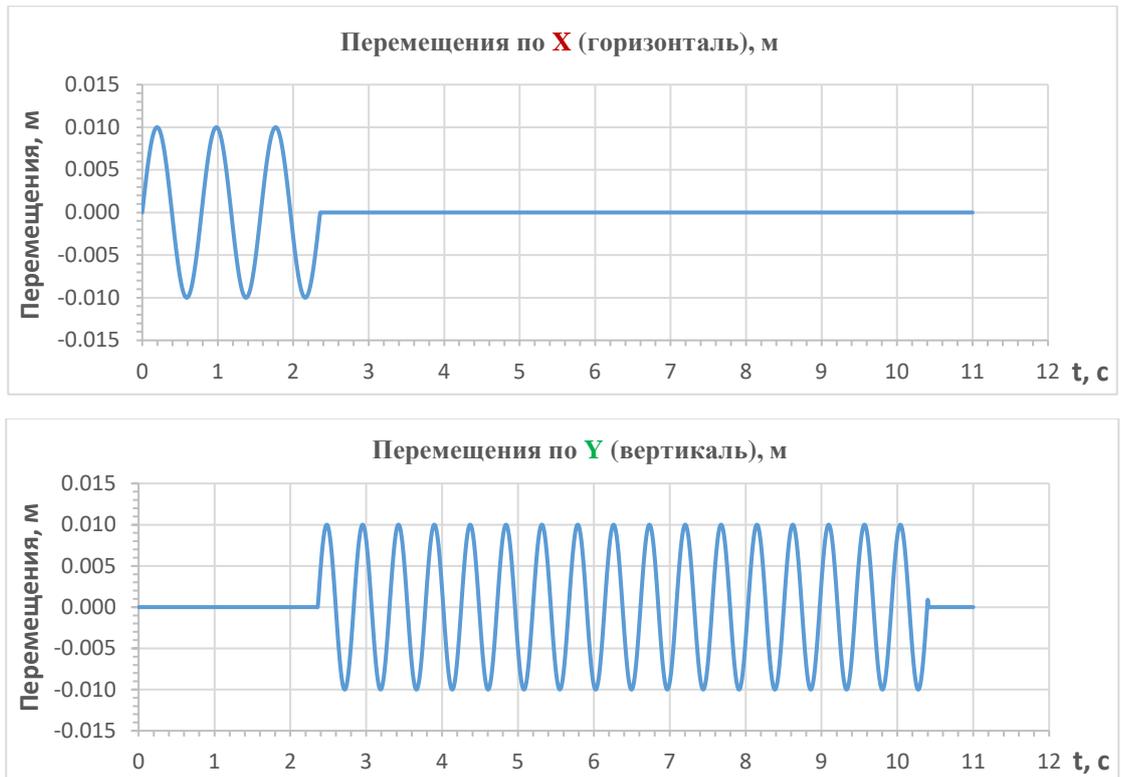


Рисунок – 3.3.2. Графики прикладываемого воздействия

Так как акустические элементы FLUID30 при проведении динамического анализа переходных процессов не имеют в качестве узловых степеней свободы перемещения, оценка формы свободной поверхности жидкости становится невозможной. В данной верификационном примере форма свободной поверхности в различные моменты времени является основным сопоставительным критерием с экспериментом, поэтому в данной задаче использовались только элементы FLUID80, позволяющие реализовать численный метод, основанный на постановке Лагранжа (эта постановка подробно описана во второй главе). Стенки резервуара моделировались конечными элементами SOLID185.

Расчетная конечноэлементная сетка принималась полностью структурированной, характерный размер граней конечных элементов принимался равным 0.01 м (рисунок 3.3.3.). Полученная расчетная модель имеет следующую размерность: число узлов – 5877, число элементов 5302. На контактных поверхностях у совпадающих узлов жидкости и резервуара объединялись перемещения перпендикулярные к плоскости контакта.

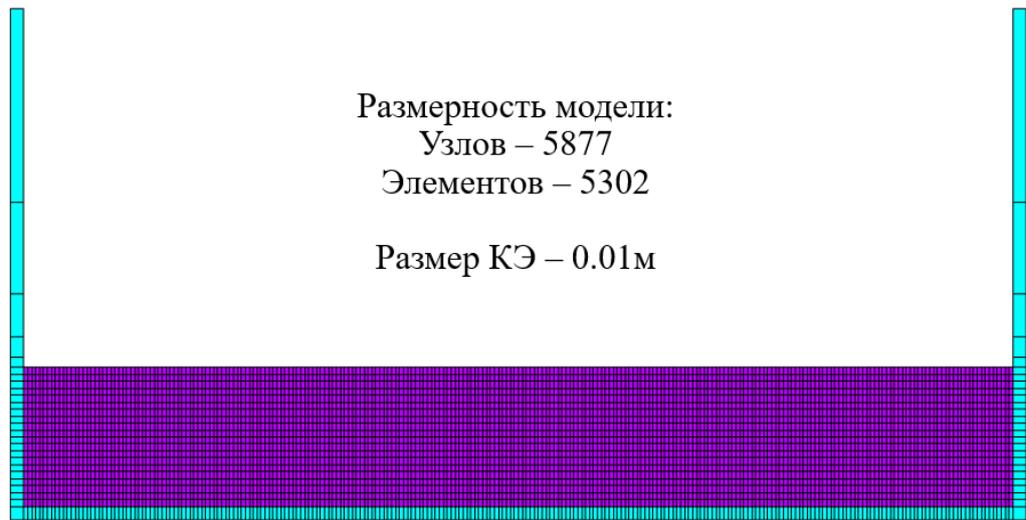


Рисунок – 3.3.3. Расчетная модель резервуара с жидкостью

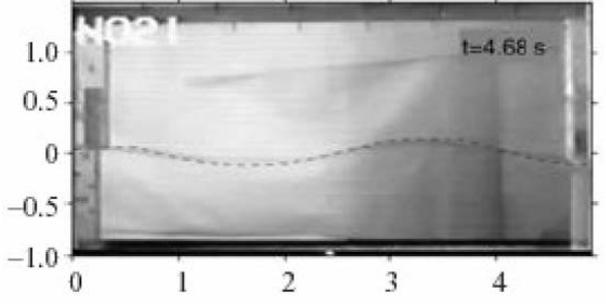
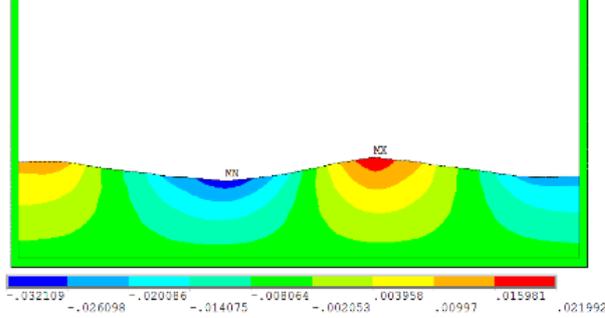
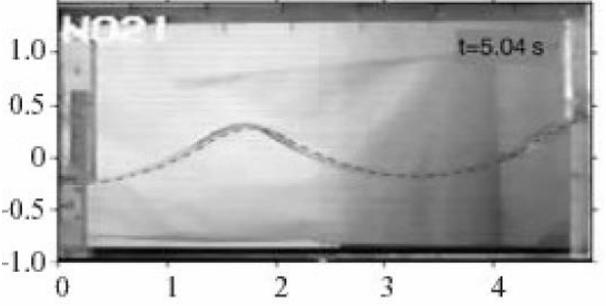
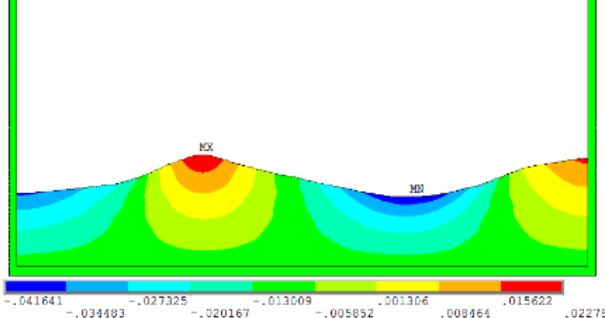
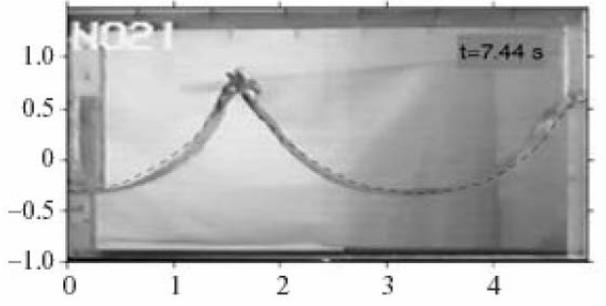
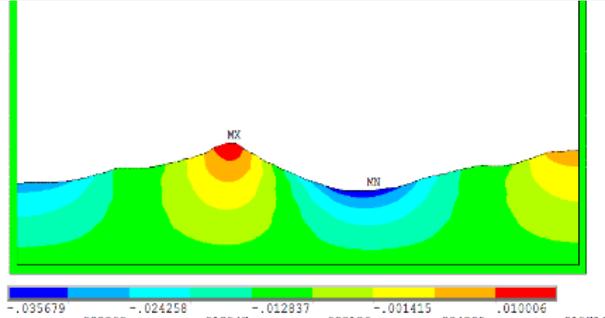
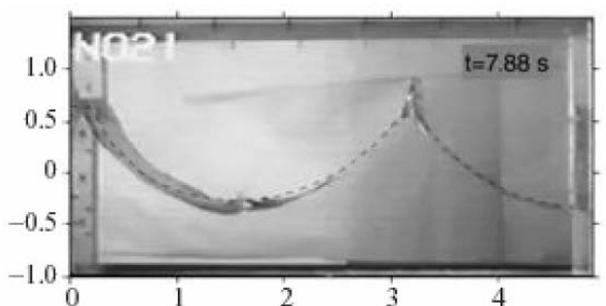
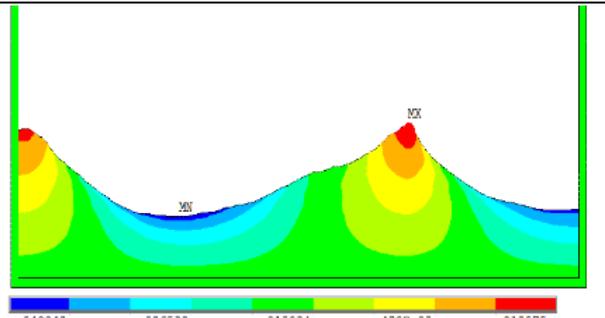
3.3.2. Параметры расчета

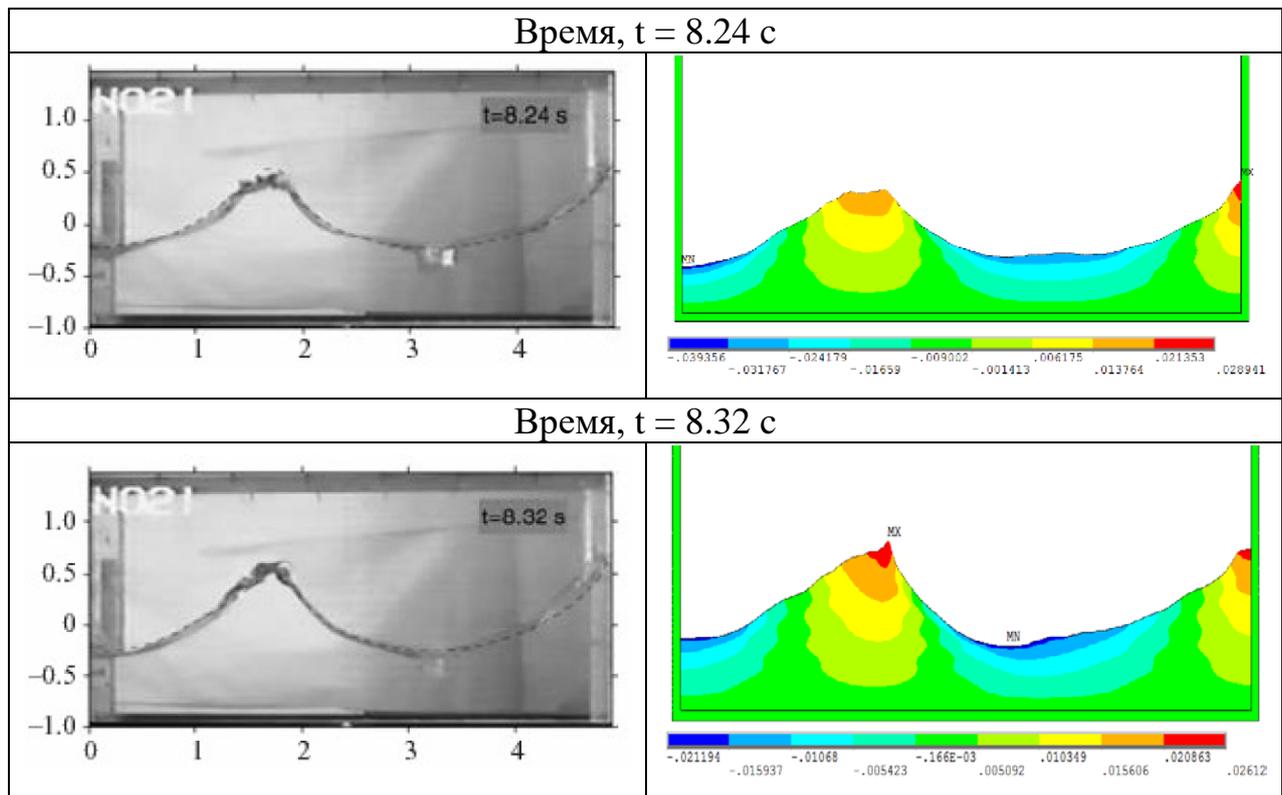
Для решения задачи в динамической постановке, решение СЛАУ выполнялось прямым разреженным методом (SPARSE). Интегрирование по времени проводилось методом Ньюмарка, шаг интегрирования принимался равным 0.0025 с. Оптимальный шаг интегрирования был определен в результате серии тестовых расчетов. Динамическое воздействие прикладывалось к нижней поверхности резервуара в виде заданных перемещений и воспроизводило воздействие в эксперименте.

3.3.3. Анализ результатов и выводы

Сопоставление полученных результатов с данными эксперимента проводилось по форме свободной поверхности жидкости (качественный параметр), точной количественной оценки (по высоте волны, расстоянию между гребнями и т.д.) не проводилось в связи с низким качеством фотоснимков экспериментальной установки. В таблице 3.3.2. представлены графические материалы сопоставления результатов расчета с экспериментом.

Таблица 3.3.2. Визуальное сопоставление форм свободной поверхности жидкости при динамическом воздействии в различные моменты времени, полученных в эксперименте и численно.

Эксперимент [96]	Лагранж, FLUID80
Время, $t = 4.68$ с	
	
Время, $t = 5.04$ с	
	
Время, $t = 7.44$ с	
	
Время, $t = 7.88$ с	
	



Полученные результаты показывают неплохое совпадение с экспериментом по форме свободной поверхности жидкости. На основании этого можно сделать вывод о возможности использования элементов FLUID80 (постановка Лагранжа) при расчетах связанных систем на динамические воздействия, не смотря на значительное упрощение уравнений гидроупругости. Применение данного подхода имеет смысл, когда основной целью расчета являются не поведение жидкости, а вопросы прочности и надежности сооружения, контактирующего с ней.

Акустические элемента FLUID30 не использовались в данном верификационном примере из-за отсутствия возможности адекватного отображения формы свободной поверхности, что являлось основным сопоставительным критерием.

3.4. Сопоставление различных методов учета жидкости и влияние глубины водохранилища на динамическое НДС бетонной плотины с вертикальной напорной гранью при сейсмическом воздействии, в плоской постановке

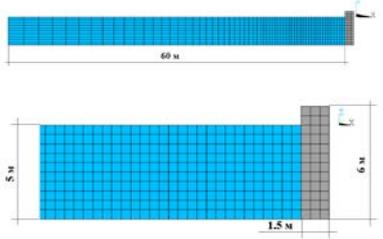
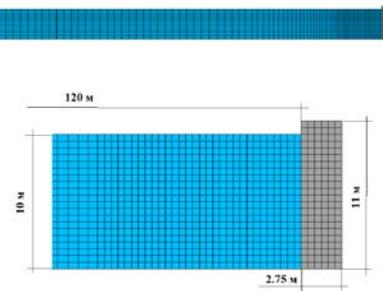
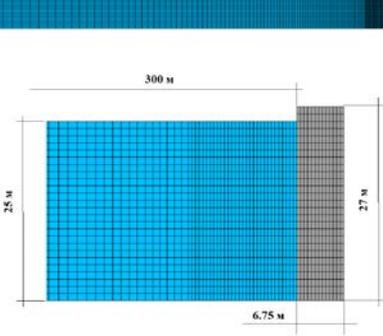
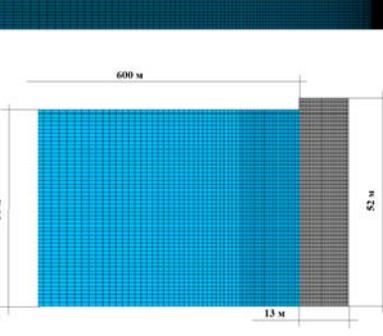
Основной целью данного верификационного примера является сопоставление результатов динамических расчетов гидротехнического сооружения при различных методах учета водохранилища, а также оценка влияния глубины водохранилища перед сооружением на характер отклика плотины на динамическое воздействие [8]. Для этого была принята упрощенная расчетная схема с прямоугольной плотиной и водохранилищем конечной длины. Были рассмотрены 4 варианта высоты плотины, с напором на сооружение - 5, 10, 25 и 50 м, согласно принятой классификации [32], плотины с напором до 10 м считаются низконапорными, 10 - 40 м - средненапорные плотины, свыше 40 м - высоконапорные плотины. Для каждого из принятых вариантов водохранилище моделировалось 3мя способами (присоединенными массами, акустическими элементами FLUID30 и гидродинамическими элементами FLUID80).

3.4.1. Описание расчетной модели

Для всех четырех вариантов, принятая расчетная схема имеет упрощенный вид (рисунок 3.4.1.), 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.

Основание плотины задано абсолютно жестким (ограничены все степени свободы узлам на контакте с основанием), на контакте водохранилища с основанием ограничены линейные перемещения в направлении, перпендикулярном плоскости основания. Для реализации случая плоской деформации всем узлам на боковых гранях заданы ограничения перемещений вдоль оси Y. В таблице 3.4.1. приведены основные параметры расчетных моделей.

Таблица 3.4.1. Параметры расчетных конечноэлементных моделей

Вариант модели	Общий вид	Высота плотины Длина водохранилища	Размерность Узлов/Элементов
Вариант №1 Напор – 5 м		6 м 60 м	2014 / 1226
Вариант №2 Напор – 10 м		11 м 120 м	3177 / 1904
Вариант №3 Напор – 25 м		27 м 300 м	10770 / 6852
Вариант №4 Напор – 50 м		52 м 600 м	28638 / 17650

В данном верификационном примере водный массив, контактирующий с водоподпорным сооружением моделировался 3мя методами:

1. Влияние жидкости учитывалось за счет присоединенных масс, посчитанных в соответствии с нормативными документами.
2. Жидкость моделировалась гидродинамическими элементами FLUID80.
3. Жидкость моделировалась акустическими элементами FLUID30.

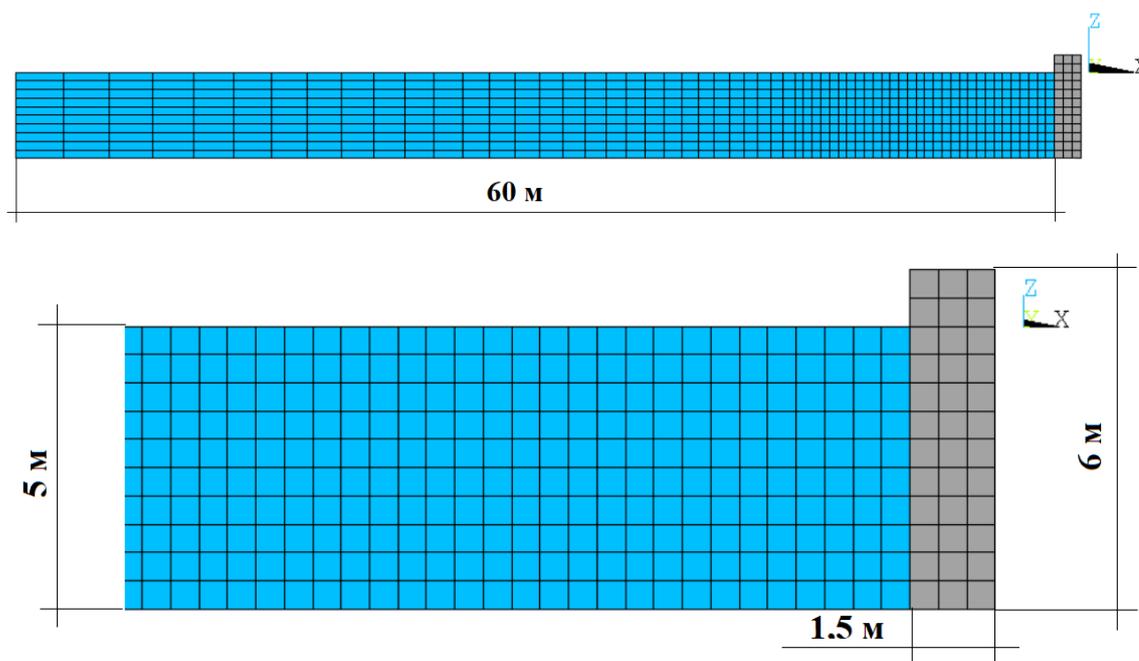


Рисунок – 3.4.1. Вариант №1. Напор – 5м. Расчетная конечноэлементная модель бетонной плотины с вертикальной напорной гранью.

Для моделирования водоподпорного сооружения использовались восьмиузловые объемные конечные элементы SOLID45, с длиной грани 0.5 - 1 м. Материал сооружения имеет следующие физические свойства, соответствующие бетону класса Б25:

- Модуль упругости E_X , равный $E=2.7 \cdot 10^7$ кПа.
- Плотность DENS, равная $\rho=2.2$ т/м³.

3.4.1.1. Учет жидкости присоединенными массами (MASS21)

Присоединенная масса моделировалась сосредоточенными в узлах на напорной грани (рисунок 3.4.2.) элементами присоединенной массы (MASS21), в которых учитывалась только горизонтальная масса по направлению X. Создание

этих элементов производилось по специально разработанным автором макросам, позволяющим автоматизировать этот процесс. Значение присоединенной массы воды рассчитывалась по СНиП II-7-81, на единицу площади по формуле:

$$M_B = \rho_B \cdot h \cdot \mu \cdot \psi \quad (3.4.1)$$

где:

ρ_B – плотность воды (1 т/м³),

h - глубина воды у сооружения,

μ – безразмерный коэффициент (принят как для горизонтального поступательного движения недеформируемого сооружения с вертикальной напорной гранью),

ψ – коэффициент, учитывающий ограниченность водоема. Так как $l/h > 3$ (где l - расстояние до противоположного берега), коэффициент принят равным $\psi = 1$. Значение расчетных присоединенных масс для всех 4х вариантов модели приведено в таблице 3.4.2.

Таблица 3.4.2. Значения присоединенных масс

Глубина $h, м$	Значение присоединенной массы, т			
	Вариант №1 $H = 5 м$	Вариант №2 $H = 10 м$	Вариант №3 $H = 25 м$	Вариант №4 $H = 50 м$
1	1.15	2.3	3	3
2	2.35	3.6	4.95	6
3	3.05	4.7	6.4	8.3
4	3.5	5.5	7.7	9.9
5	3.7	6.1	9	11.5
6		6.6	10.1	12.8
7		7	11.2	14.1
8		7.2	12.15	15.4
9		7.4	12.95	16.7
10		7.4	13.75	18
11			14.35	19.1
12			14.95	20.2
13			15.5	21.3
14			16	22.4
15			16.5	23.5
16			16.9	24.3
17			17.3	25.1
18			17.6	25.9
19			17.8	26.7
20			18	28
21			18.2	28.1
22			18.4	28.7
23			18.5	29.3

Глубина h, м	Значение присоединенной массы, т			
	Вариант №1 H = 5м	Вариант №2 H = 10м	Вариант №3 H = 25м	Вариант №4 H = 50м
24			18.5	29.9
25				30.5
26				31
27				31.5
28				32
29				32.5
30				33
31				33.4
32				33.8
33				34.2
34				34.6
35				35
36				35.2
37				35.4
38				35.6
39				35.8
40				36
41				36.2
42				36.4
43				36.6
44				36.8
45				37
46				37
47, 48, 49, 50				37

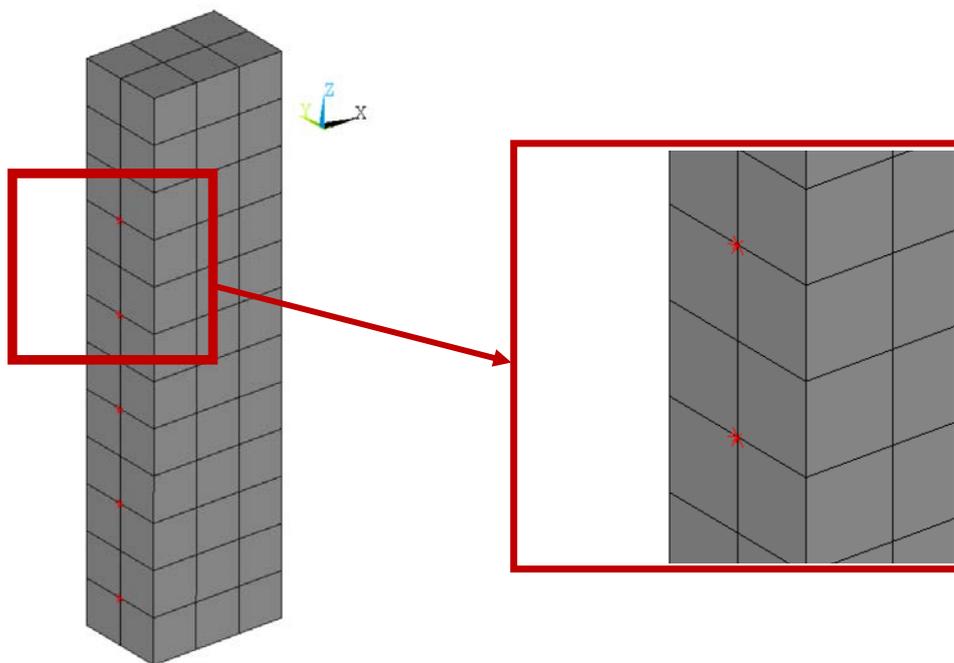


Рисунок – 3.4.2. Вариант №1. Напор – 5м. Схема приложения присоединенных масс. Элементы MASS21 показаны красными звездочками

3.4.1.2. Моделирование жидкости гидродинамическими элементами (FLUID80)

При моделировании водного массива элементами FLUID80, на контактной поверхности жидкость и водоподпорное сооружение не имеют общих узлов. У совпадающих узлов на напорной грани проводилось объединение перемещений в направлении перпендикулярном контактной поверхности.

Водная среда учитывалась, как несжимаемая упругая жидкость, с плотностью равной $\rho = 1 \text{ т/м}^3$, и объемным модулем упругости $E = 2,06 \cdot 10^6 \text{ кПа}$.

3.4.1.3. Моделирование жидкости акустическими элементами (FLUID30)

Водный массив задавался элементами FLUID30 с разными внутренними настройками. Внешний слой элементов, который контактирует с условным дном и сооружением, задавался элементами с опцией KEYOPT(2)=0, что делает в качестве узловых степеней свободы у данных элементов линейные перемещения и давление. Остальным элементам жидкости задавалась опция KEYOPT(2) =1, которая оставляет в узлах одну степень свободы - давление. Всем узлам, находящимся на контакте воды с ограничивающими поверхностями, задавались условия контакта Fluid–structure interaction (FSI), а для узлов на свободной поверхности жидкости задавались соответствующие условия (FREE).

Для моделируемой акустическими элементами жидкости задавались следующие свойства: плотность $\rho = 1 \text{ т/м}^3$, динамическая вязкость $r=0.001 \text{ Па}\cdot\text{с}$, скорость звука в среде $\vartheta=1400 \text{ м/с}$.

В качестве граничных условий, помимо жесткого закрепления по основанию, на свободной поверхности жидкости задавалось нулевое давление (рисунок 3.4.3.).

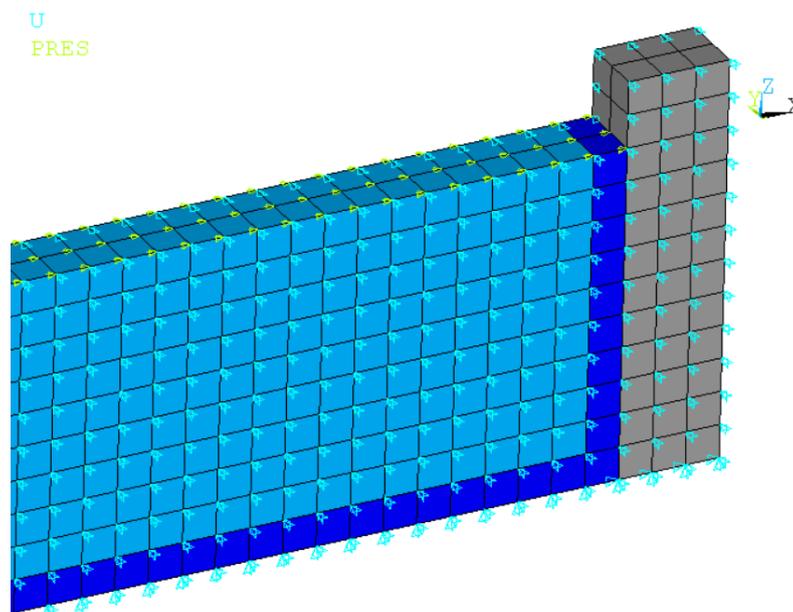


Рисунок – 3.4.3. Вариант №1. Напор – 5м. Модель с акустическими элементами FLUID30. Стрелочками показаны граничные условия

3.4.2. Параметры расчета

К моделям прикладывалось динамическое воздействие по оси X (горизонтально, вдоль потока), заданное акселерограммой. Время акселерограммы 10 с максимальное значение ускорений 9.10 м/с^2 , шаг по времени 0.2 с (рисунок 3.4.4.). Качественная форма принятой акселерограммы соответствует реальной, однако значения ускорений были намеренно завышены, для получения большего отклика системы. Ускорение прикладывалось в качестве инерционной нагрузки.

Для решения задачи в динамической постановке, решение СЛАУ выполнялось прямым разреженным методом (SPARSE). Интегрирование по времени проводилось методом Ньюмарка, шаг интегрирования принимался равным 0.001 с. Расчеты проводились без учета общесистемного демпфирования, его значение специально обнулялось перед началом расчета.

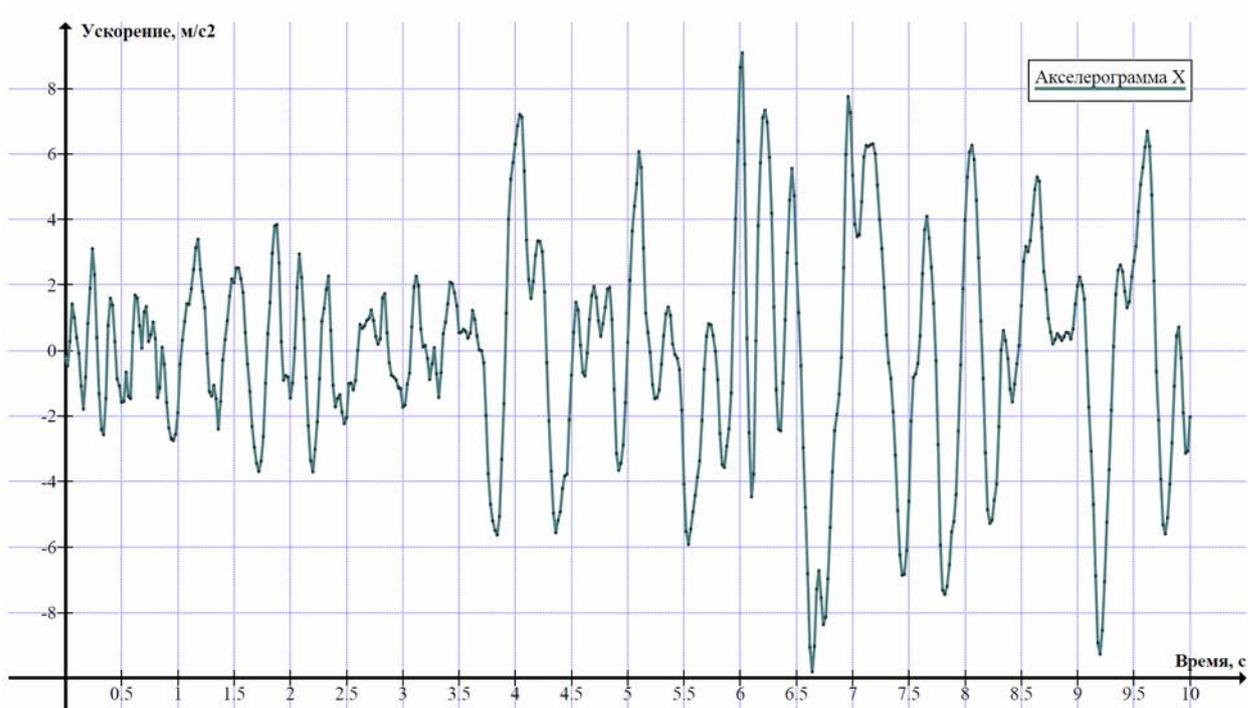
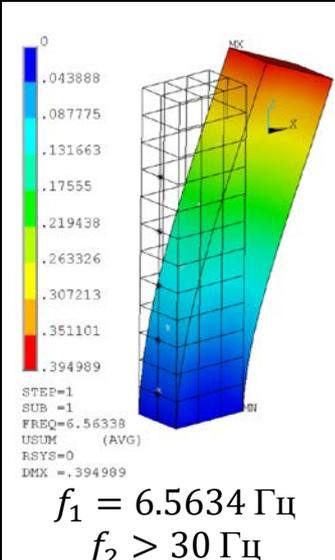
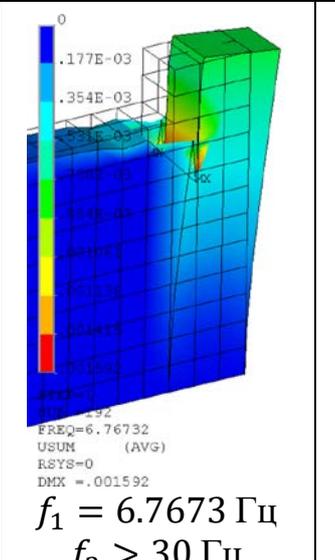
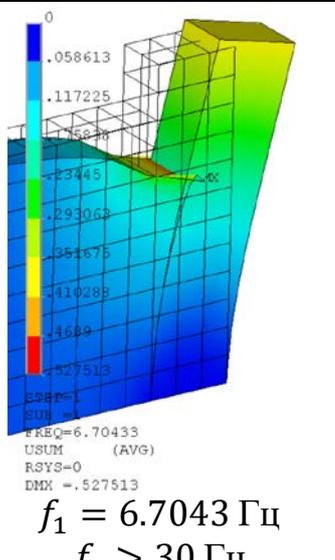


Рисунок – 3.4.4. Прикладываемое ускорение вдоль оси X

3.4.3. Анализ результатов и выводы

Для анализа отклика системы на динамическое воздействие важным параметром является частота и форма собственных колебаний. Поэтому, на первом этапе, в каждом из 4х расчетных вариантов были определены низшие собственные частоты и формы колебания сооружения с учетом различных вариантов моделирования водохранилища. Частоты собственных колебаний плотины приведены в таблице 3.4.3. 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.

Таблица 3.4.3. Низшие собственные частота колебания сооружения при различных вариантах учета жидкости и различных напорах на сооружение

Вариант модели	Присоединенная масса (MASS21)	Акустические элементы (FLUID30)	Гидродинамические элементы (FLUID80)
Вариант №1 H = 5м	 <p>$f_1 = 6.5634$ Гц $f_2 > 30$ Гц</p>	 <p>$f_1 = 6.7673$ Гц $f_2 > 30$ Гц</p>	 <p>$f_1 = 6.7043$ Гц $f_2 > 30$ Гц</p>
Вариант №2 H = 10м	<p>$f_1 = 3.7523$ Гц $f_2 = 16.9010$ Гц</p>	<p>$f_1 = 3.8652$ Гц $f_2 = 17.2390$ Гц</p>	<p>$f_1 = 3.8591$ Гц $f_2 = 17.2207$ Гц</p>
Вариант №3 H = 25м	<p>$f_1 = 1.3207$ Гц $f_2 = 6.2426$ Гц</p>	<p>$f_1 = 1.3789$ Гц $f_2 = 6.5153$ Гц</p>	<p>$f_1 = 1.3702$ Гц $f_2 = 6.5082$ Гц</p>
Вариант №4 H = 50м	<p>$f_1 = 0.6482$ Гц $f_2 = 3.0937$ Гц</p>	<p>$f_1 = 0.6777$ Гц $f_2 = 3.2417$ Гц</p>	<p>$f_1 = 0.6715$ Гц $f_2 = 3.2126$ Гц</p>

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.

Для более наглядного отображения результатов, были построены графики перемещений для каждого расчетного варианта. Результаты при различных способах моделирования жидкости накладывались на один график. На рисунках 3.4.5. - 3.4.8. представлены графики перемещений.

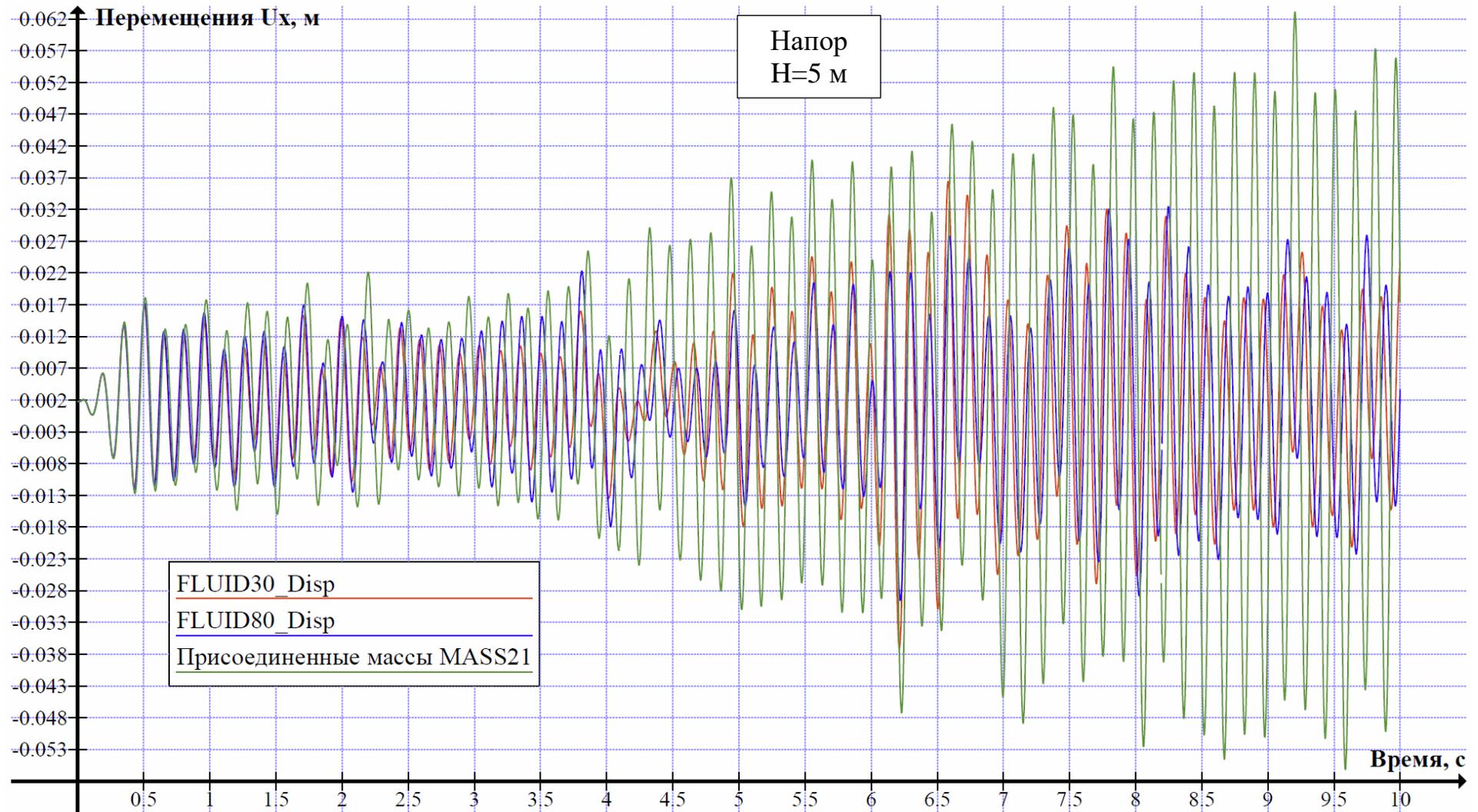


Рисунок – 3.4.5. Вариант №1. Напор – 5м. Горизонтальные перемещения узла на верхней грани (гребне) плотины (U_x , м). Красный график – элементы водного массива (FLUID30), синий – элементы водного массива (FLUID80), зеленый – вода учтена, как присоединенная масса (MASS21).

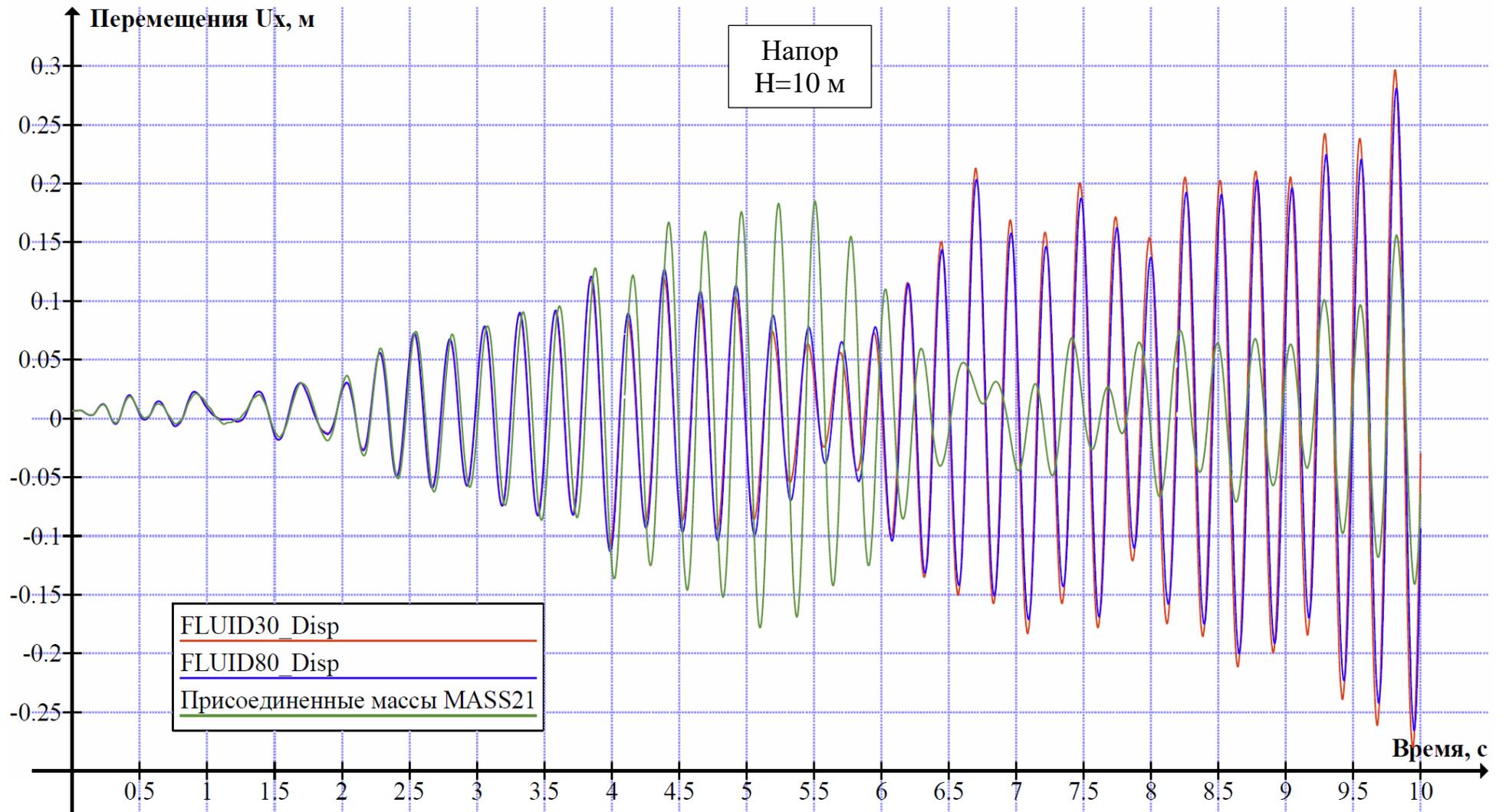


Рисунок – 3.4.6. Вариант №2. Напор – 10м. Горизонтальные перемещения узла на верхней грани (гребне) плотины (U_x , м). Красный график – элементы водного массива (FLUID30), синий – элементы водного массива (FLUID80), зеленый – вода учтена, как присоединенная масса (MASS21)

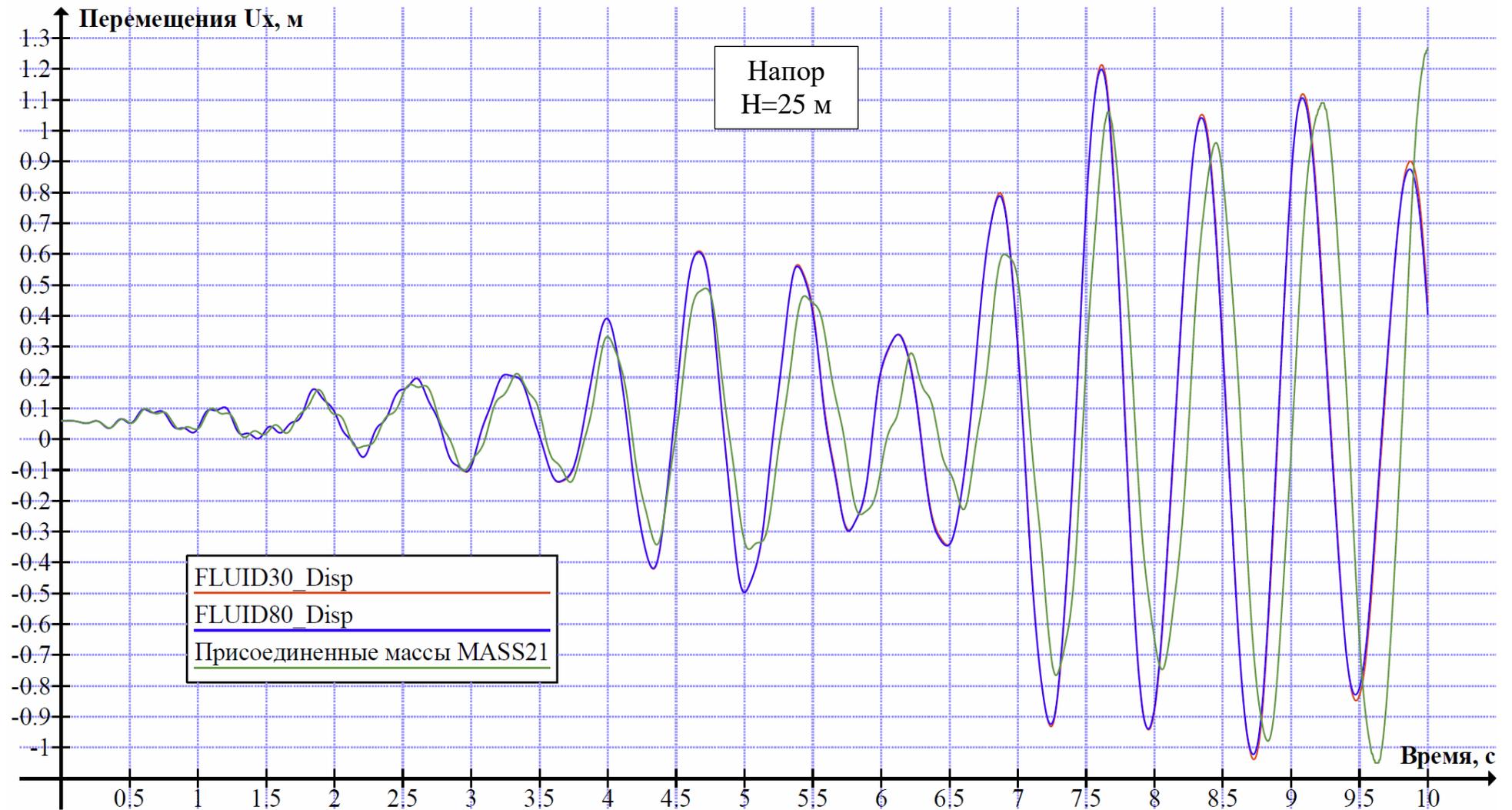


Рисунок – 3.4.7. Вариант №3. Напор – 25м. Горизонтальные перемещения узла на верхней грани (гребне) плотины (U_x , м). Красный график – элементы водного массива (FLUID30), синий – элементы водного массива (FLUID80), зеленый – вода учтена, как присоединенная масса (MASS21).

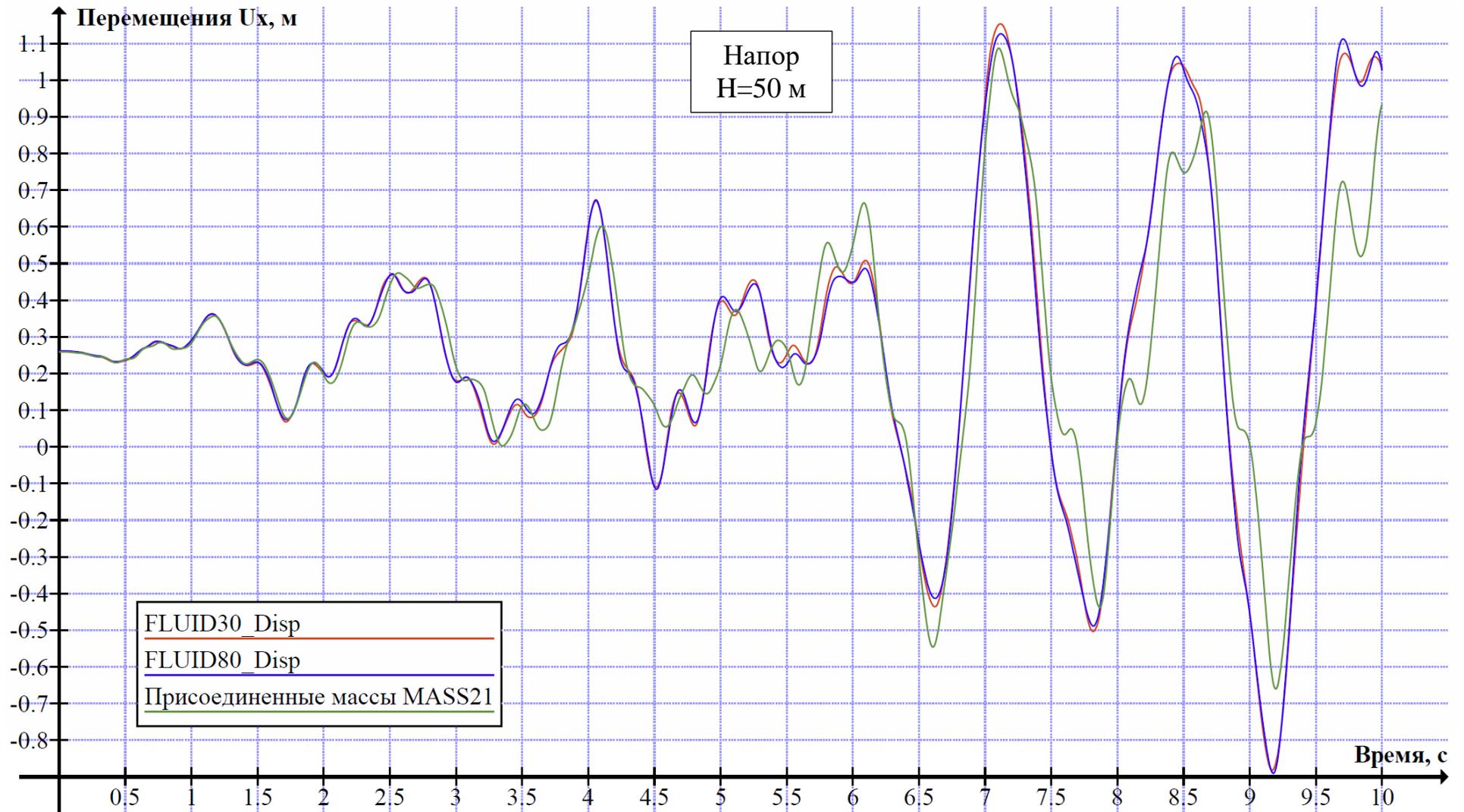


Рисунок – 3.4.8. Вариант №4. Напор – 50м. Горизонтальные перемещения узла на верхней грани (гребне) плотины (U_x , м). Красный график – элементы водного массива (FLUID30), синий – элементы водного массива (FLUID80), зеленый – вода учтена, как присоединенная масса (MASS21).

Анализ перемещений для *Варианта №1 (напор 5м)* показал значительное расхождение значений (начиная 4ой 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% (таблица 3.4.4.).

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 (напор 10м)* максимальные значения перемещений для модели с присоединенными массами по сравнению с акустическими и гидродинамическими элементами ниже на 35% (таблица 3.4.4.), но характер перемещений, начиная с 4ой секунды имеет другой вид (рисунок 3.4.6.).

Анализ перемещений для *Вариантов №3 и №4 (напор 25 и 50 м)* показал хорошее качественное и количественное совпадение результатов для акустических и гидродинамических элементов (FLUID30 и FLUID80), что объясняется снижением влияния поверхностной волны (таблица 3.4.4.).

Перемещения при задании присоединенных масс по максимальным значениям отличаются незначительно, но в характере перемещений имеется нарастающий сдвиг по фазе.

Таблица 3.4.4. Максимальные горизонтальные перемещения гребня плотины

Вариант модели	Максимальное по модулю горизонтальные перемещения U_x , м		
	Присоединенные массы (MASS21)	Акустические элементы (FLUID30)	Гидродинамические элементы (FLUID80)
Вариант №1 H = 5м	0.062 м	0.037 м	0.032 м
Вариант №2 H = 10м	0.184 м	0.294 м	0.280 м
Вариант №3 H = 25м	1.235 м	1.213 м	1.198
Вариант №4 H = 50м	1.086 м	1.153 м	1.126

Так как сейсмическая нагрузка прикладывалась к системе в качестве инерционной нагрузки, для получения истинного ускорения в рассматриваемой точке из ответной акселерограммы вычиталась исходная. На рисунках 3.4.9. – 3.4.10. приведены ускорения узла на верховой грани (гребне) плотины, для двух крайних вариантов расчетной схемы с напором 5 и 50 м. На график наложена акселерограмма исходного сейсмического воздействия. Полученные результаты не противоречат пониманию работы системы.

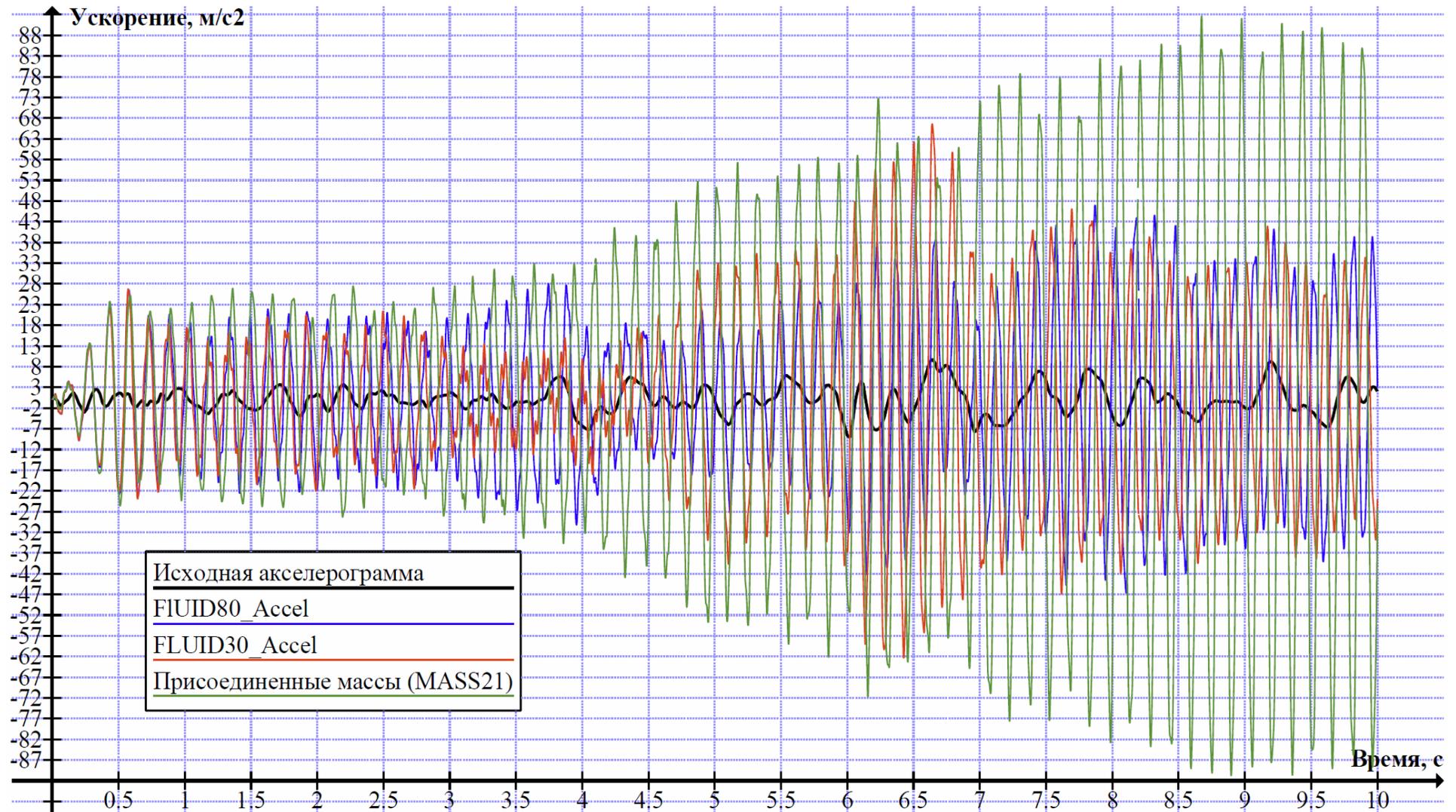


Рисунок – 3.4.9. Вариант №1. Напор – 5м. Горизонтальные ускорения узла на верхней грани (гребне) плотины (АХ, м/с²). Красный график – элементы водного массива (FLUID30), синий – элементы водного массива (FLUID80), зеленый – вода учтена, как присоединенная масса (MASS21), черный график – исходное сейсмическое воздействие.

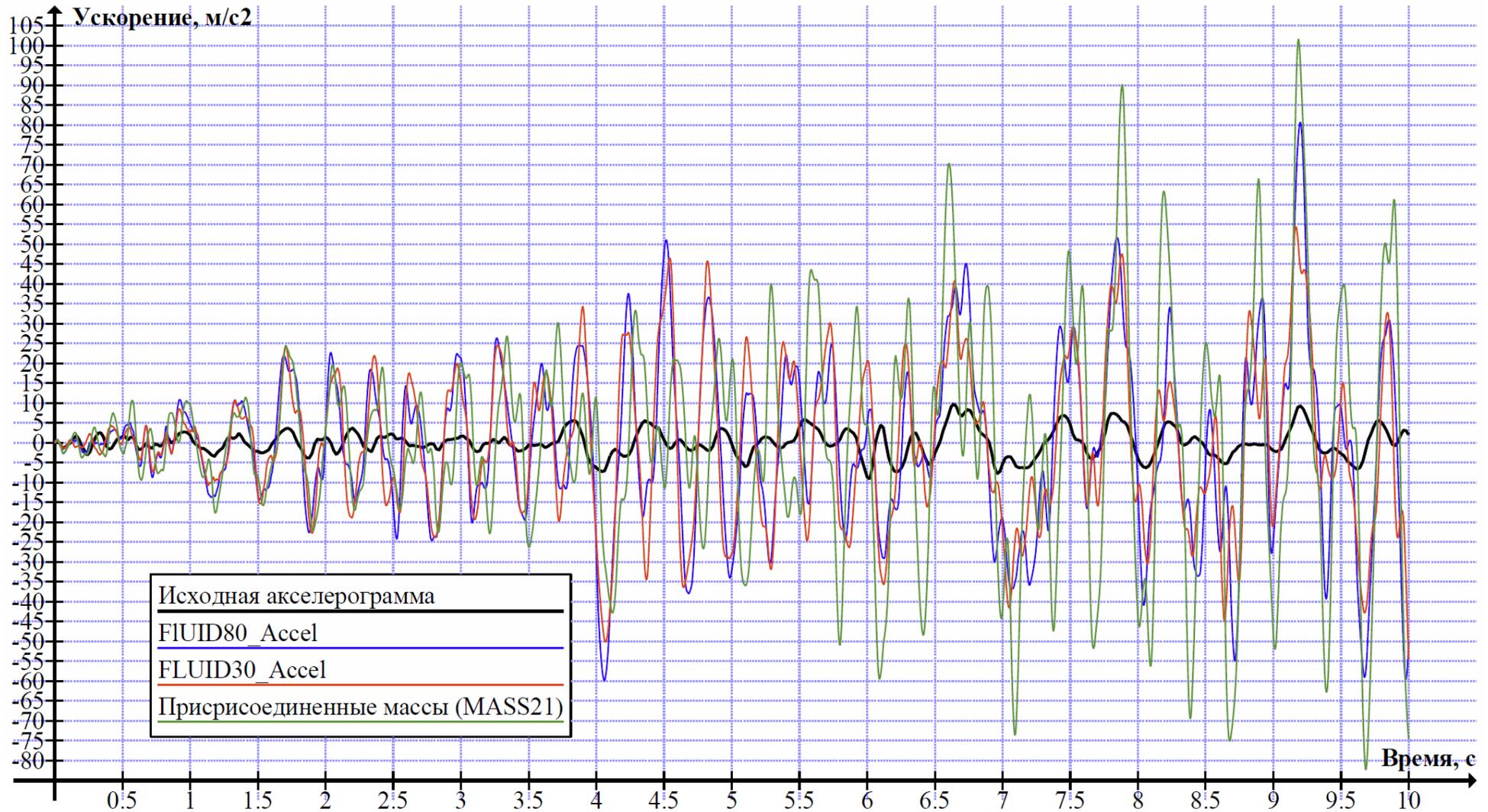


Рисунок – 3.4.10. Вариант №4. Напор – 50м. Горизонтальные ускорения узла на верхней грани (гребне) плотины (АХ, м/с²). Красный график – элементы водного массива (FLUID30), синий – элементы водного массива (FLUID80), зеленый – вода учтена, как присоединенная масса (MASS21), черный график – исходное сейсмическое воздействие.

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 3.4.5. представлены значения максимальной высоты волны возле сооружения для всех 4х вариантов расчетной модели (с высотой плотины 5, 10, 25 и 50 м).

Таблица 3.4.5. Максимальная высота волны возле сооружения, полученная на моделях с гидродинамическими элементами (FLUID80)

Максимальная высота волны возле сооружения, м	Вариант №1 Н = 5м	Вариант №2 Н = 10м	Вариант №3 Н = 25м	Вариант №4 Н = 50м
		0.59 м	0.87 м	1.27 м

В таблице 3.4.6. показана форма свободно поверхности жидкости в различные моменты времени для двух крайних вариантов расчетной схемы с напором 5 и 50 м. Анализ полученных результатов показывает уменьшение относительных колебаний поверхности жидкости при увеличении высоты плотины.

В таблице 3.4.7. показано распределение давления в акустических элементах в различные моменты времени для двух крайних вариантов расчетной схемы с напором 5 и 50 м. На представленных рисунках заметно колебание всего водного массива и соответствующее ему перераспределение давления.

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

Отличия результатов при моделировании жидкости элементами FLUID30 и FLUID80 проявляются только на малых глубинах водохранилища (до 10 м), когда вклад поверхностной волны в величину гидродинамического давления оказывается значительным.

Для расчета средненапорных и высоконапорных гидроузлов применимы все три перечисленных способа учета жидкости, однако учет колебания водного массива, при моделировании его акустическими или гидродинамическими элементами, позволяет более точно учесть влияние водохранилища.

Элементы FLUID30 продемонстрировали преимущества над элементами FLUID80 за счет более простого процесса моделирования и задания граничных условий, на фоне хорошо соотносящихся результатов на плотинах с напором выше 10 м.

Таблица 3.4.6. Форма свободно поверхности жидкости.
Жидкость моделировалась гидродинамическими элементами FLUID80.

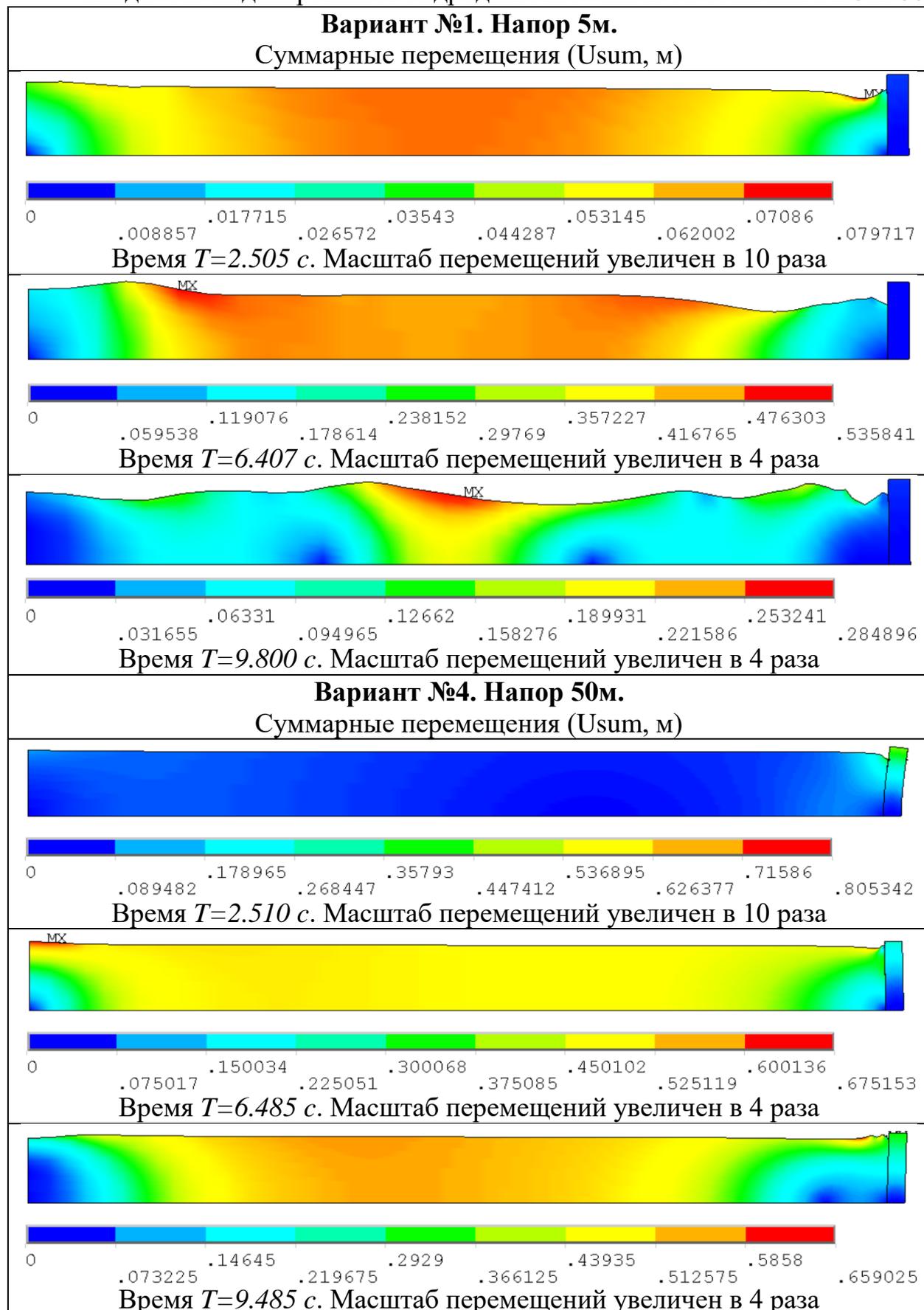
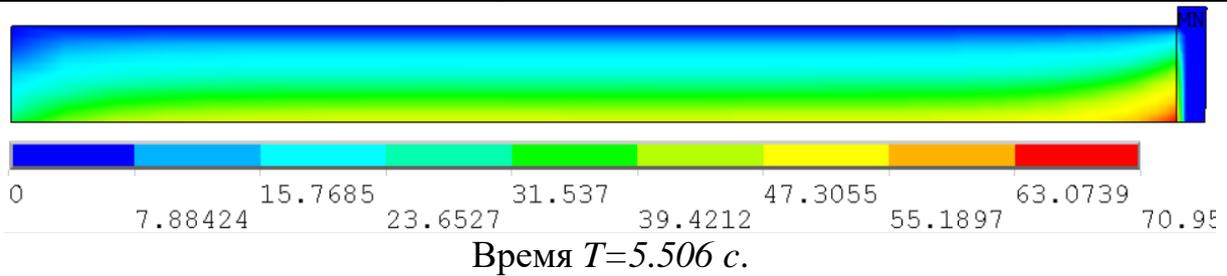
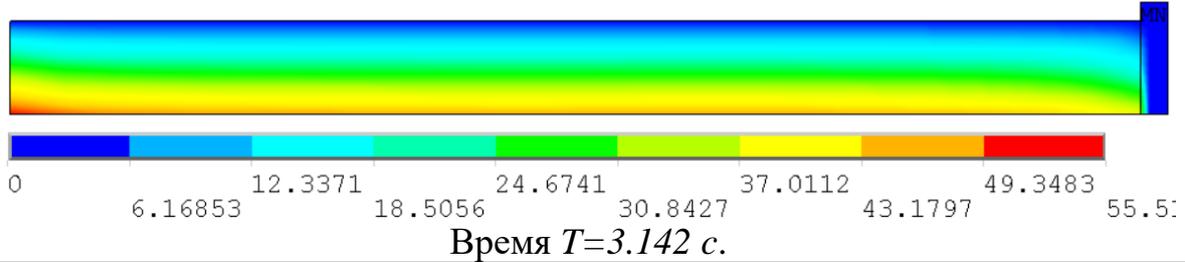
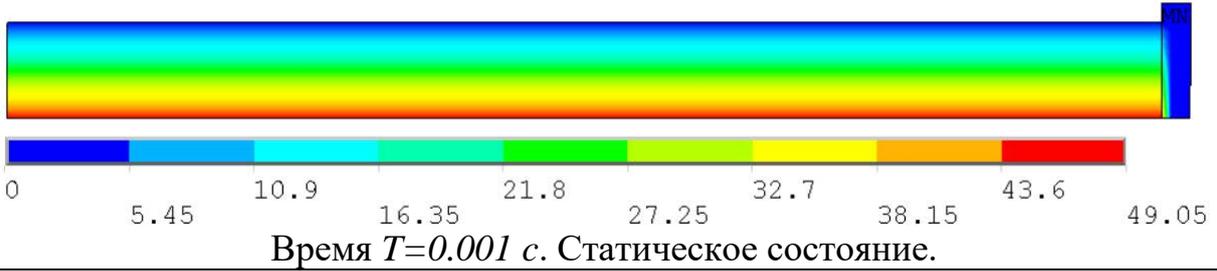


Таблица 3.4.7. Распределение внутреннего давления в водном массиве.

Жидкость моделировалась акустическими элементами FLUID30.

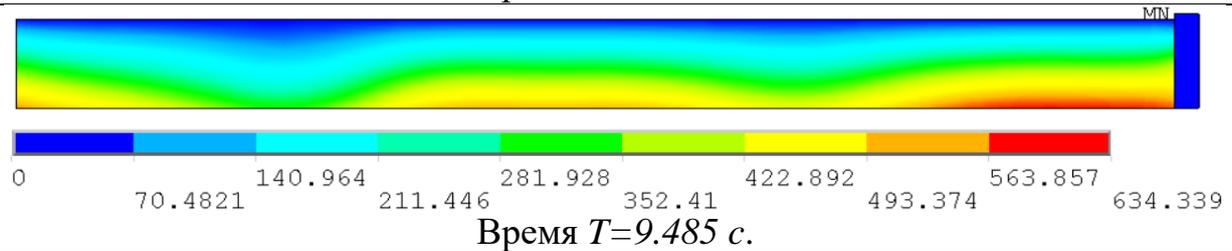
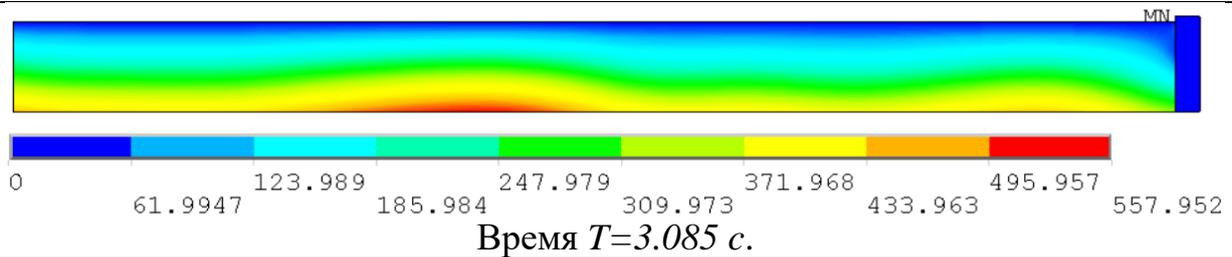
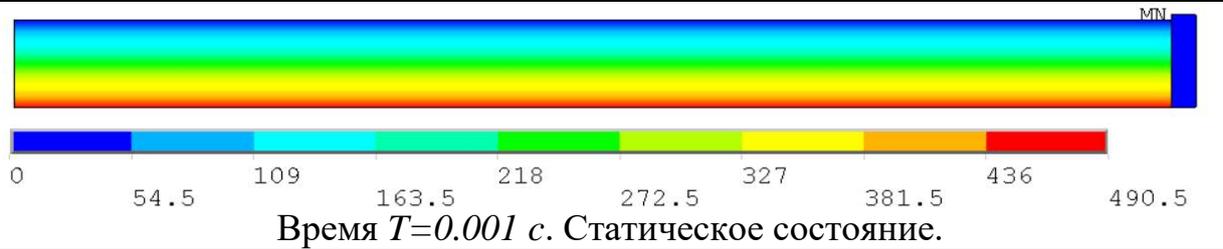
Вариант №1. Напор 5м.

Давление в массиве жидкости (P, кПа)



Вариант №4. Напор 50м.

Давление в массиве жидкости (P, кПа)



3.5. Сопоставление результатов различных методов численного моделирования динамического НДС трехмерной системы «основание - арочная плотина - водохранилище» на примере бенчмарка

Международная комиссия по большим плотинам (ICOLD) раз в 2 года, начиная с 1991 г., проводит международные семинары по вопросам численного моделирования высоконапорных гидроузлов различного типа. Основной целью семинара являются обмен опытом в области расчетного обоснования высоконапорных гидроузлов, интерпретация результатов различных расчетных методов, а также обсуждение их теоретической и практической значимости.

В 2011 году, на 12-ом международном семинаре, прошедшем в Испании, был опубликован бенчмарк «взаимодействие арочной плотины, водохранилища и основания при сейсмическом воздействии» [106]. В рамках этого бенчмарка, всем участникам, была предложена для расчетов конечноэлементная модель системы «основание - арочная плотина - водохранилище», с заданными свойствами материалов, граничными условиями и параметрами сейсмического воздействия, заданного трехкомпонентной акселерограммой. В связи с тем, что данный бенчмарк посвящен расчету на сейсмические воздействия арочной высоконапорной плотины, он был принят в качестве четвертого верификационного примера, в рамках настоящей работы [74].

3.5.1. Описание бенчмарка

Всем участникам данного семинара была поставлена задача расчета конкретного гидротехнического сооружения на заданные сейсмические воздействия. Условиями было разрешено использовать любой доступный программный комплекс, реализующий метод конечных элементов, включая собственные программные разработки.

3.5.1.1. Геометрическая и конечноэлементная модели системы «основание - арочная плотина - водохранилище»

Рассматриваемая в бенчмарке арочная плотина разработана специально для данной работы и не является аналогом реально существующей плотины.

Плотна симметрична центральному сечению и имеет следующие основные геометрические характеристики (рисунок 3.5.1.):

- Высота – 220 м;
- Ширина плотины на отметке гребня – 430 м;
- Ширина плотины в основании – 80 м;
- Толщина плотины на отметке гребня – 8 м;
- Толщина плотины в основании – 58 м.

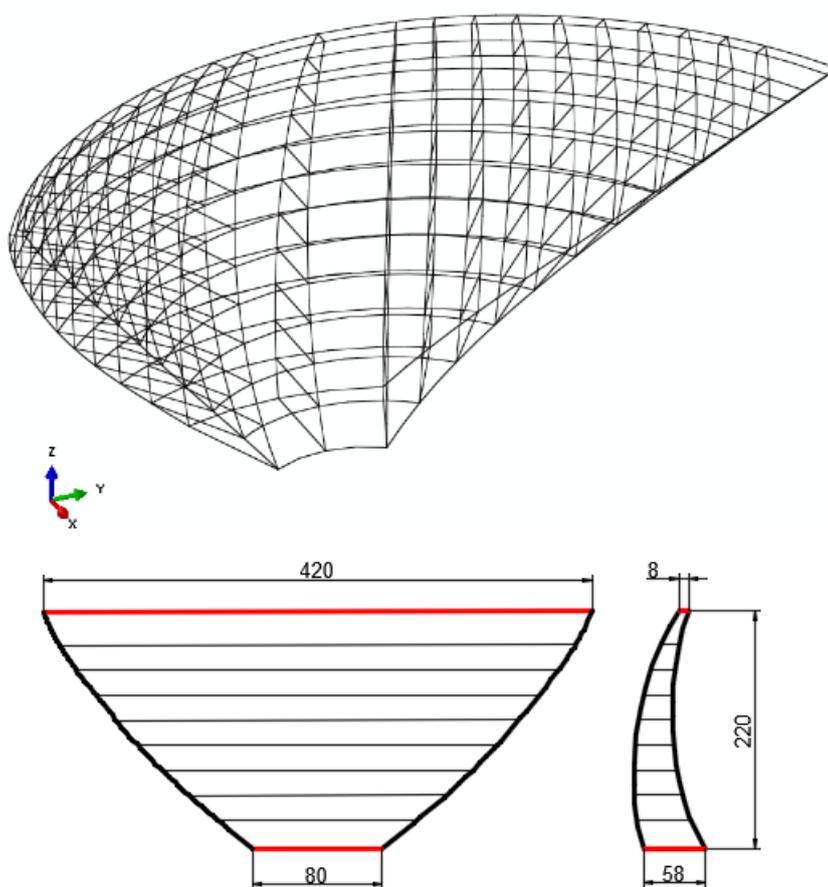


Рисунок – 3.5.1. Геометрические размеры арочной плотины, м

Модель основания также имеет плоскость симметрии. Общая высота массива грунта основания равна 500 м, а размеры основания в плане составляют 1000 на 1000 м. Водный массив водохранилища имеет длину, превышающую высоту плотины в два раза, 460 м (рисунок 3.5.2.).

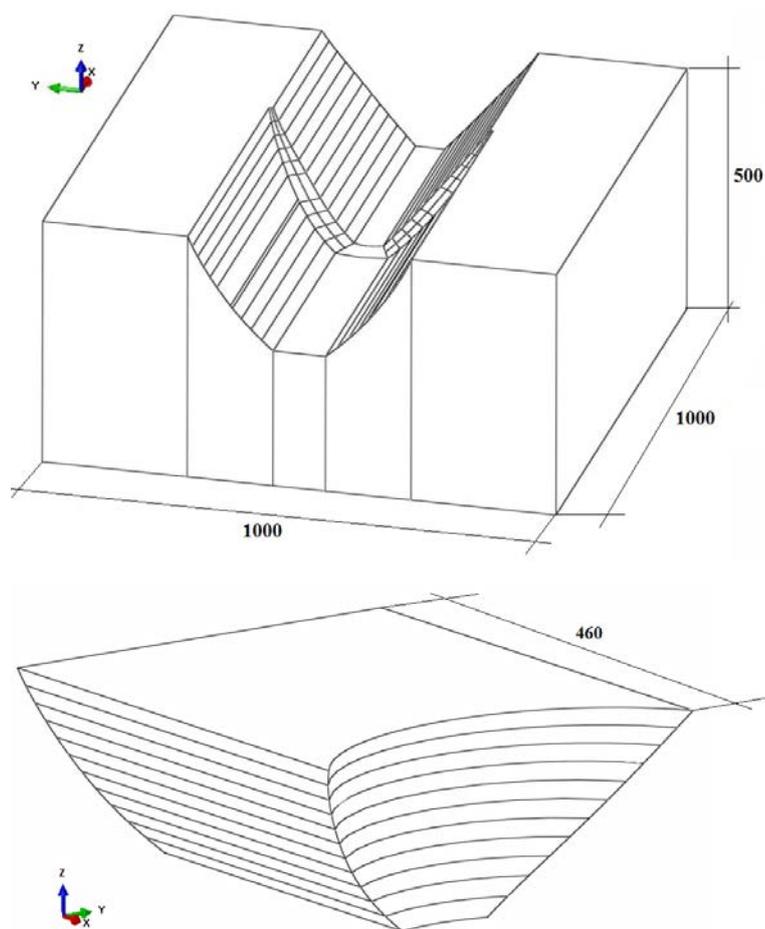


Рисунок – 3.5.2. Геометрические размеры грунтового и водного массива, м
Участникам бенчмарка были предложены на выбор два варианта разбиения расчетной модели на конечные элементы (рисунок 3.5.3.):

1. *Грубая сетка*, имеющая следующую размерность: элементов – 5 336, узлов – 26 184 (при использовании 20-и узловых конечных элементов);
2. *Подробная сетка*, имеющая следующую размерность: элементов – 8 076, узлов – 39 524 (при использовании 20-и узловых конечных элементов).

Следует отдельно отметить, что конечноэлементные сетки водного массива и основания (вместе с плотиной) не связаны, т.е. узлы на границе двух сред не совпадают (рисунок 3.5.4.).

Граничные условия одинаковы для всех участников. На боковых и нижней гранях грунтового массива ограничены линейные перемещения перпендикулярные плоскости грани. Плотина и основание считаются жестко связанными.

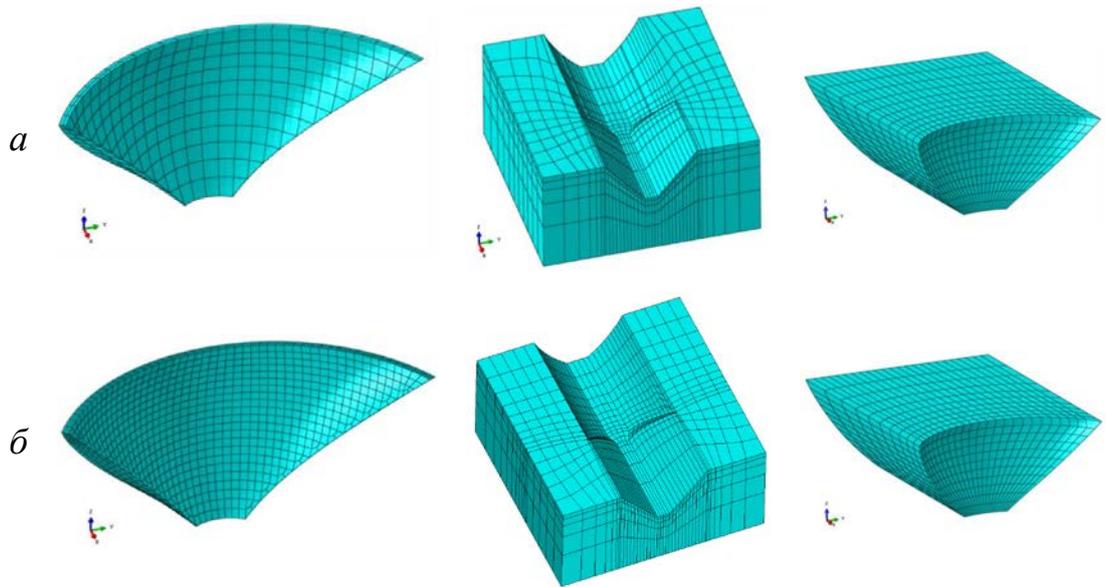


Рисунок – 3.5.3. Конечноэлементная модель системы «основание-водохранилище-арочная плотина». а – грубая сетка, б – подробная сетка.

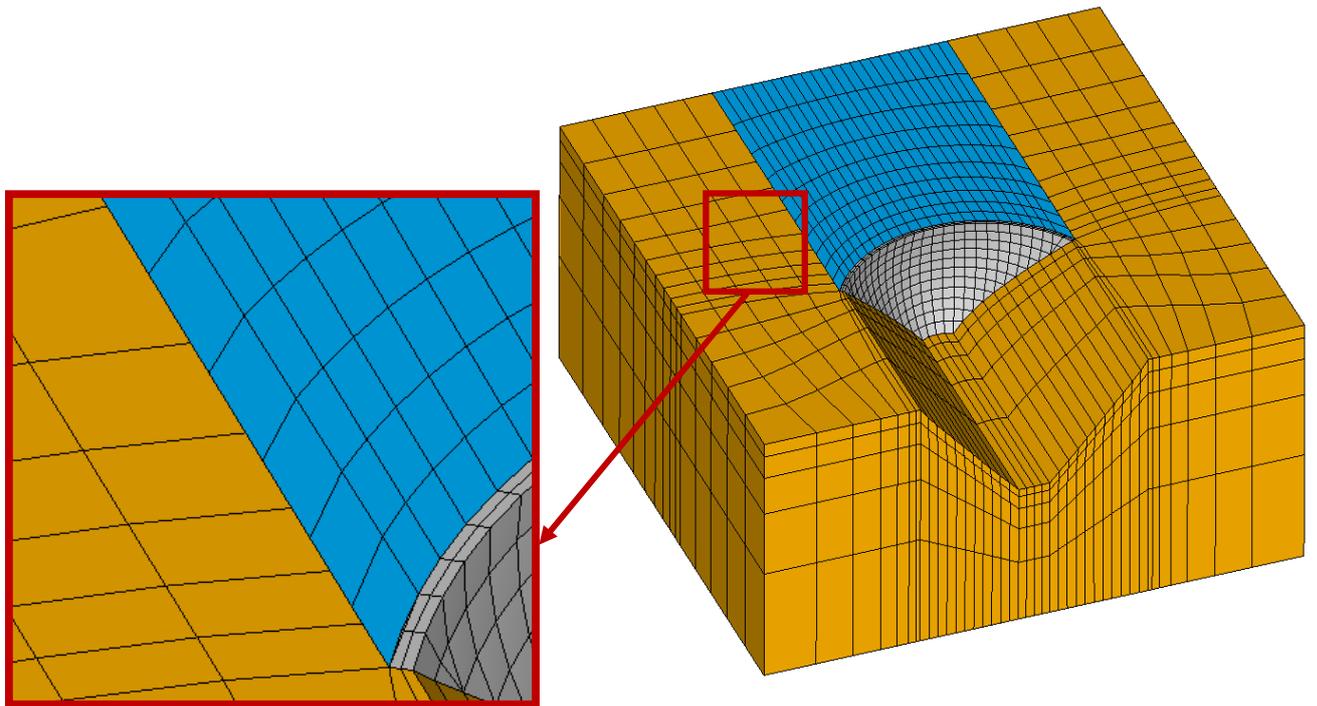


Рисунок – 3.5.4. Конечноэлементная модель системы «основание-водохранилище-арочная плотина». Показан фрагмент с несвязанными сетками.

3.5.1.2 Используемые материалы

Материалы основания, плотны и водохранилища, по условиям бенчмарка, считаются однородными и изотропными. Физико-механические характеристики материалов представлены в таблице 3.5.1.

Таблица 3.5.1. Физико-механические характеристики материалов и сред

Элемент модели	Плотность (кг/м ³)	Коэф. Пуассона	Модуль упругости (МПа)	Динамическая вязкость (Па·с)	Скорость звука в жидкости ν , м/с
Основание	0	0.2	25000	-	-
Плотина	2400	0.167	27000	-	-
Водохранилище	1000	-	-	0.001	1450

3.5.1.3. Способ учета водного массива

По условиям бенчмарка, учет жидкости разрешено одним из трех предложенных способов:

1. учет жидкости методом *присоединенных масс*, распределенных на напорной грани по Вестергарду [128];
2. моделирование жидкости *акустическими* конечными элементами;
3. моделирование жидкости конечными элементами с *возможностью учета поверхностных гравитационных волн*.

Жидкость можно принимать сжимаемой и несжимаемой. Выбранный участником вариант учета водного массива необходимо подробно описать.

3.5.1.4. Нагрузки

Исходное сейсмическое воздействие задано трехкомпонентной акселерограммой (рисунок 3.5.5.). Демпфирование, шаг интегрирования по времени и прочие расчетные параметры, участникам предлагалось принять по своему усмотрению, но обязательно отразить в своих отчетных результатах.

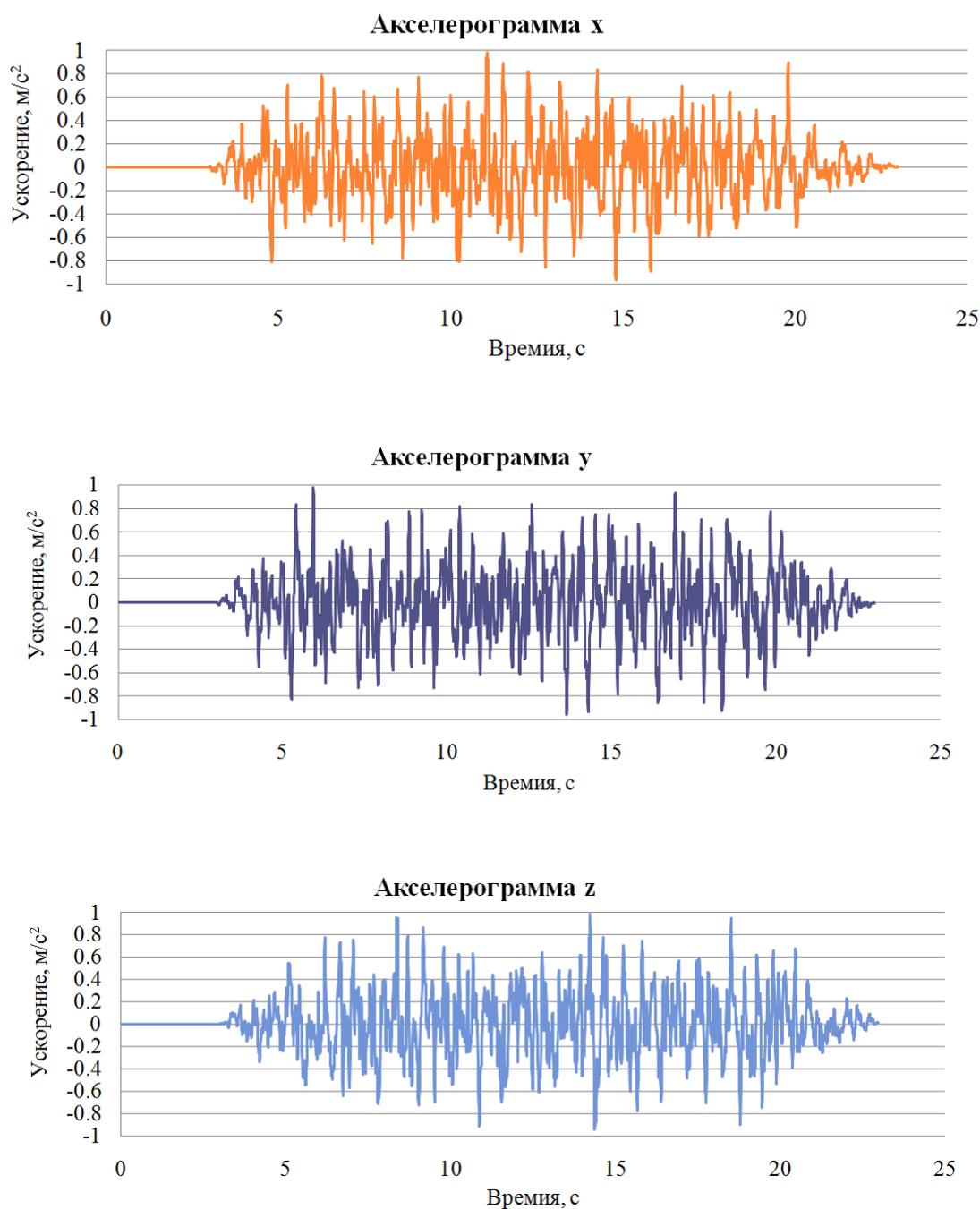


Рисунок – 3.5.5. Трёхкомпонентная акселерограмма ($a_{max} \sim 0.1g$)

3.5.1.5. Участники, программные комплексы и подходы

В представленном бенчмарке приняли участие 13 коллективов ученых (в том числе коллектив автора диссертационной работы) из 10 стран (Швейцарии, Голландии, Франции, Германии, Швеции, Италии, Ирана, Румынии, Австрии и России). Некоторые участники, по собственной инициативе, использовали несколько подходов при решении поставленной задачи, дополнительно учитывали контактное взаимодействие между плотиной и основанием,

нелинейную работу материала плотины, швы бетонирования и прочее. Однако для итогового сопоставления принимались результаты только одного расчета, вписывающегося в условия бенчмарка. В сводной таблице 3.5.2. представлены участники, используемые программные комплексы, тип конечноэлементной сетки и методы учета водного массива.

Таблица 3.5.2. Сводная таблица с участниками бенчмарка

№	Индекс	Участники	Программный комплекс	Модель жидкости	КЭ сетка
1	A	G. Maltidis	ABAQUS	Акустические элементы	Грубая
2	B	W.Kikstra, F. Sirumbal, G. Schreppers	DIANA	Акустические элементы	Грубая
3	C	G. Faggiani, P. Masarati	CANT-SD	Акустические элементы	Грубая
4	D	A. Tzenkov, A. Abiati, G. Gatto	DIANA	Акустические элементы	Грубая
5	E	M. Chambart	DIANA	Присоединенная масса (Westergaard)	Подробная
6	F	A. Popovici, C. Ilinca, R. Vârvorea	ABAQUS	Присоединенная масса (Westergaard)	Грубая
7	G	R. Malm, C. Pi Rito, C. Hassanzadeh, C. Rydell, T. Gasch	ABAQUS	Акустические элементы	Подробная
8	H	M. Brusin	FENASECCO NIPP	Присоединенная масса (Westergaard)	Подробная
9	I	S. Shahriari	ANSYS	Присоединенная масса (Westergaard)	Грубая
10	J	A. Frigerio, G. Mazzà	COMSOL	Акустические элементы	Грубая
11	K	A. Diallo, E. Robbe	CODE_ASTER	Присоединенная масса (Westergaard)	Грубая

12	L	Белостоцкий А.М., Дмитриев Д.С., Нгуен Тай Нанг Льонг, Щербина С.В.	ANSYS	Акустические элементы	Грубая
13	REF	М. Goldgruber (Автор бенчмарка)	ABAQUS	Акустические элементы	Грубая

3.5.1.6. Результаты расчетов

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

1. Расчет на собственные частоты и формы колебания плотины (сопоставлялись первые 10 частот и форм);
2. Статический расчет (сопоставлялись перемещения и напряжения в характерных сечениях);
3. Динамический расчет при сейсмическом воздействии, заданном трехкомпонентной акселерограммой (сопоставлялись перемещения и напряжения в характерных сечениях).

Для вывода перемещений и напряжений были выбраны характерные сечения в конструкции арочной плотины (рисунок 3.5.6). По результатам всех участников, были построены сводные графики, для сопоставительного анализа и визуализации расчетных данных.

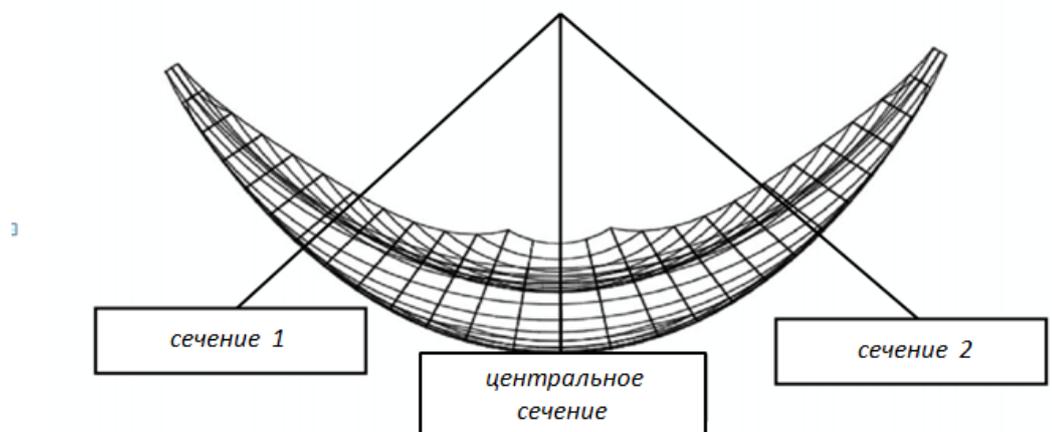


Рисунок – 3.5.6. Характерные сечения арочной плотины

3.5.2. Описание расчетных моделей

В качестве реализующего программного комплекса был принят ANSYS Mechanical. Для участия в описанном выше бенчмарке, автором было предложено рассмотреть два варианта моделирования жидкости:

1. Конечными элементами с возможностью учета поверхностных гравитационных волн (FLUID80) (модель №1);
2. Акустическими конечными элементами (FLUID30) (модель №2).

Применение каждого из этих подходов имеет свои особенности в части моделирования и задания граничных условий. Все они будут описаны ниже.

3.5.2.1. Расчетная модель №1 с элементами FLUID80

Для возможности использования восьми узловых элементов FLUID80 исходная конечноэлементная модель системы «основание - арочная плотина - водохранилище» была переработана в части разбиения водного массива. Конечные элементы FLUID80 могут иметь только форму гексаэдра, а в исходной модели, водный массив разбит с использованием тетраэдров. Изменение топологии сетки привело к незначительному увеличению размерности расчетной модели.

Также для задания ограничений на поверхности контакта жидкости с основанием и плотиной, конечноэлементная сетка водохранилища была изменена таким образом, чтобы ее узлы совпадали с узлами плотины и основания (рисунок 3.5.7.). Это было сделано для упрощения процедуры объединения перемещений у контактных узлов. Для объединения перемещений, перпендикулярных контактной поверхности, узловые системы координат всех контактных узлов были развернуты соответствующим образом.

Для разбиения объема плотины и основания в данном случае были использованы объемные восьми узловые элементы типа SOLID185. Плотина и основание приняты жесткосвязанными, материалы линейно-упругими (физико-механические свойства приняты из условий бенчмарка).

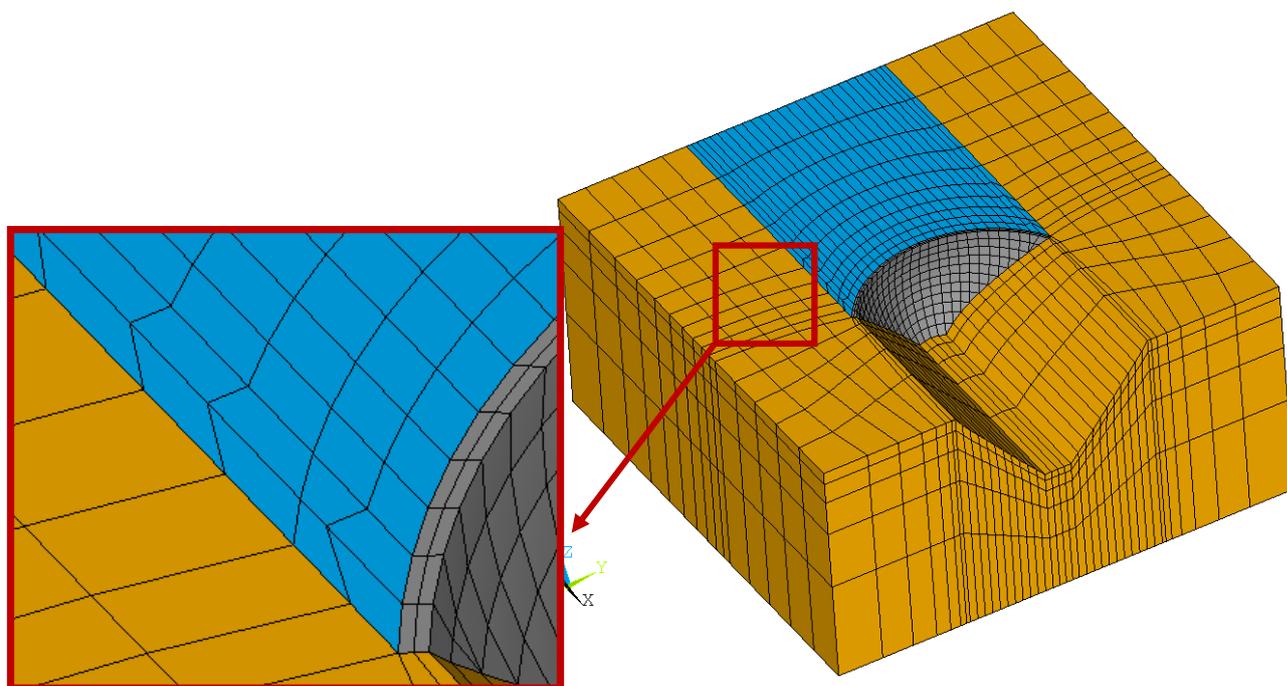


Рисунок – 3.5.7. Конечноэлементная модель системы «основание-водохранилище-арочная плотина». Показан фрагмент со связанными сетками

На всех внешних поверхностях основания, кроме русла и дневной поверхности, ограничивались перемещения по нормали. Ускорение свободного падения задавалось равным 9.81 м/с^2 .

3.5.2.2. Расчетная модель №2 с элементами FLUID30

Для модели с акустическими элементами FLUID30 использовалась исходная конечноэлементная модель с грубой сеткой. Для объединения конечноэлементных сеток водохранилища с основанием и плотиной использовалась команда CPINTF, которая позволяет с помощью специальных уравнений ограничений связать узловые степени свободы объединяемых сеток.

В качестве граничных условий на всех внешних поверхностях основания, кроме русла и верхней поверхности, ограничивались перемещения по нормали (рисунок 3.5.8.). На контактных поверхностях основание-водохранилище и плотина-водохранилище назначалось условие FSI и объединялись степени свободы по трем направлениям. На торцевой поверхности водохранилища ограничивались перемещения по нормали. На свободной поверхности жидкости назначалось нулевое давление. Всем торцевым элементам водохранилища и

элементам, контактирующим с плотиной и основанием, назначалась опция акустического анализа с FSI интерфейсом (четыре степени свободы – давление и три перемещения), остальным элементам водохранилища устанавливалась опция без FSI интерфейса (одна степень свободы – давление). У всех узлов на свободной поверхности жидкости обнулено давление.

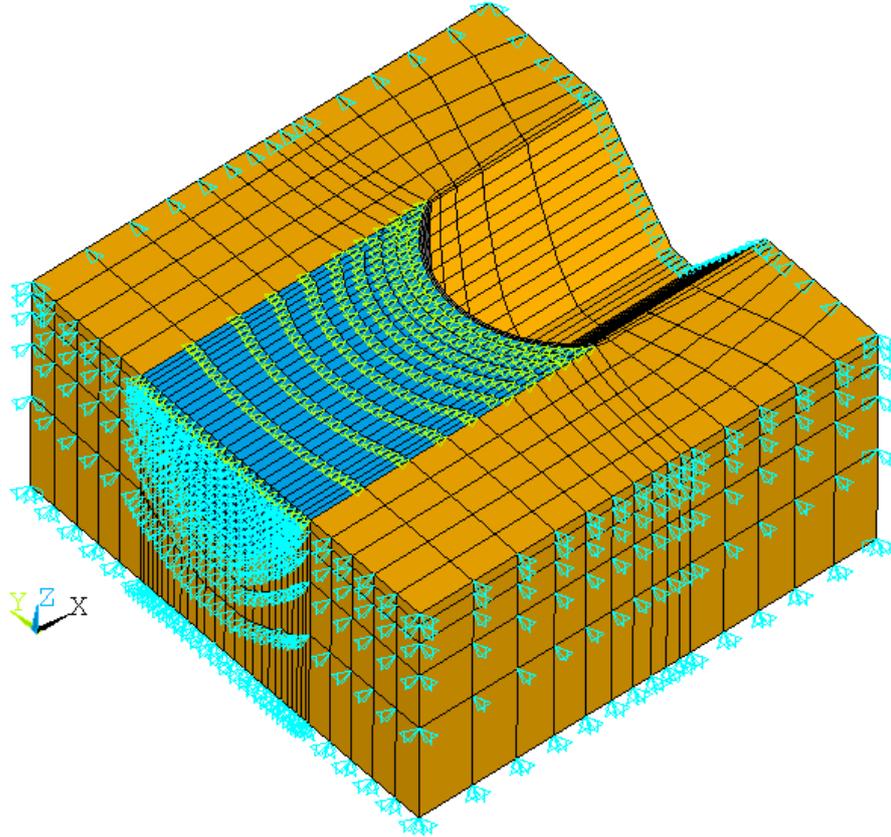


Рисунок – 3.5.8. Конечноэлементная модель с отображением граничных условий (элементы жидкости – FLUID30)

3.5.3. Параметры расчета

Для вычисления собственных частот и форм колебаний гидроупругой системы использовался блочный метод Ланцоша. Для решения задачи в динамической постановке применялся неявный метод Ньюмарка. Шаг интегрирования по времени для сейсмического расчета принимался равным $\Delta t = 0.01$ с. В расчетах задавалось 5% общесистемное демпфирование Релея, константы демпфирования имеют следующие значения ($\alpha=0.90122$ и $\beta=0.002634$).

3.5.4. Анализ результатов и выводы

3.5.4.1. Результаты расчета модели №1 (FLUID80)

Статический расчет модели №1 с элементами FLUID80 показал некорректные результаты по перемещениям водного массива. Подробный анализ данной модели показал связь между формой конечных элементов и значениями перемещений. При наличии наклонных граней у массива жидкости, как в модели №1 (рисунок 3.5.8.), перемещения контактных узлов жидкости приобретают случайный характер. Дальнейшие исследования этого вопроса подтвердили невозможность применения элементов FLUID80 для статических расчетов объемных задач, где массив жидкости ограничен невертикальными поверхностями [27]. В рамках данного бенчмарка было решено полностью отказаться от элементов FLUID80 и дальнейшие расчетные исследования проводить на модели №2.

3.5.4.2. Результаты расчета модели №2 (FLUID30)

Вычислены первые 10 собственных частот и форм системы «основание-водохранилище - арочная плотина» при полностью заполненном водохранилище. Результаты представлены на рисунке 3.5.9. и в таблицах 3.5.3. и 3.5.4.

Первые две низшие частоты участников Н и I оказались немного ниже среднего значения, показанного другими участниками, в 1.5 Гц, это, по мнению автора, обусловлено использованием метода присоединенных масс. Стоит заметить, что участники, использовавшие программу DIANA (B, D и E), получили более высокие частоты, начиная с третьей. Это также относится к участнику К, который использовал программное обеспечение с открытым исходным кодом Code_Aster. Все остальные участники, включая автора, получили достаточно близкие собственные частоты в диапазоне первых 10 форм.

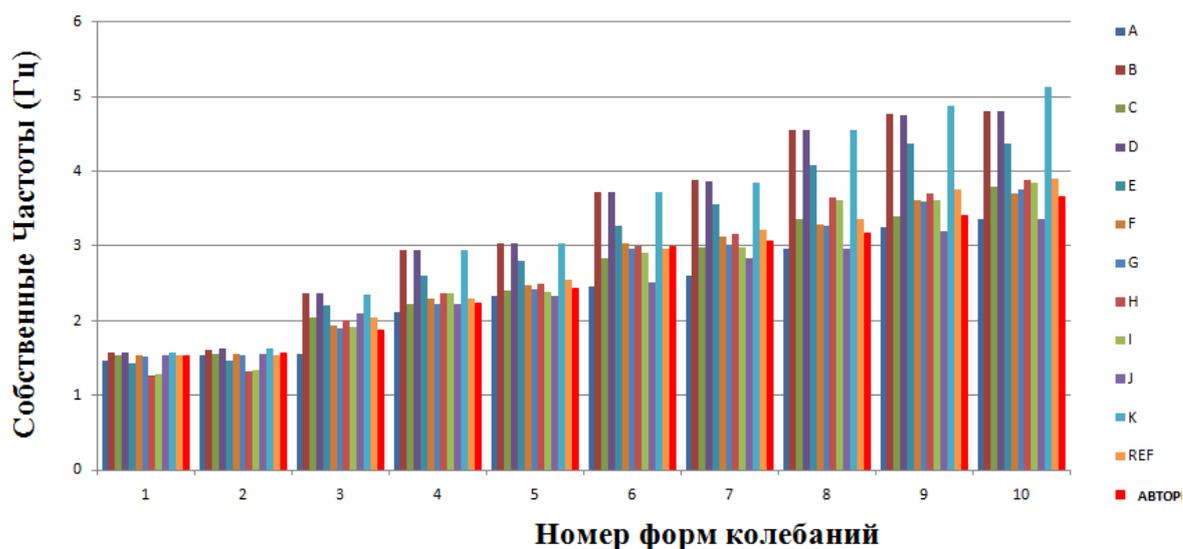
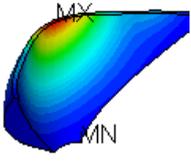
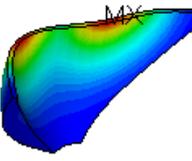
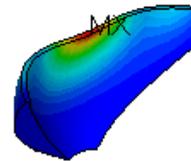
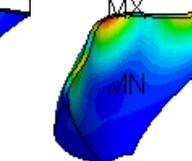
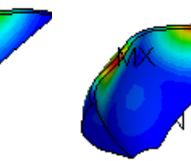
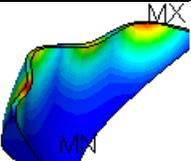
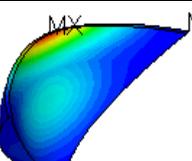
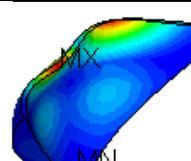
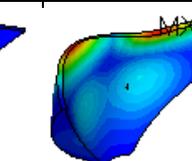
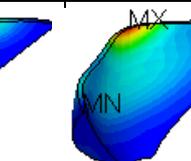


Рисунок –3.5.9. Конечноэлементная модель с отображением граничных условий (элементы жидкости – FLUID30)

Таблица 3.5.3. Частоты собственных колебаний арочной плотины, полученные всеми участниками бенчмарка

Участники		Частоты, Гц									
№	Инд	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	A	1.47	1.54	1.55	2.11	2.33	2.46	2.61	2.97	3.25	3.37
2	B	1.57	1.60	2.36	2.94	3.04	3.72	3.88	4.56	4.78	4.80
3	C	1.54	1.55	2.05	2.22	2.41	2.83	2.98	3.37	3.40	3.79
4	D	1.57	1.62	2.36	2.94	3.04	3.72	3.87	4.56	4.76	4.80
5	E	1.43	1.47	2.21	2.61	2.81	3.27	3.56	4.09	4.37	4.37
6	F	1.54	1.56	1.93	2.30	2.48	3.04	3.12	3.29	3.61	3.71
7	G	1.51	1.54	1.90	2.22	2.42	2.96	3.01	3.28	3.59	3.76
8	H	1.26	1.32	2.01	2.36	2.50	3.00	3.17	3.65	3.70	3.88
9	I	1.28	1.33	1.91	2.37	2.38	2.91	2.98	3.61	3.62	3.85
10	J	1.54	1.55	2.09	2.22	2.33	2.51	2.83	2.96	3.19	3.37
11	K	1.57	1.62	2.35	2.95	3.03	3.72	3.85	4.56	4.88	5.13
12	L	1.53	1.56	1.87	2.23	2.43	2.99	3.06	3.17	3.40	3.65
13	REF	1.54	1.54	2.05	2.29	2.54	2.96	3.21	3.36	3.76	3.91

Таблица 3.5.4. Низшие десять собственных частот и форм колебаний арочной плотины (модель №2 FLUID30)

№ П/П	1	2	3	4	5
Форма и частота. Гц					
	1.53	1.56	1.87	2.23	2.43
№ П/П	6	7	8	9	10
Форма и частота. Гц					
	2.99	3.06	3.17	3.40	3.65

3.6 Выводы по главе 3

1. Для верификации разрабатываемой методики уточненного динамического анализа напряженно-деформированного состояния трехмерной системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» использована серия представительных тестовых примеров, имеющих точное аналитическое решение, экспериментальное или альтернативное численное подтверждение.

2. На задаче по определению собственных частот и форм колебания жидкости и сопоставлению их с аналитическим решением было показано, что и гидродинамические (FLUID80) и акустические (FLUID30) элементы могут быть использованы для задач данного класса и дают результаты, хорошо соотносящиеся с аналитическим решением. Не смотря на значительные упрощения в отображении формы колебаний жидкости при использовании акустических элементов (FLUID30) возможность их применения подтверждается хорошим совпадением по количественному показателю (частота) и совпадением частот высших собственных колебания резервуара (когда проявляются формы самого резервуара).

3. На втором верификационном примере было подтверждено, что при решении задач, где основной интерес представляет не только динамическое НДС сооружения, контактирующего с водой, но и форма свободной поверхности жидкости, элементы FLUID80 могут быть успешно применены. Лагранжевая постановка, используемая для моделирования жидкости, несмотря на ряд упрощений и допущений, в ряде случаев позволяет получать хорошо соотносящиеся с экспериментальными данными результаты.

4. На третьей верификационной задаче продемонстрировано, что для низконапорных гидроузлов ($H < 10$ м) учет водохранилища методом присоединенных масс дает завышенные результаты по перемещениям и общая картина НДС получается искаженной. Для гидротехнических сооружений с напором до 10 м более адекватную картину НДС показывают модели с

моделированием жидкости акустическими (FLUID30) или гидродинамическими (FLUID80) элементами.

5. В рамках третьего верификационного примера было проведено сопоставление результатов с применением элементов FLUID30 и FLUID80. И полученные результаты хорошо соотносятся для средненапорных ($H=10-40$ м) и высоконапорных ($H > 40$ м) сооружениях как качественно (значения перемещений и ускорений), так и количественно (картина перемещений во времени). Для низконапорных гидротехнических сооружений ($H < 10$ м) результаты имеют незначительное расхождение, что объясняется влиянием поверхностной волны, которую позволяют учесть гидродинамические элементы (FLUID80).

6. По результатам третьего верификационного примера определены границы применимости трех различных методов учета водохранилища, для плотин с вертикальной напорной гранью различной высоты.

7. В ходе проведения расчетов по четвертому верификационному примеру была выявлена особенность элементов FLUID80, которая является причиной некорректных результатов в статических и динамических расчетах объемных задач, где водный массив ограничен криволинейными или наклонными поверхностями. Данная особенность накладывает ряд ограничений на применение элементов FLUID80 и позволяет использовать их в основном при расчете гидротехнических сооружений с вертикальными напорными гранями, например, судоходных шлюзов и различных доковых конструкций.

8. Акустические элементы FLUID30 по результатам четвертой верификационной задачи показали возможность их применения при моделировании динамического НДС системы «арочная плотина – водохранилище - основание» в программном комплексе ANSYS Mechanical. Данная методика показала 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.

9. На серии верификационных задач, имеющих точное аналитическое, эталонное экспериментальное или альтернативное численное подтверждение, показано соответствие результатов и обоснованы диапазоны применимости элементов FLUID80 и FLUID30 при динамических расчетах связанных систем, в том числе гидротехнических сооружений.

ГЛАВА 4. АПРОБАЦИЯ УТОЧНЕННОЙ МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКОГО НДС ТРЕХМЕРНОЙ СИСТЕМЫ «ОСНОВАНИЕ – ВОДОХРАНИЛИЩЕ – ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СООРУЖЕНИЕ» ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

4.1. Постановка задачи расчетных исследований

Апробация разработанной уточненной численной методики моделирования динамического НДС трехмерной системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» при сейсмических воздействиях выполнена на реальном гидротехническом сооружении при действии постоянных, статических нагрузок (собственный вес конструкций, нагрузки от оборудования, гидростатическое давление) и сейсмического воздействия (заданного трехкомпонентной, 8 - бальной акселерограммой для рассматриваемого района) с использованием программного комплекса ANSYS Mechanical [25].

В качестве объекта исследования выбрано низконапорное гидротехническое сооружение - шлюз-регулятор №1 (ШР-1) Кубанских ГЭС (рисунок 4.1.1.). Данное сооружение предназначено для деления потока воды между ГАЭС, находящейся в составе «Каскада Кубанских ГЭС» и Большим Ставропольским каналом в республике Карачаево-Черкесия. В весенне-летний период излишки воды забираются из Большого Ставропольского канала и через гидроагрегаты ГАЭС и холостой водосброс наполняют Кубанское водохранилище. В осенне-зимний период гидроагрегаты ГАЭС работают в насосном режиме и подают воду из водохранилища в Большой Ставропольский канал.

Шлюз-регулятор № 1 представляет собой трехпролетный водослив с широким порогом, выполненный из монолитного железобетона. Ширина каждого пролета 6 м, высота 2.3 м. Абсолютная отметка порога на входе и выходе равна 639.3 м. Напор на пороге при НПУ составляет 5.95 м. Расчетная пропускная

способность ШР-1 составляет 150 м³/с. Плановые размеры подводной части здания рамы 18.4×10.0 м, высота здания - 8.0 м (рисунки 4.1.2. - 4.1.3.).



Рисунок – 4.1.1. Расположение шлюза-регулятора №1 на карте (Google Maps).

В пролетах предусмотрены 3 пары пазов для аварийно-ремонтных, рабочих и ремонтных затворов. Рабочий - плоский, колесный, глубинный со стороны НБ. Аварийно-ремонтный – плоский, скользящий, двухсекционный, поверхностный со стороны НБ. Ремонтный – плоский, скользящий, поверхностный со стороны ВБ. Маневрирование рабочими затворами производится за счет стационарных подъемных механизмов, суммарный вес которых составляет 12.3 т. Ремонтные и аварийно-ремонтные затворы опускаются с помощью катушек лебедки весом 13.3 т. Основные весовые характеристики механического оборудования приведены в таблице 4.1.1. Основные физико-механические характеристики используемых материалов указаны в таблице 4.1.2.

Таблица 4.1.1. Весовые характеристики механического оборудования ШР-1

№	Наименование оборудования	Количество	Масса, т	
			Единицы	Всего
1	Затвор рабочий плоский, колесный, донный 6.0×2.3	3	5.82	17.46
2	Затвор аварийно-ремонтный плоский, колесный, секционный, донный 6.0×6.2	1	12.39	12.39
3	Затвор ремонтный плоский, скользящий, секционный, поверхностный 6.0×3.65	1	4.95	4.95
4	Закладные части паза рабочего затвора	3	4.22	12.66
5	Закладные части паза аварийно-ремонтного затвора	3	3.76	11.28
6	Закладные части паза ремонтного затвора	3	1.09	3.27
7	Стационарный механизм для маневрирования рабочими затворами	3	4.1	12.3
8	Лебедка катучая	1	13.3	13.3

Таблица 4.1.2. Физико-механические характеристики материалов

№	Элемент модели	Характеристика материала	Значение
1	Основание. Насыпные и погребные почвы (верхний слой)	Плотность ρ , кг/м ³ :	1860
		Модуль упругости E , Па:	$1.5 \cdot 10^7$
		Коэффициент Пуассона ν :	0.3
2	Основание. Коренные грунты	Плотность ρ , кг/м ³ :	1980
		Модуль упругости E , Па:	$1.5 \cdot 10^7$
		Коэффициент Пуассона ν :	0.3
3	Сооружение. Железобетонные конструкции.	Плотность ρ , кг/м ³ :	2200
		Модуль упругости E , Па:	$2.7 \cdot 10^7$
		Коэффициент Пуассона ν :	0.2
4	Сооружение. Металлические конструкции.	Плотность ρ , кг/м ³ :	27850
		Модуль упругости E , Па:	$2.1 \cdot 10^{11}$
		Коэффициент Пуассона ν :	0.3
5	Водный массив	Плотность ρ , кг/м ³ :	1000
		Динамическая вязкость η , Па·с:	0.001
		Модуль упругости E , Па:	$2.068 \cdot 10^9$
		Скорость звука в среде v , м/с	1450

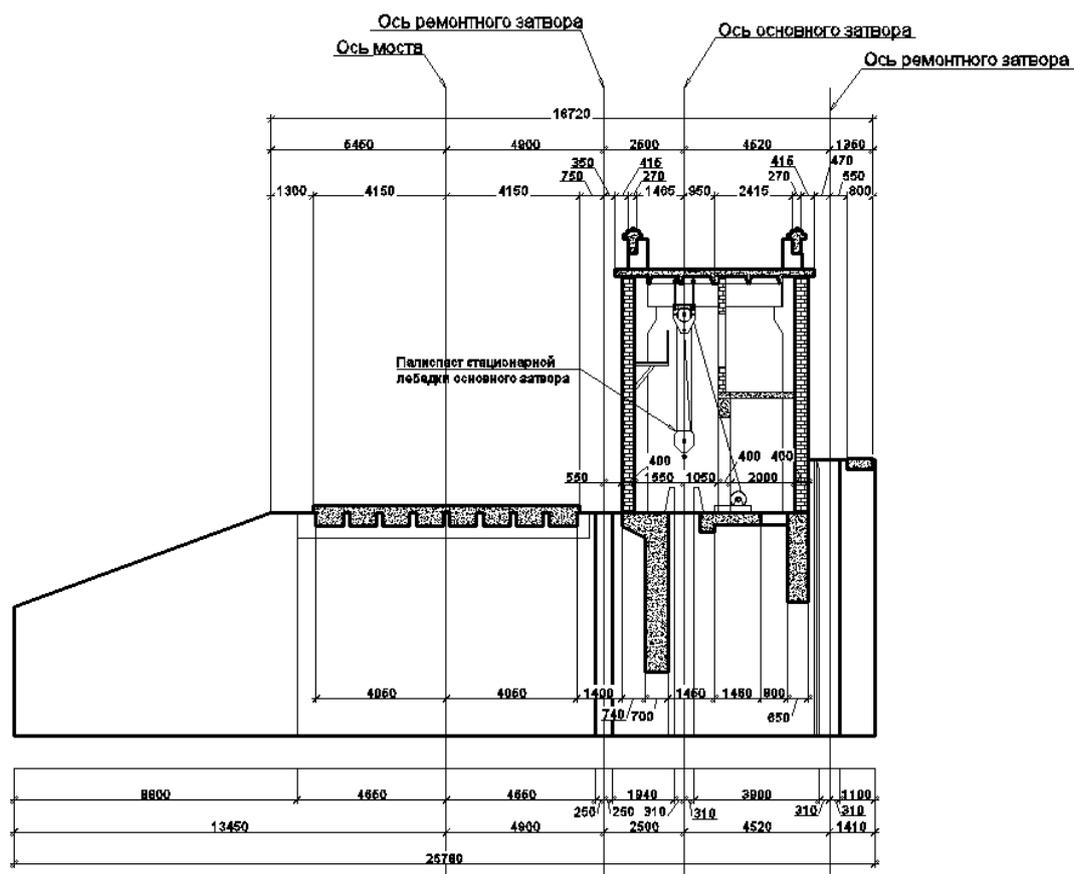


Рисунок – 4.1.2. Поперечный разрез шлюза-регулятора №1

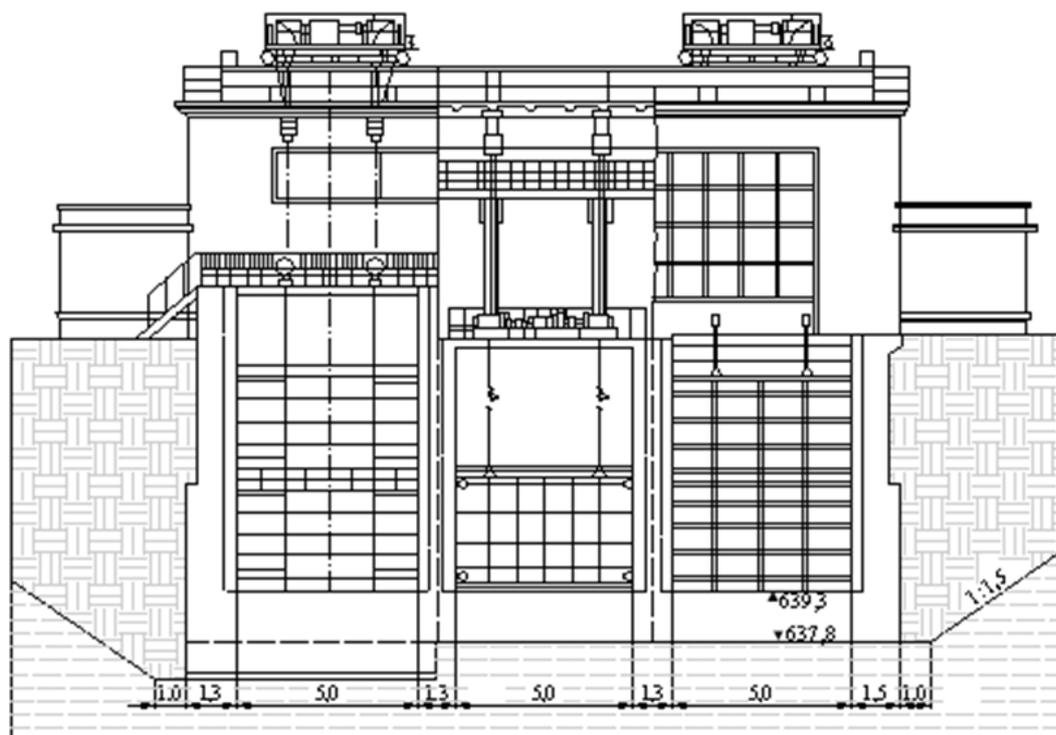


Рисунок – 4.1.3. Продольный разрез шлюза-регулятора №1 (вид со стороны верхнего бьефа)

Надводная часть шлюза представлена одноэтажным каркасным зданием со следующими размерами: в плане 23.45 x 5.4 м, высотой 7.5 м. Колонны и подкрановые балки выполнены из сборного железобетона, стены (ограждающие конструкции) и перегородки кирпичные. Несущими конструкциями кровли являются железобетонные плиты, утеплитель – шлак, кровля мягкая из четырех слоев рубероида. Площадь производственных помещений составляет 120 м². Над пролетами водослива устроен автодорожный мостовой переезд. Балки, на которых лежат плиты дорожного полотна шарнирно опираются на бычки монолитной части.

Подводящий и отводящий каналы имеют крепление откосов каменной наброской, а в месте сопряжения с сооружением крепление выполнено железобетонными плитами.

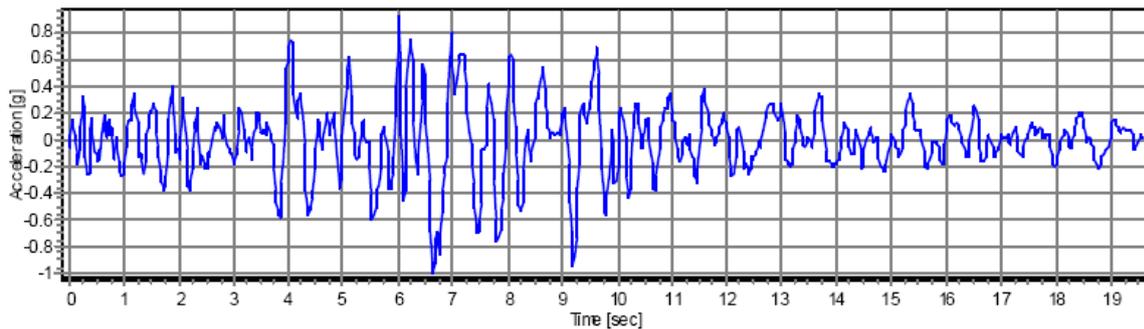
Район расположения рассматриваемого сооружения согласно [73] имеет фоновую сейсмическую интенсивность 8 баллов по шкале MSK-64. При расчете ШР-1 использовались исходные акселерограммы, рекомендованные для сейсмических расчетов рассматриваемого района. Из отчета по сейсмическому микрорайонированию участка основных сооружений ГАЭС [42], в котором представлен набор исходных акселерограмм, была выбрана одна трехкомпонентная акселерограмма (рисунок 4.1.4.). Критерием выбора было максимальное пиковое значение и наибольший спектр ускорений. Акселерограммы этого набора нормированы к значению $A_{\max}=1g$:

- горизонтальная акселерограмма по X ($A_{\max}\Gamma_1=0,25g$);
- горизонтальная акселерограмма по Y ($A_{\max}\Gamma_2=0,8A_{\max}\Gamma_1$);
- вертикальная акселерограмма по Z ($A_{\max}B=0,7A_{\max}\Gamma_1$).

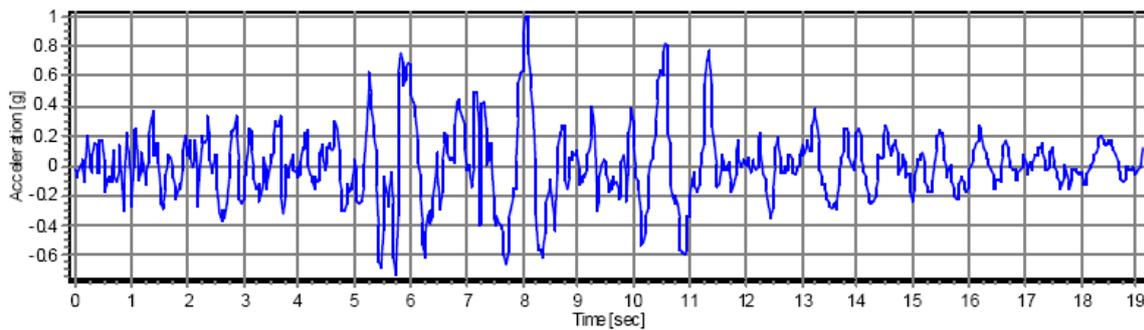
Перед данными расчетными исследованиями были поставлены следующие задачи:

1. разработать подробную, пространственную, конечноэлементную модель системы «грунтовое основание - сооружение шлюза-регулятора №1 – водный массив»;

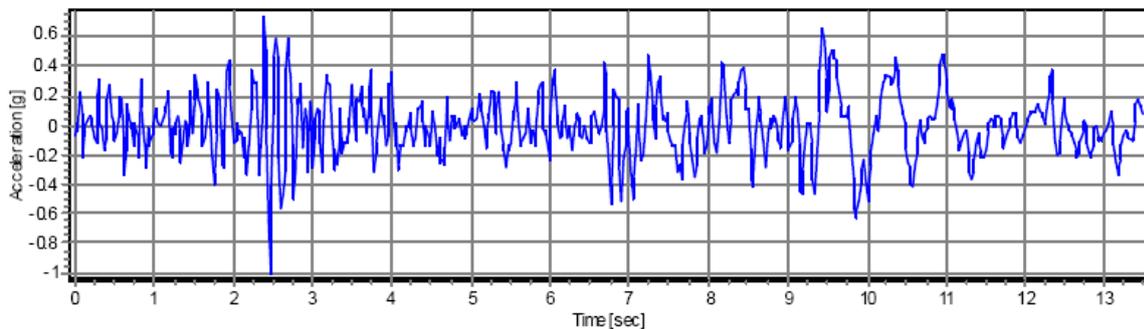
2. провести комплекс вариантов расчетов системы по разработанной и верифицированной численной методике, в соответствии с положениями, заложенными в действующих нормах;
3. провести сопоставительный анализ результатов, полученных при трех различных способах моделирования жидкости;
4. проанализировать трехмерное НДС гидротехнического сооружения при сейсмических воздействиях.



KLH1000-G1(0.02)1g



KLH1090-G2(0.02)1g



KLH1-UP-B(0.02)1g

Рисунок – 4.1.4. Исходная базовая трехкомпонентная акселерограмма нормированная к значению $A_{\max}=1g$.

4.2. Описание расчетных моделей ГАЭС шлюза-регулятора №1 каскада кубанских ГЭС

4.2.1. Параметры расчетных КЭ-моделей шлюза-регулятора

Расчетная конечноэлементная модель сооружения создавались в препроцессоре программного комплекса ANSYS Mechanical с использованием специально разработанных параметризованных макросов, написанных на внутреннем языке программирования APDL.

Массивные железобетонные части сооружения (фундаментная плита, бычки и боковые устои) моделировались с использованием восьми узловых конечных элементов типа SOLID45. Массив грунта, включая подводящий и отводящий каналы, так же моделировался объемными элементами SOLID45. Для моделирования стен, плит автодорожного моста и кровли использовались четырехугольные и треугольные конечные элементы оболочки Кирхгофа-Лява типа SHELL43. Балки, колонны и пешеходный мостик моделировались пространственными стержневыми конечными элементами типа BEAM44. Нагрузки от механического оборудования задавались в виде присоединенной массы, с помощью конечных элементов сосредоточенной массы типа MASS21.

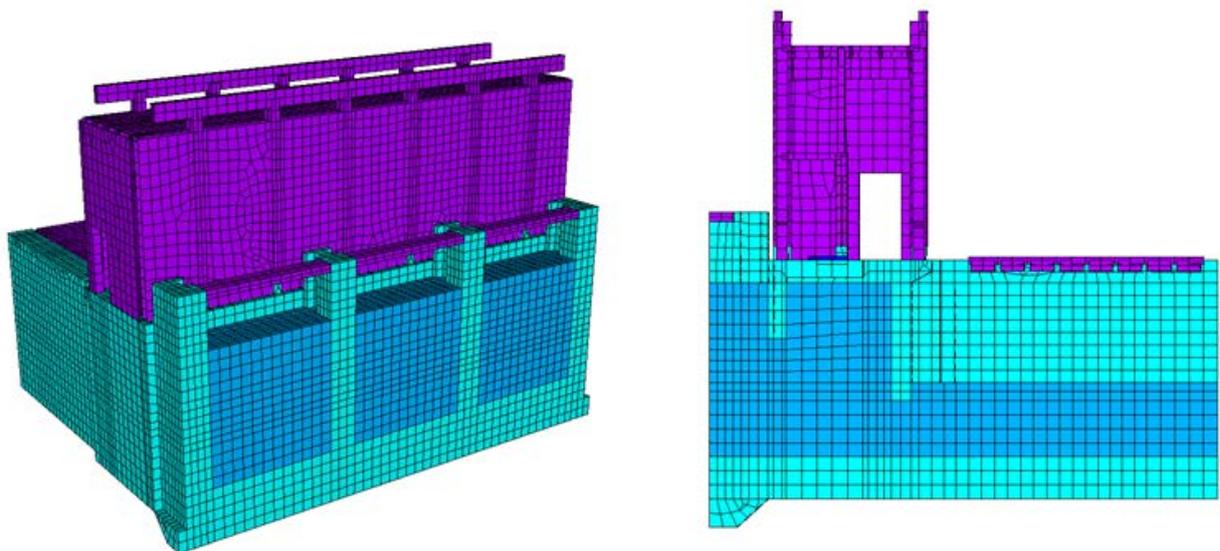


Рисунок – 4.2.1. Общий вид КЭ-модели ШР-1 без грунтового массива (изометрия и разрез вдоль потока). Разными цветами показаны элементы разных типов

При моделировании грунтового массива были приняты некоторые упрощения. Геологическое строение основания было редуцировано до двух инженерно-геологических слоев с ровной горизонтальной границей по основанию сооружения. Подводящий и отводящий каналы приняты трапецеидальной формы, а береговое примыкание имеет упрощенное очертание.

Так как моделирование сложного, нелинейного поведения железобетона и грунтового массива не входило в задачи данного исследования, материалы были приняты линейно упругим и изотропным.

В рамках данных расчетных исследований водный массив задавался тремя различными методами:

1. с использованием объемных акустических элементов типа FLUID30;
2. с использованием объемных элементов гидродинамической среды типа FLUID80;
3. методом присоединенных масс, с использованием нагрузочных элементов типа SURF154.

При использовании элементов типа FLUID30 для обеспечения связи акустической жидкости с сооружением и основанием для граничных элементов жидкости задавалась настройка, позволяющая включить дополнительные узловые степени свободы (линейные перемещения по трем направлениям дополнительно к давлению). Эта процедура обеспечивает контактную связь FSI (Fluid Structure Interaction). На свободной поверхности жидкости в качестве граничных условий назначалось нулевое давление, на боковых границах задавались условия не отражения (рисунок 4.2.2.).

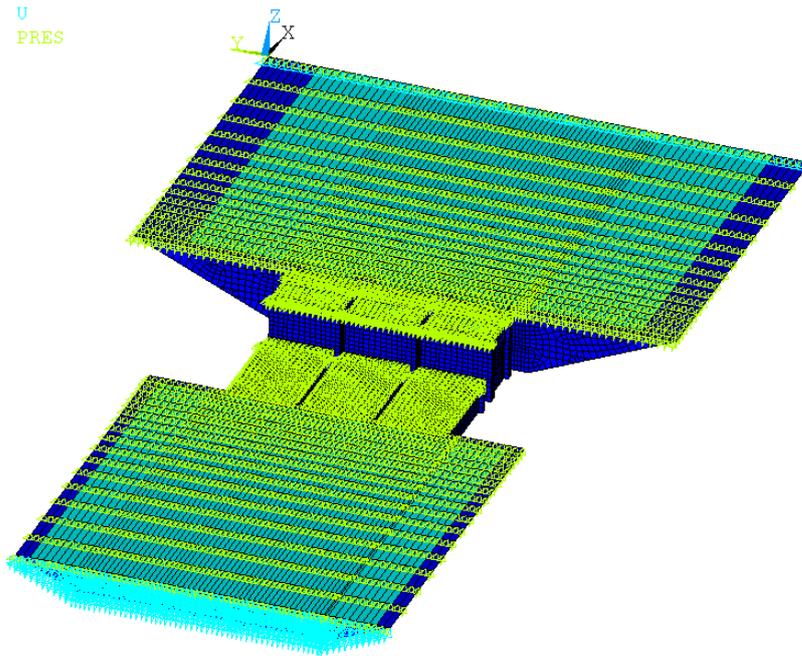


Рисунок – 4.2.2. Водный массив из элементов FLUID30. Голубыми стрелками показаны ограничения перемещений, салатowymi - давление равное нулю.

При использовании элементов типа FLUID80 форма водного массива вынуждено была изменена. Часть элементов жидкости, контактирующих с наклонными поверхностями подводящего канала и массива жидкости в отводящем канале, была исключена из расчетной модели (рисунок 4.2.3.). Данное упрощение по сути изменяет расчетную схему, и связано оно с особенностью данного типа конечных элементов, которая описана в главах 2.4.3.2 и 3.5.2.1 настоящей диссертационной работы.

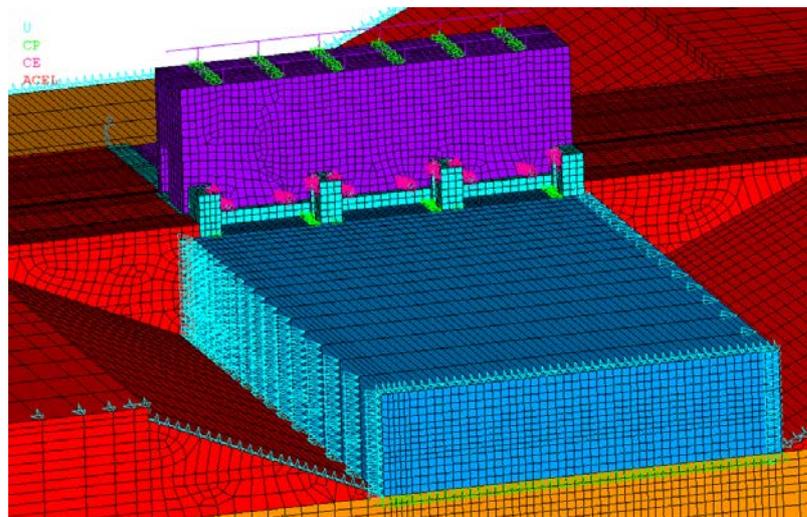


Рисунок – 4.2.3. Водный массив из элементов FLUID80. Голубыми стрелками показаны ограничения перемещений.

При учете жидкости методом присоединенных масс в данной задаче использовались трехмерные элементы поверхностных эффектов типа SURF154. С помощью данных элементов была задана горизонтальная присоединенная масса жидкости на единицу площади, которая рассчитывалась по [73]. необходимо отметить значительную сложность назначения присоединенных масс на криволинейную напорную грань шлюза-регулятора (рисунок 4.2.4.). В действующих нормативных документах величина назначаемых присоединенных масс зависит от расстояния между сооружением и противоположным ему берегом водоема или между противоположными стенками конструкции, что в случае с криволинейно напорной гранью вызывает определенные сложности.

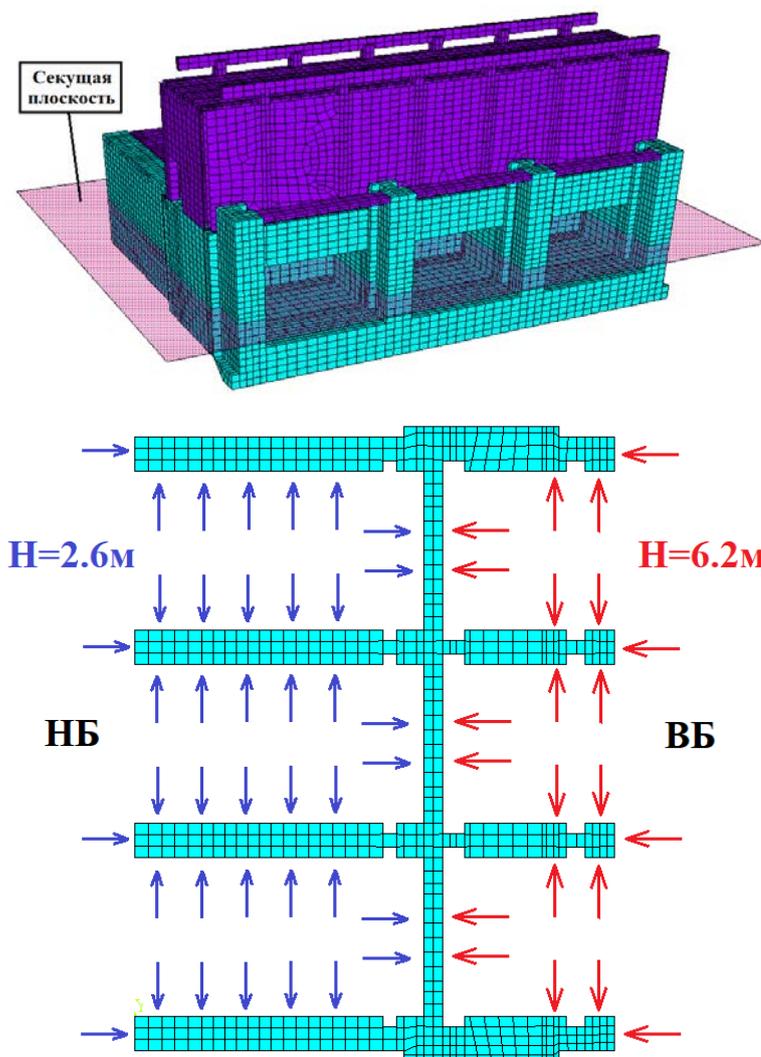


Рисунок – 4.2.4. Форма напорной грани ШР-1. Вид сверху. Стрелками показано давление воды со стороны верхнего и нижнего бьефов.

На всех внешних гранях грунтового массива, кроме дневной поверхности, в качестве граничных условий ограничивались перемещения по нормали.

Вычислительная размерность расчетной модели ШР-1 – 245 528 конечных элементов и 265 422 узлов (без учета элементов, моделирующих жидкость). Характерный размер конечных элементов изменяется в диапазоне от 0.5 м до 4 м (рисунок 4.2.5.).

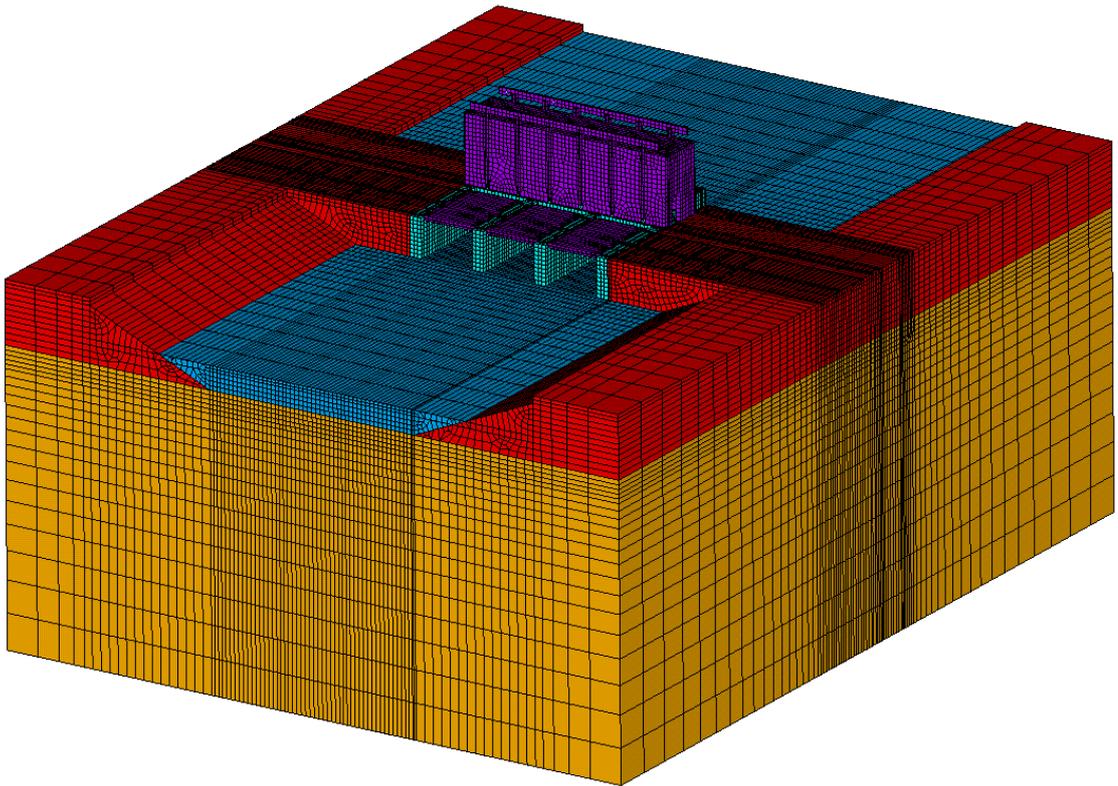


Рисунок – 4.2.5. Общий вид КЭ-модели ШР-1 с учетом грунтового и водного массивов.

4.2.2. Параметры расчетов

Для вычисления собственных частот и форм колебаний системы использовался блочный метод Ланцоша и редуцированный метод (Хаусхолдера).

При решении задачи в динамической постановке использовался метод интегрирования Ньюмарка. Параметры интегрирования Ньюмарка α , δ 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.

При проведении сопоставительных расчетов с разными вариантами учета жидкости, инерционное и конструкционное демпфирование принимались равными нулю.

При динамическом расчете шлюза регулятора №1 по заданной трехкомпонентной акселерограмме с использованием акустических элементов демпфирование учитывалось. Для железобетонных конструкций сооружения задавалось 5% демпфирование Релея, константы демпфирования принимали следующие значения ($\alpha=4.44$ и $\beta=0.000379$). Для массива грунта коэффициент ξ задавался равным 15% от критического [42], при этом константы демпфирования равны ($\alpha=7.754817$ и $\beta=0.00126$).

4.3. Результаты сопоставительных расчетов шлюза-регулятора №1 каскада кубанских ГЭС при разных способах учета жидкости

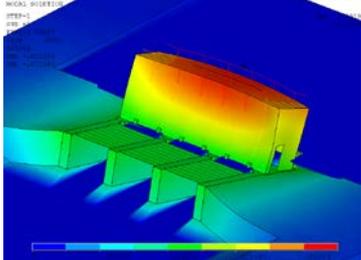
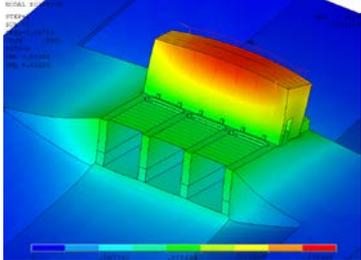
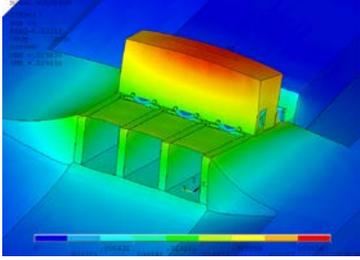
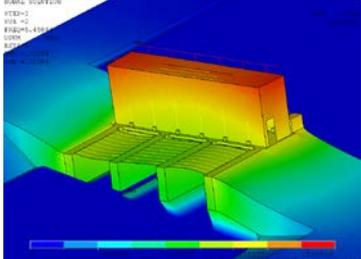
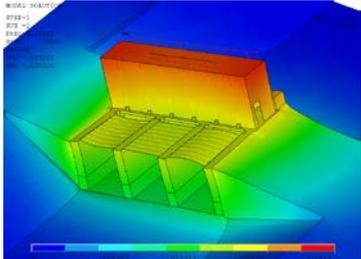
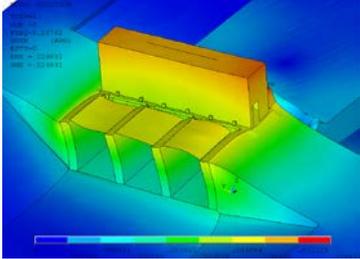
4.3.1. Собственные частоты и формы колебаний системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение»

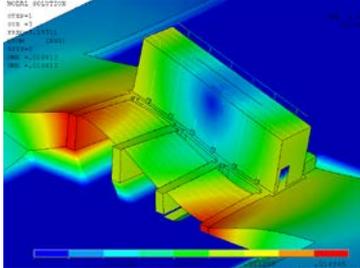
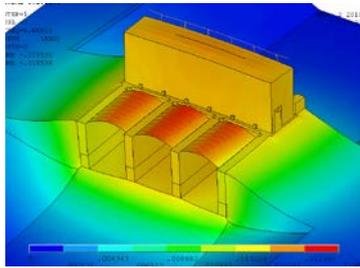
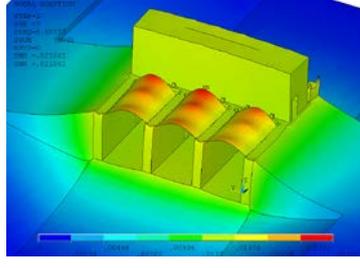
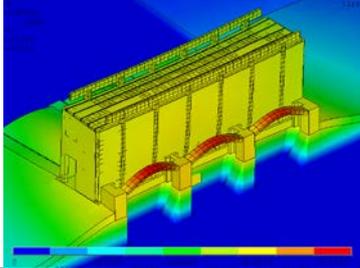
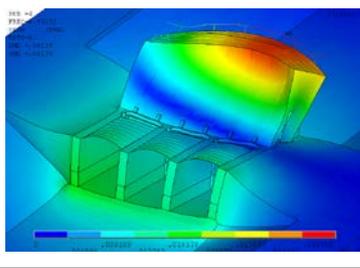
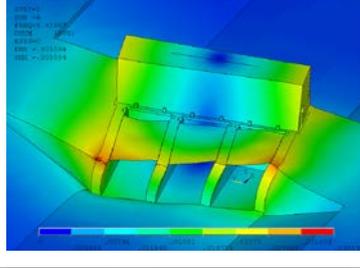
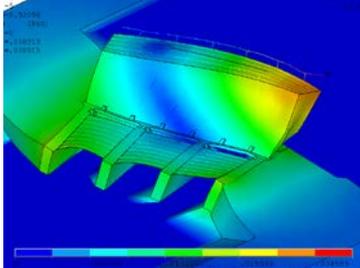
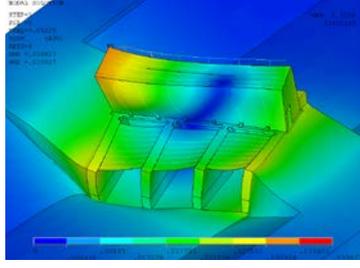
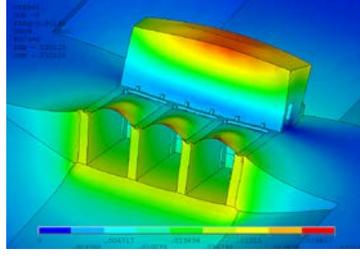
При расчете собственных частот и форм колебаний плотность грунтового массива принималась равной нулю. В программном комплексе ANSYS Mechanical с применением блочного метода Ланцоша (для элементов FLUID30 и SURF154) и редуцированного метода (для элементов FLUID80) вычислены первые 15 форм и частот трехмерной системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение». Проведено три расчета для разных методов учета жидкости. Результаты представлены в таблицах 4.3.1 и 4.3.2.

Таблица 4.3.1. Расчетные собственные частоты (Гц) системы при разных способах моделирования жидкости

№ формы	Частота (Гц)		
	Элементы жидкости FLUID30	Присоединенная масса SURF154	Элементы жидкости FLUID80
1	4.900	5.047	5.101
2	5.458	6.326	6.268
3	7.197	6.689	6.685
4	7.420	8.973	9.429
5	8.521	9.052	9.962
6	8.619	9.785	11.387
7	10.879	12.342	14.704
8	12.313	15.399	18.343
9	15.786	16.103	21.514
10	16.091	16.913	23.620
11	16.719	19.213	23.894
12	17.189	19.964	24.361
13	17.310	20.052	24.786
14	19.235	21.542	25.241
15	19.310	21.562	25.634

Таблица 4.3.2. Формы первых 5ти собственных колебаний при разных способах моделирования жидкости

№	Формы		
	Элементы жидкости FLUID30	Присоединенная масса SURF154	Элементы жидкости FLUID80
1			
2			

№	Формы		
	Элементы жидкости FLUID30	Присоединенная масса SURF154	Элементы жидкости FLUID80
3			
4			
5			

4.3.2. *Динамический расчет системы «основание – водохранилище – гидротехническое сооружение» на сейсмические воздействия, заданные однокомпонентной акселерограммой.*

Для сопоставительного анализа результатов динамического расчета при различных вариантах учета жидкости была выбрана одна компонента KLN1000-Г1 (вдоль потока) исходной акселерограммы продолжительностью 10 секунд с максимальным ускорением 2.427 м/с^2 (рисунок 4.3.1.). Для вывода результатов в модели были выбраны точки, которые являются наиболее показательными для данного сооружения. При сопоставлении результатов с использованием трех разных методов учета жидкости оценивались горизонтальные перемещения наиболее гибкого элемента конструкции (рельс катушек лебедки) и горизонтальные ускорения того же элемента, в направлении сейсмического

воздействия. Графики горизонтальных перемещений и ускорений рельса катушек лебедки показаны на рисунках 4.3.2. – 4.3.3.

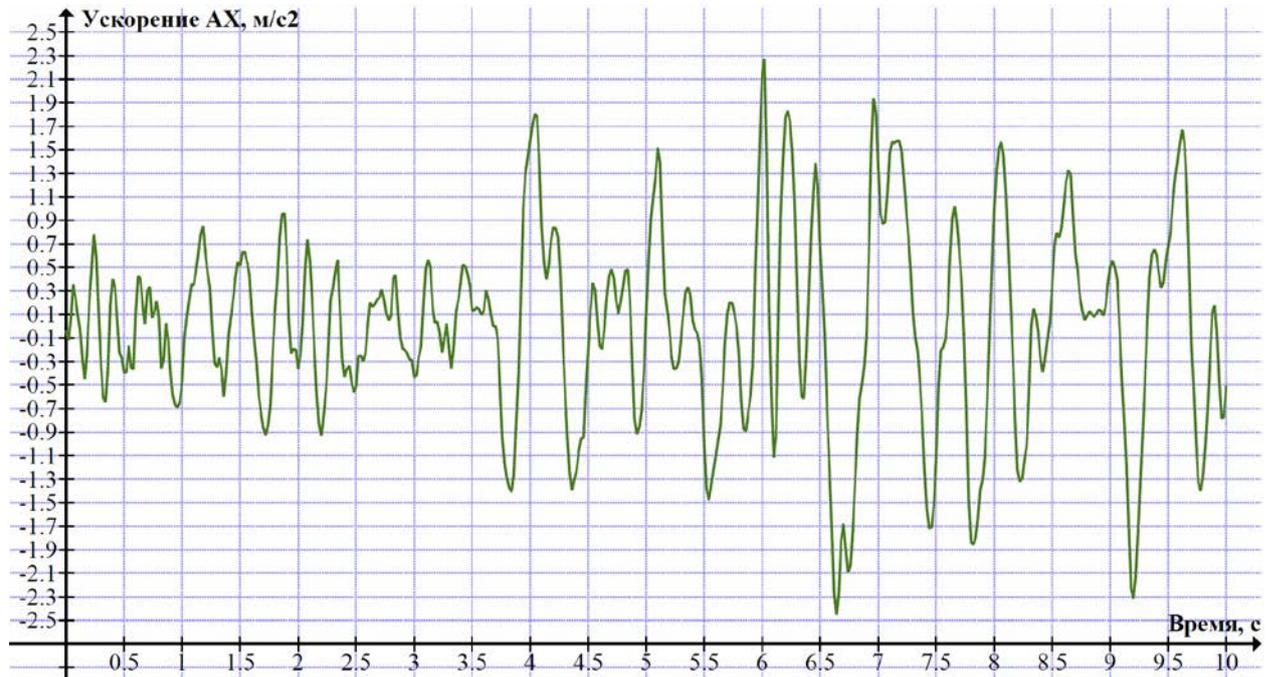


Рисунок – 4.3.1. Акселерограмма по X. Для сопоставительного анализа.

$$A_{\max} = 2.427 \text{ м/с}^2$$

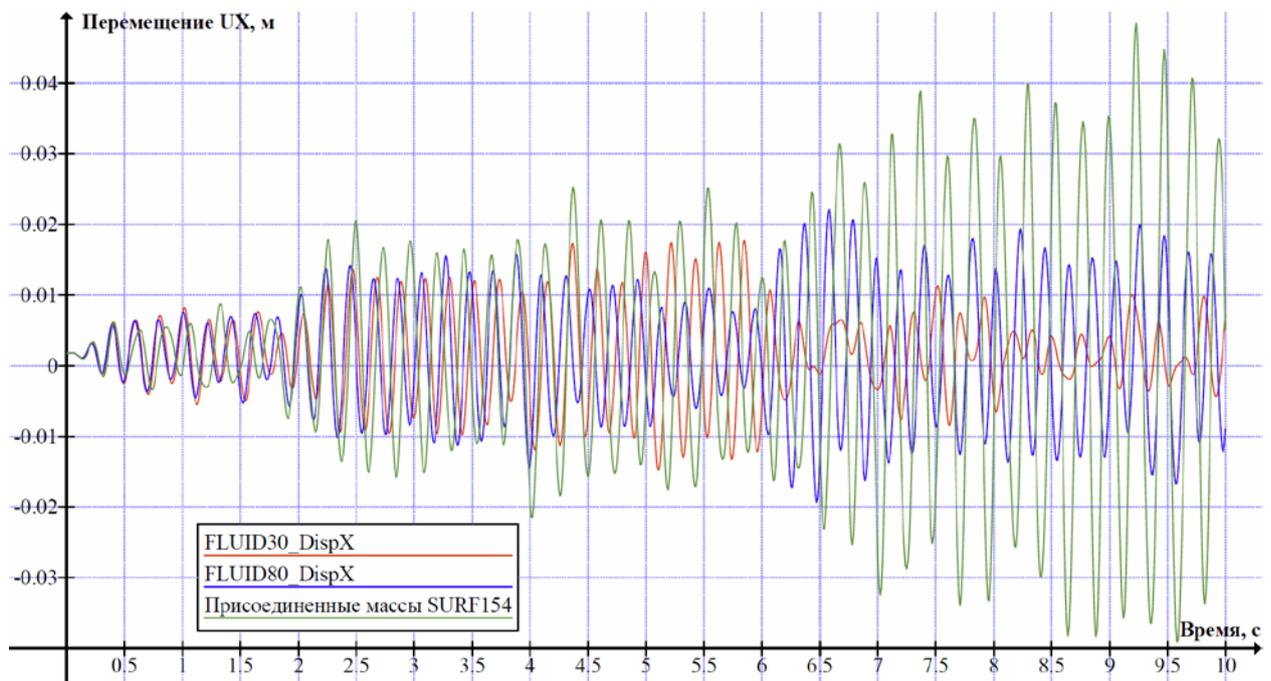


Рисунок – 4.3.2. Горизонтальные перемещения (U_x) (вдоль потока) рельса катушек лебедки

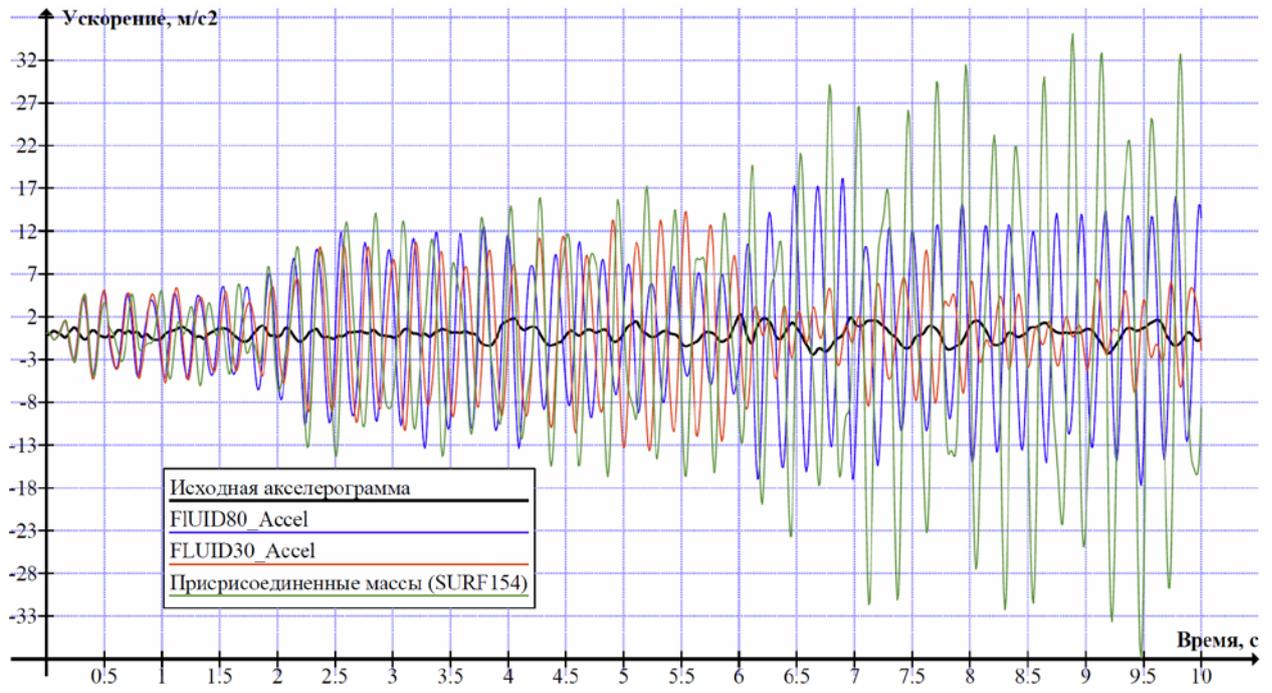


Рисунок – 4.3.3. Горизонтальное ускорение (A_x) (вдоль потока) рельса катучей лебедки

4.3.3. Анализ и сопоставление результатов

1. Анализ результатов модального расчета показал значительное отличие по частоте для всех трех вариантов. Низшие три формы собственных колебаний совпадают для всех вариантов учета жидкости, начиная с четвертой формы возникает некоторое расхождение в формах колебаний.

Для случая учета жидкости присоединенными массами, с применением элементов SURF154, отличия в частотах и формах от варианта с акустическими элементами FLUID30 объясняется недостатками методики расчета присоединенных масс жидкости для криволинейных напорных граней.

Для варианта с использованием элементов гидродинамической среды типа FLUID80, более высокие собственные частоты объясняются существенными вынужденными изменением расчетной схемы (исключение боковых призм массива жидкости) из-за особенностей данного конечного элемента. Исключение из расчетной схемы значительной части водного массива и уменьшение за счет этого его массы объясняет увеличение частоты собственных колебаний.

2. Сопоставление результатов динамического расчета на горизонтальное сейсмическое воздействие при различных способах учета жидкости показало картину, соответствующую результатам верификационного примера №3 (п.3.4.3 настоящей работы). Для низконапорного гидротехнического сооружения учет жидкости присоединенными массами показывает завышенный результат по перемещениям и ускорениям, относительно вариантов с применением акустических и гидродинамических элементов (рисунки 4.3.2. – 4.3.3.). Для данного сооружения имеет значение, и сложная форма напорной грани, для которой нет рекомендаций по назначению присоединенных масс. Максимальные перемещения, полученные при учете жидкости присоединенными массами, больше перемещений при использовании акустических и гидродинамических элементов на 54%.

3. Отличие по максимальным значениям перемещений и ускорений между расчетными моделями с акустическими (FLUID30) и гидродинамическими (FLUID80) элементами не превышает 10%. Но качественная картина отличается

значительно. Имеется сдвиг по фазе, а начиная с 4ой секунды картина перемещений имеет иной характер (рисунки 4.3.2. – 4.3.3.). Это объясняется существенным уменьшением объемов водного массива при использовании гидродинамических элементов (FLUID80), из-за их ограничений.

4. Время расчета динамической задачи с использованием гидродинамических элементов (FLUID80) в 1.2 раза больше, чем при использовании акустических элементов (FLUID30) и в 2 раза больше по сравнению с вариантом, когда задавались присоединённые массы элементами SURF154. Это связано с большей размерностью задачи при использовании FLUID80 за счет дополнительных степеней свободы по сравнению акустическими элементами.

5. Для проведения полного динамического расчета на трехкомпонентную акселерограмму, с учетом вышеизложенных выводов, был выбран один вариант учета жидкости – моделирование акустическими элементами (FLUID30). Полный расчетный анализ динамического НДС системы «грунтовое основание - сооружение шлюза-регулятора №1 – водный массив» выполнен на модели с использованием акустических элементов.

4.4. Результаты динамического расчета шлюза регулятора №1 по заданной трехкомпонентной акселерограмме с использованием акустических элементов жидкости

4.4.1. Преобразование исходных акселерограмм

При расчете прямым динамическим методом используемые исходные акселерограммы Рисунок 4.4, которые нормированы к значению $A_{max} = 1g$, были преобразованы. Каждая компонента была умножена на ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$), для перехода от долей g к м/с^2 , и на специальный переходной коэффициент, указанный в п.4.1. К вертикальной компоненте (Z) акселерограммы прибавлялось ускорение свободного падения, так как на первом этапе расчета проводился статический анализ с учетом только гравитационной составляющей (рисунок 4.4.1.). Шаг дискретизации исходной акселерограммы – 0.02 с.

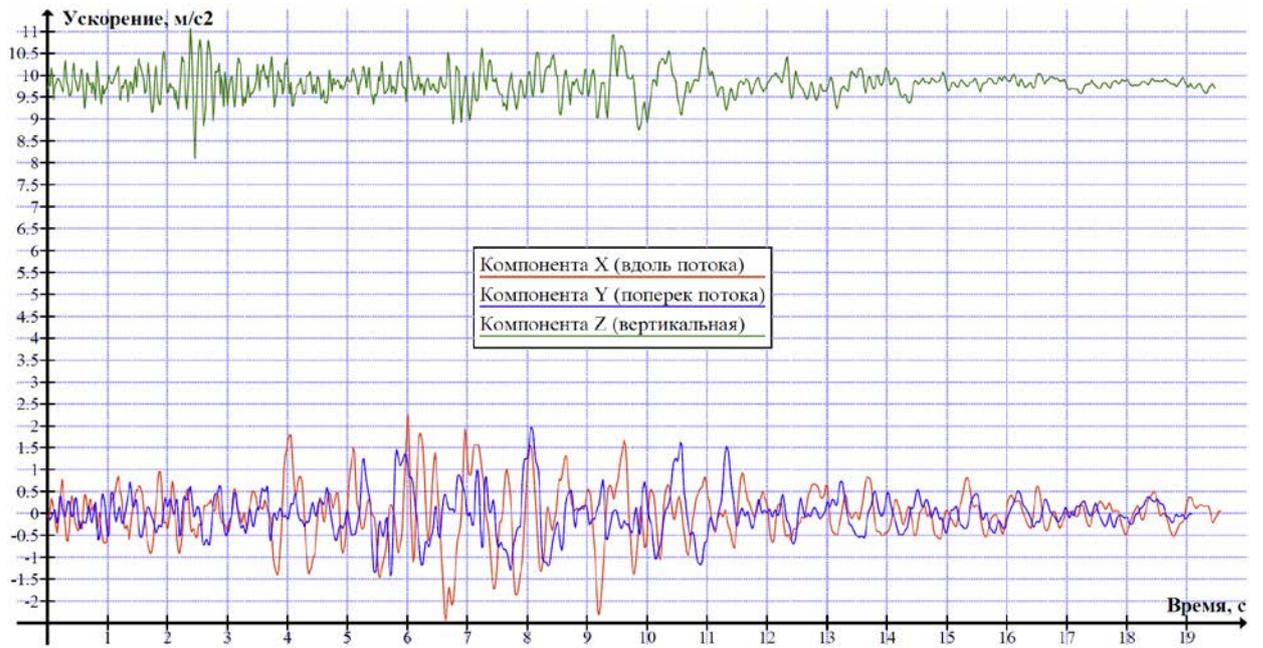


Рисунок – 4.4.1. Преобразованная трехкомпонентная акселерограмма
исходного сейсмического воздействия, м/с²

4.4.2. Анализ динамического напряженно-деформированного состояния системы «грунтовое основание - сооружение шлюза-регулятора №1 – водный массив»

По результатам проведенного динамического расчета на сейсмическое воздействие, заданного трехкомпонентной акселерограммой, были получены данные по перемещениям, усилиям и напряжениям в ключевых несущих элементах сооружения.

Над пролетной частью сооружения со стороны нижнего бьефа проходит автодорога, а со стороны верхнего бьефа – пешеходный мостик. Балки, на которых лежат плиты автодороги опираются на бычки монолитной части. Пешеходный мостик со стороны верхнего бьефа, представляет собой железобетонную балку сечением 0.8×0.35м, которая шарнирно опирается на бычки монолитной части. По результатам проведенного расчета были получены перемещения и усилия в несущих элементах автодороги и пешеходного мостика (таблица 4.4.1. – 4.4.2.).

Таблица 4.4.1. Суммарные перемещения элементов автодороги и пешеходного мостика.

Время, с	Суммарные перемещения Usum, м		Картина перемещений
	MIN Usum	MAX Usum	
Пешеходный мостик			
0 с Статика	0.011 м	0.012 м	
6.91 с	0.012 м	0.016 м	

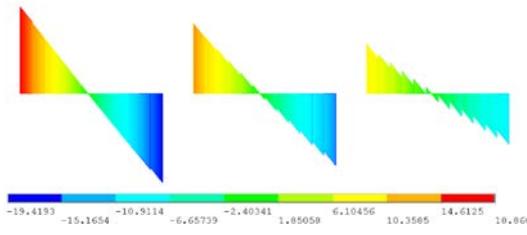
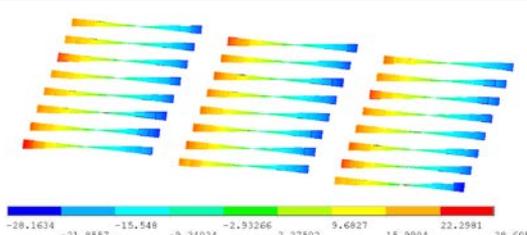
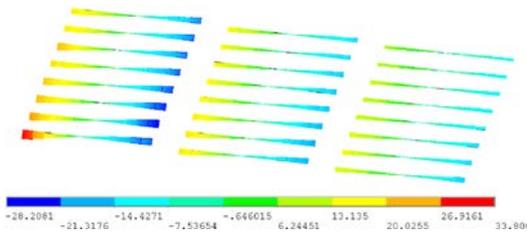
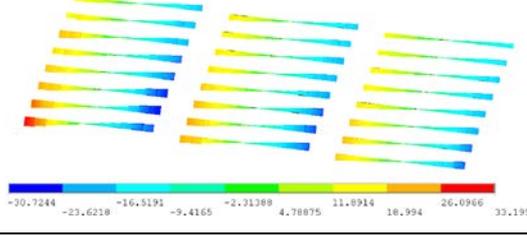
Время, с	Суммарные перемещения U_{sum} , м		Картина перемещений
	MIN U_{sum}	MAX U_{sum}	
13.32 с	0.011 м	0.016 м	
Автомобиля			
0 с Статика	0.007 м	0.010 м	
3.97 с	0.005 м	0.011 м	
12.97 с	0.008 м	0.016 м	

Таблица 4.4.2. Усилия в несущих элементах автодороги и пешеходного мостика.

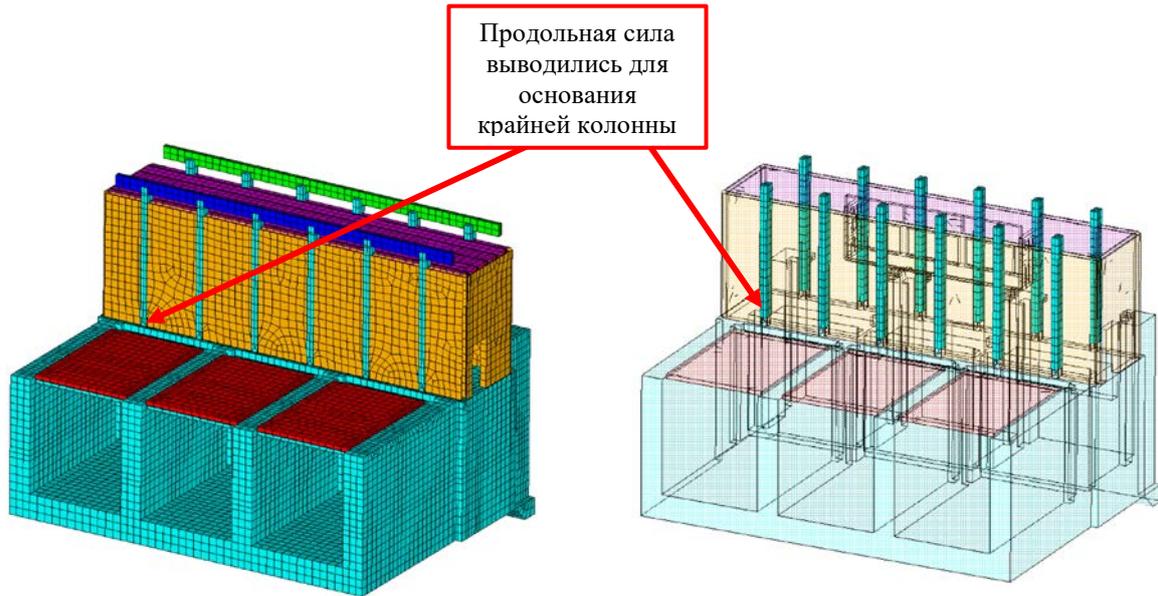
Время, с	Изгибающий момент M_y , кН×м		Эпюра усилий
	MIN M_y	MAX M_y	
Пешеходный мостик			
0 с Статика	-26.08 кН×м	4.76 кН×м	
6.91 с	-26.08 кН×м	8.78 кН×м	

Время, с	Изгибающий момент M_y , кН×м		Эпюра усилий
	MIN M_y	MAX M_y	
13.32 с	-34.59 кН×м	4.69 кН×м	
Автомобиль			
0 с Статика	-31.00 кН×м	1.396 кН×м	
3.97 с	-31.00 кН×м	1.396 кН×м	
12.97 с	-37.48 кН×м	0.11 кН×м	

Время, с	Поперечная сила Q , кН		Эпюра усилий
	MIN Q	MAX Q	
Пешеходный мостик			
0 с Статика	-19.48 кН	19.48 кН	
6.91 с	-28.19 кН	27.93 кН	

Время, с	Поперечная сила Q, кН		Эпюра усилий
	MIN Q	MAX Q	
13.32 с	-19.42 кН	18.87 кН	
Автодорога			
0 с Статика	-28.16 кН	28.61 кН	
3.97 с	-28.21 кН	33.81 кН	
12.97 с	-30.72 кН	33.20 кН	

В оценке НДС несущих конструкций здания шлюза-регулятора ключевое значение имеют колонны. В качестве результата динамического расчета был получен график изменения продольной силы в основании одной из крайних колонн (рисунок 4.4.2.). Так же показаны изгибающие моменты во всех колоннах в произвольные моменты времени (таблица 4.4.3.). Момент M_y действует в плоскости вдоль потока, Момент M_z действует в плоскости поперек потока.



Колонны железобетонные (12 шт.) сечением 400×600 мм

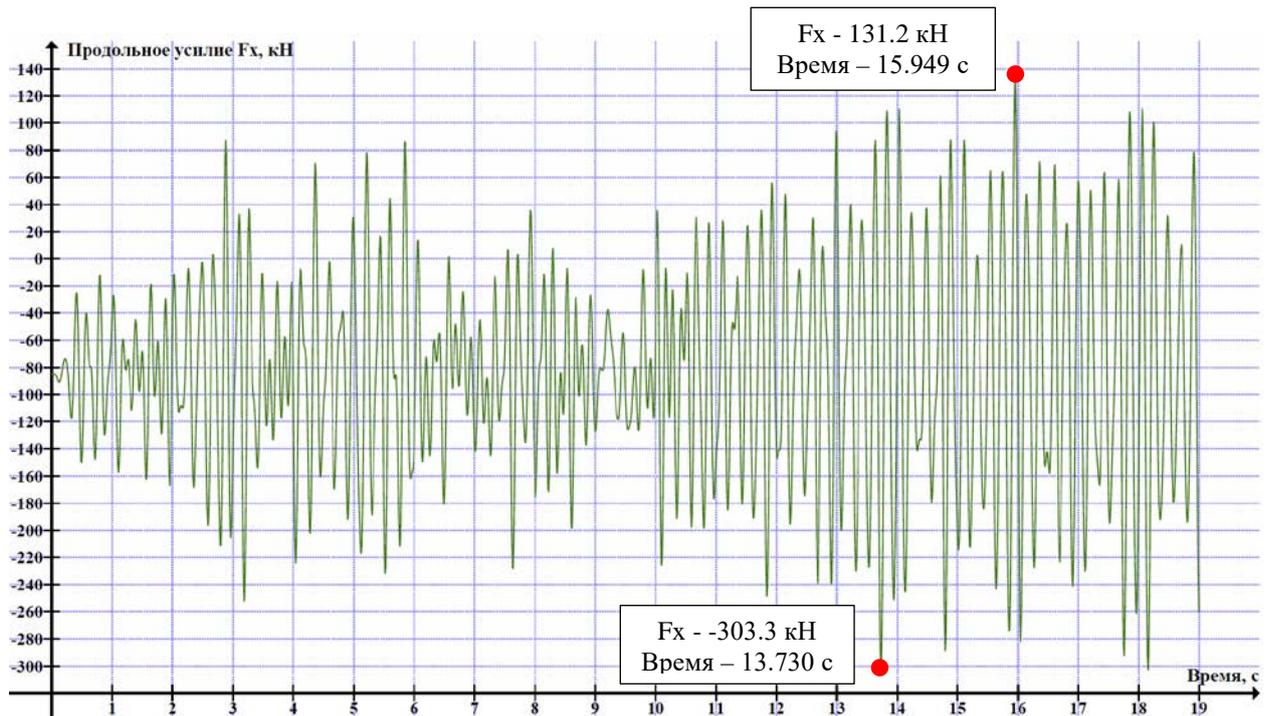
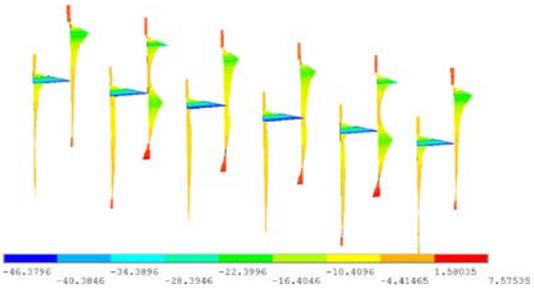
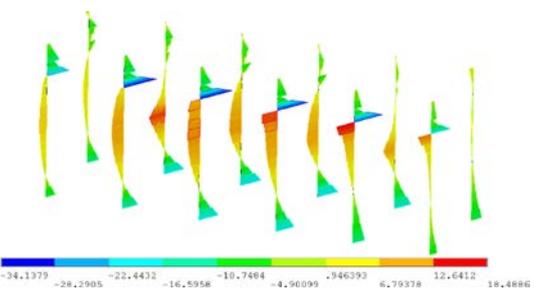
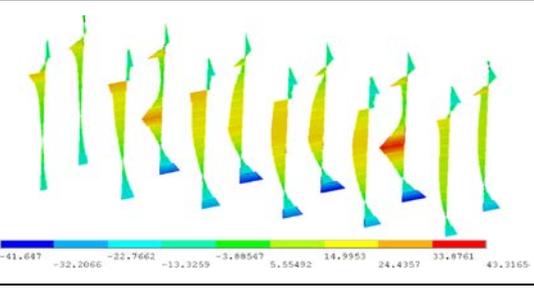
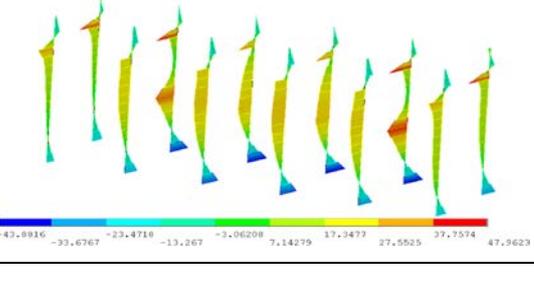
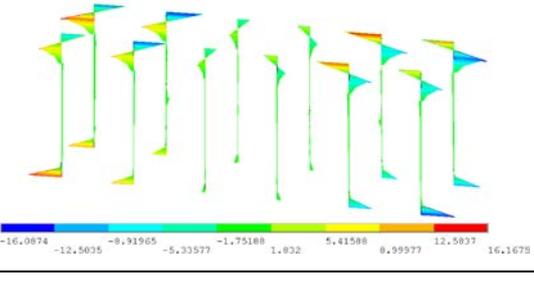


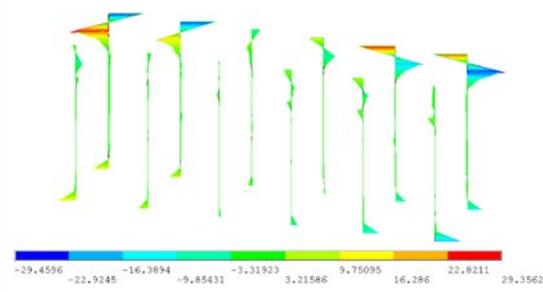
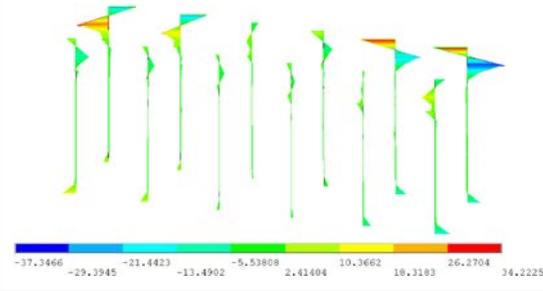
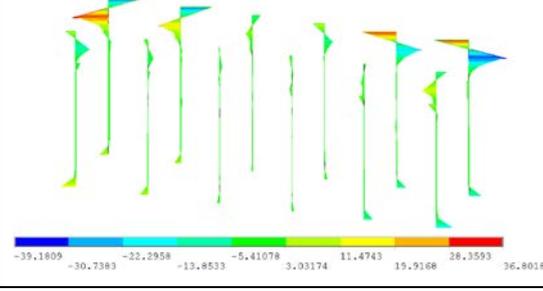
Рисунок – 4.4.2. Продольное усилие в основании крайней колонны (показана красной стрелкой), кН.

$F_{x_{\max}}=131.2$ кН (15.949 с) (растяжение). $F_{x_{\min}}=-303.3$ кН (13.730 с) (сжатие)

Таблица 4.4.3. Изгибающие моменты в колоннах здания ШР-1.

Время, с	Изгибающий момент M_y , кН×м (в плоскости - вдоль потока)		Эпюра усилий
	MIN M_y	MAX M_y	
Колонны 400×600 мм			
0 с Статика	-46.38 кН×м	7.58 кН×м	
3.78 с	-34.14 кН×м	18.49 кН×м	
9.97 с	-41.65 кН×м	43.32 кН×м	
18.97 с	-43.88 кН×м	47.96 кН×м	

Время, с	Изгибающий момент M_z , кН×м (в плоскости - поперек потока)		Эпюра усилий
	MIN M_z	MAX M_z	
Колонны 400×600 мм			
0 с Статика	-16.09 кН×м	7.58 кН×м	

3.78 с	-29.46 кН×м	29.36 кН×м	
9.97 с	-37.35 кН×м	34.22 кН×м	
18.97 с	-39.18 кН×м	36.80 кН×м	

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 4.4.3.). Статическое давление в рассматриваемой точке составляет 58.4 кПа, при напоре 5.95 м. Максимальное давление составляет 110.59 кПа, а минимальное – 12.55 кПа. Оценка прочности затвора в рамках данной задачи не проводилась.

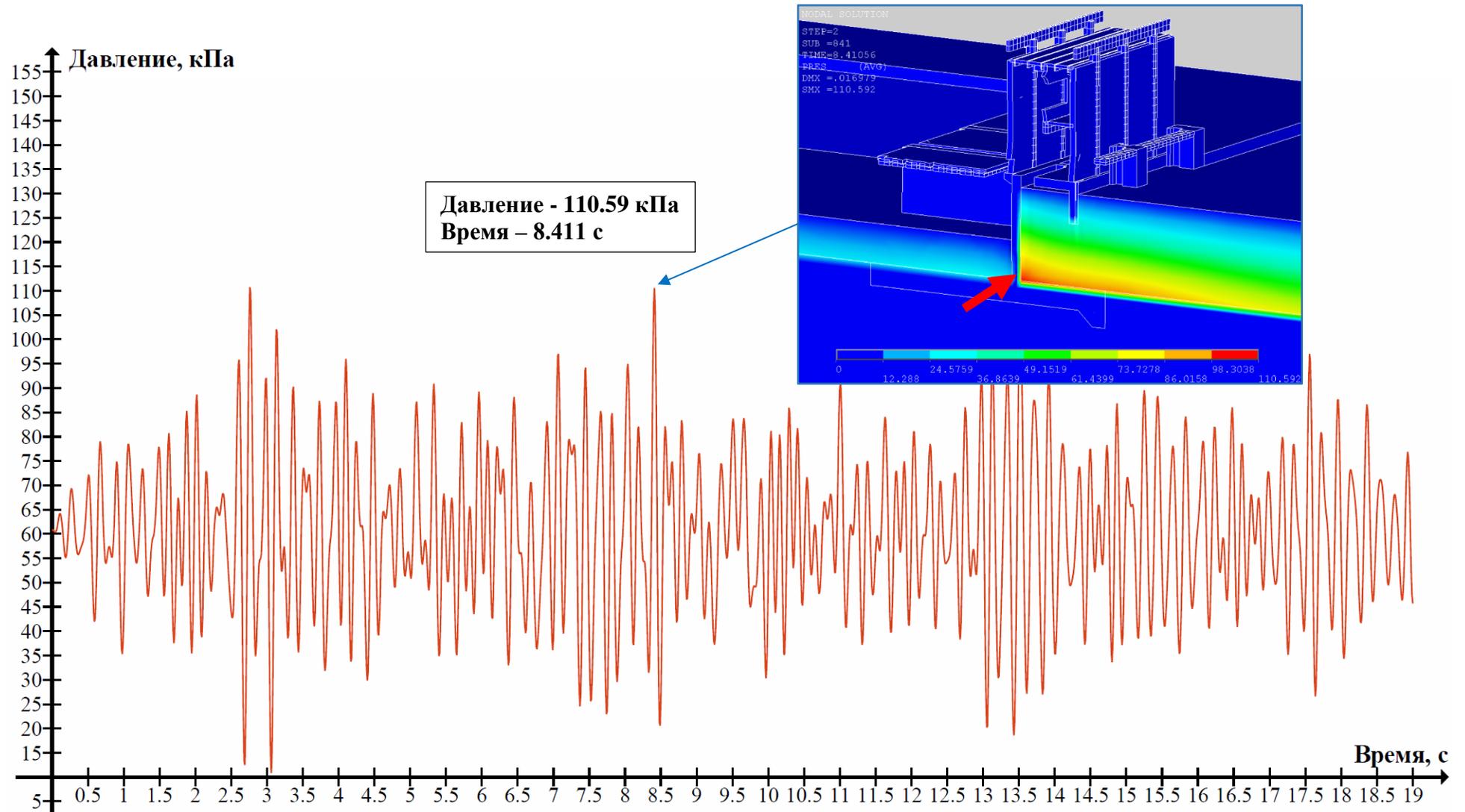


Рисунок – 4.4.3. Давление жидкости в нижней точке затвора (показана красной стрелкой) со стороны верхнего бьефа, кПа.

$$P_{\max}=110.59 \text{ кПа (8.411 с)}$$

В соответствии с Федеральным законом от 21.12.94 № 68-ФЗ [77] сейсмические воздействия на оборудование гидроэлектростанций не должны приводить к аварийным ситуациям. Поэтому оценка сейсмостойкости оборудования гидроэнергетических сооружений является очень важным элементом 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 (спектр ответа) на сейсмическое воздействие в месте установки оборудования, исходя из сейсмического расчета сооружения [76]. Спектр ответа, определяется 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 (рисунок 4.4.4.), для которой из ответной акселерограммы получен спектр ответа (в виде перемещения, скоростей и ускорений) (рисунок 4.4.5).

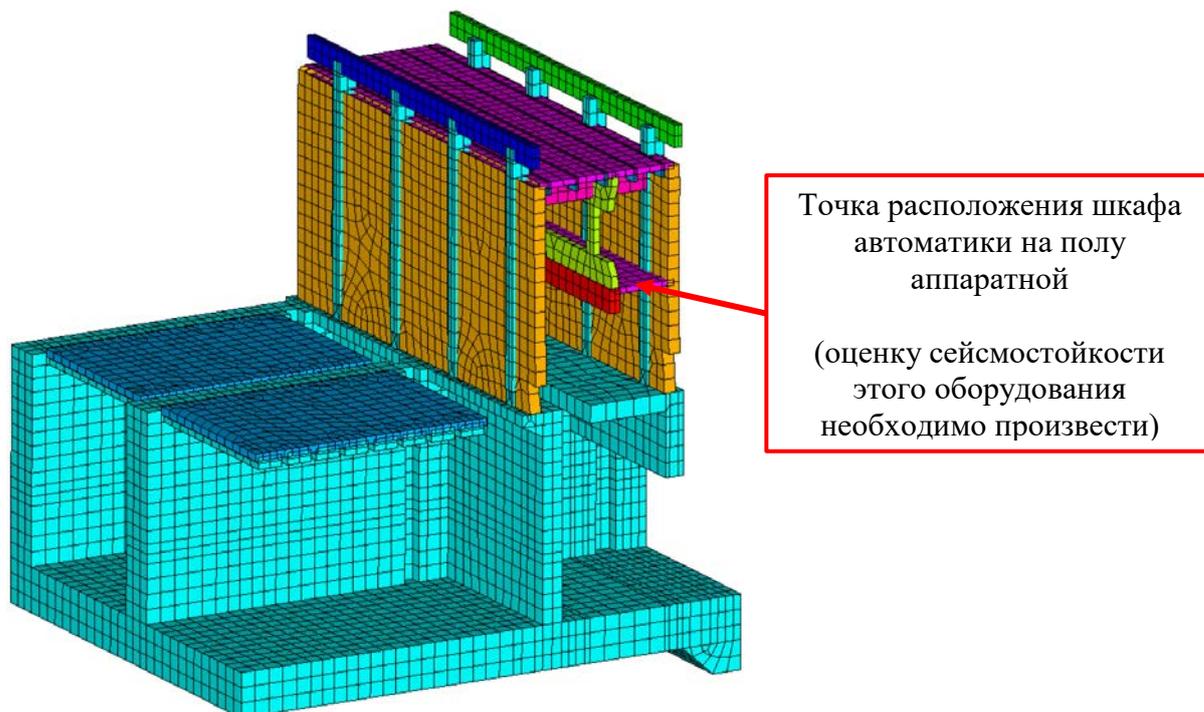


Рисунок – 4.4.4. Точка определения спектров ответа

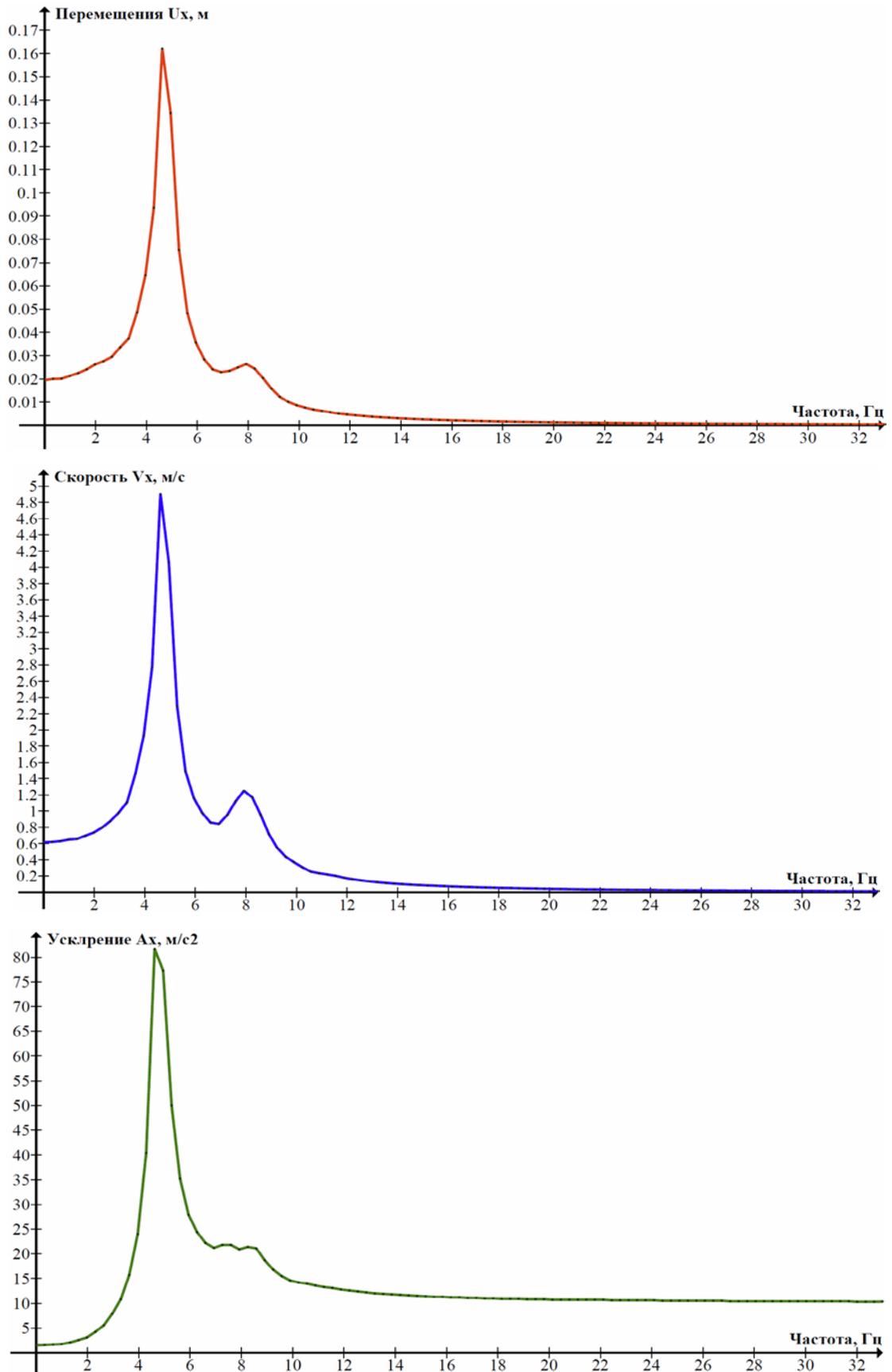
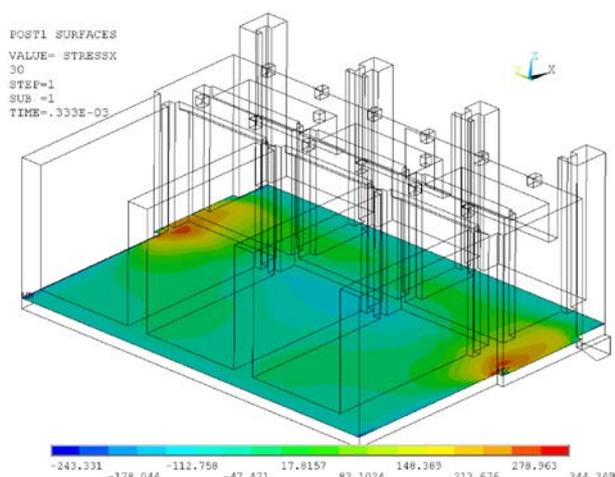
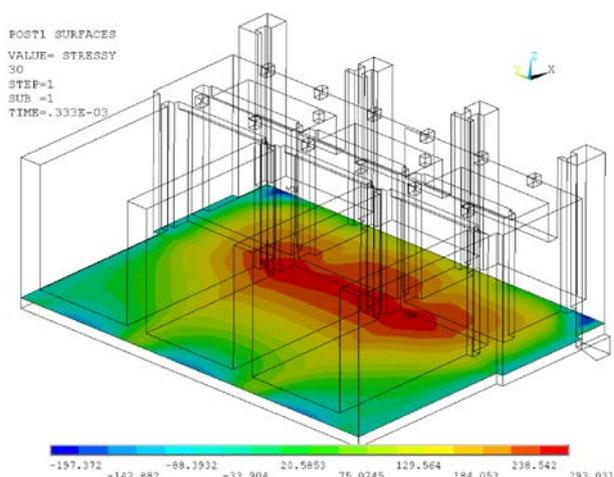


Рисунок – 4.4.5. Ответные спектры перемещений, скоростей и ускорений в точке потенциальной установки оборудования в помещении аппаратной

В результате проведенного расчета были определены напряжения в массивной железобетонной части сооружения (фундаментная плита, бычки и боковые устои). На рисунках 4.4.6. – 4.4.7 приведены компоненты статических напряжений в фундаментной плите и динамических напряжений в произвольно выбранный момент времени. На рисунках 4.4.8. – 4.4.9 приведены компоненты напряжений в сечении правобережного устоя. На рисунках 4.4.10. – 4.4.11 приведены компоненты напряжений в произвольном горизонтальном сечении массивной железобетонной части сооружения.

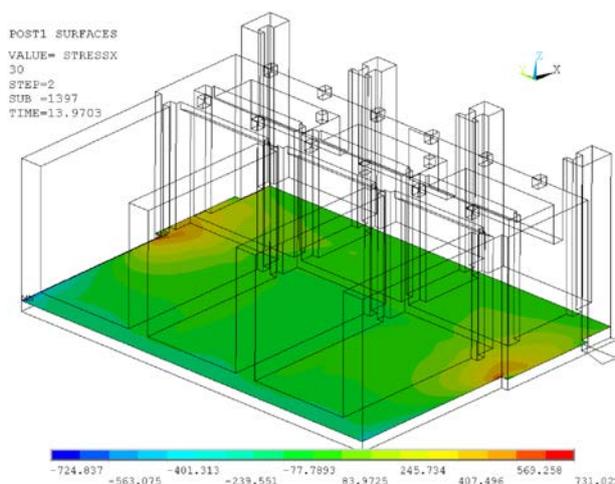


*Напряжения по оси X (вдоль потока)
Диапазон [-243.3; 344.3] кПа*

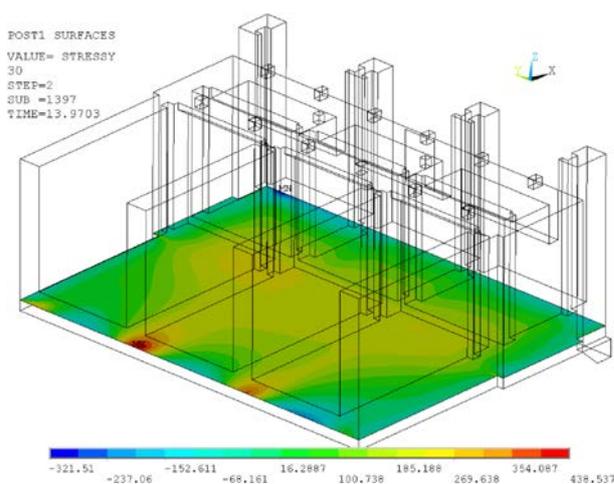


*Напряжения по оси Y (поперек потока)
Диапазон [-197.4; 293.0] кПа*

Рисунок – 4.4.6. Расчетные напряжения в фундаментной плите (Время – 0 с)

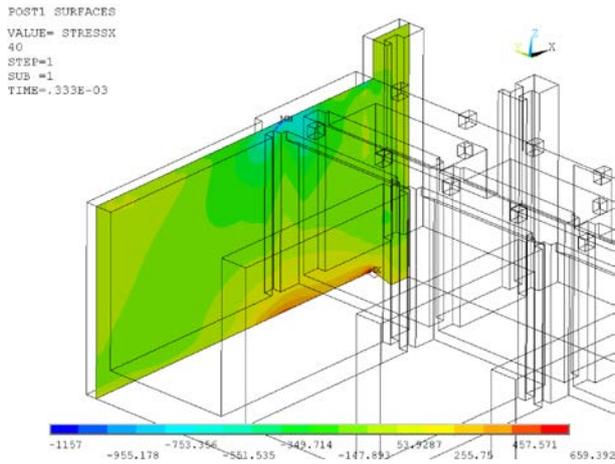


*Напряжения по оси X (вдоль потока)
Диапазон [-724.8; 731.0] кПа*

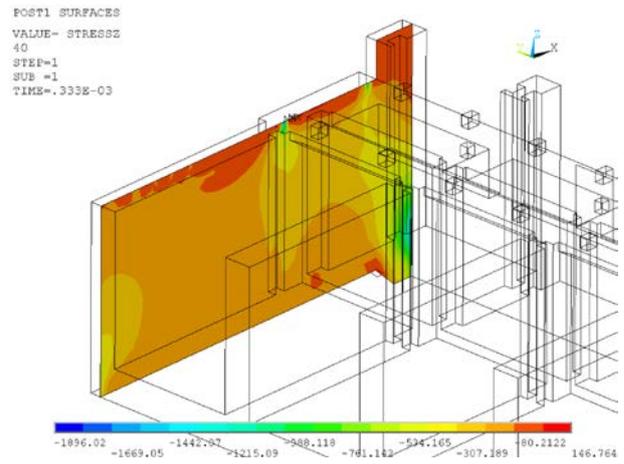


*Напряжения по оси Y (поперек потока)
Диапазон [-321.5; 438.5] кПа*

Рисунок – 4.4.7. Расчетные напряжения в фундаментной плите (Время – 13.970 с)

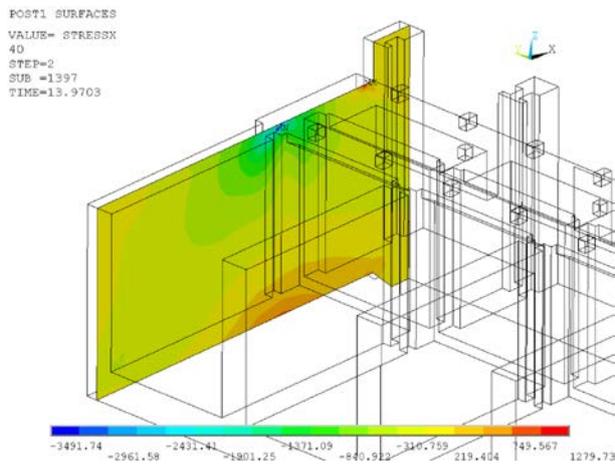


Напряжения по оси X (вдоль потока)
Диапазон [-1157.0; 659.4] кПа

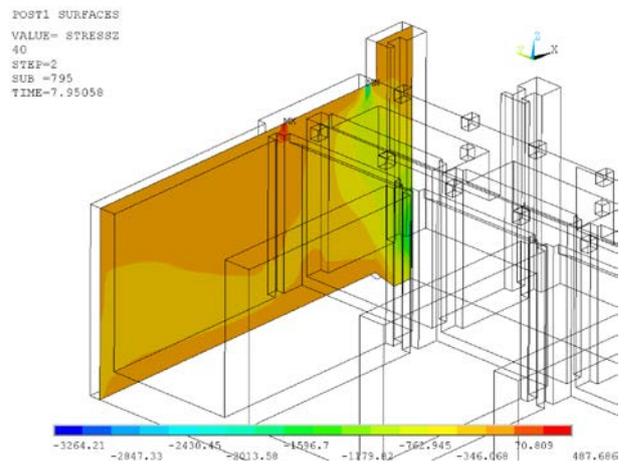


Напряжения по оси Z (вертикально)
Диапазон [-1896.0; 146.8] кПа

Рисунок – 4.4.8. Расчетные напряжения в правобережном устье (Время – 0 с)

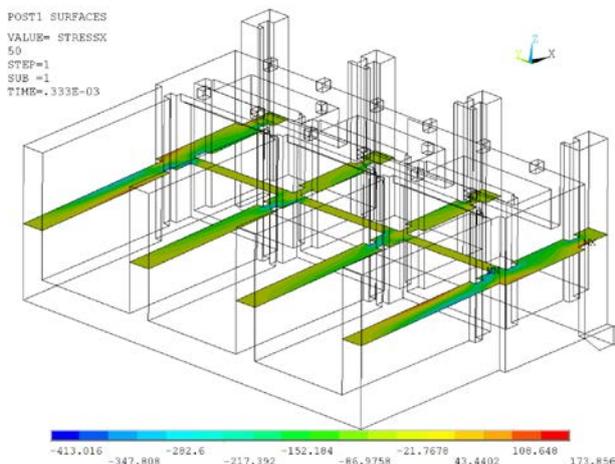


Напряжения по оси X (вдоль потока)
Диапазон [-3491.7; 1279.7] кПа

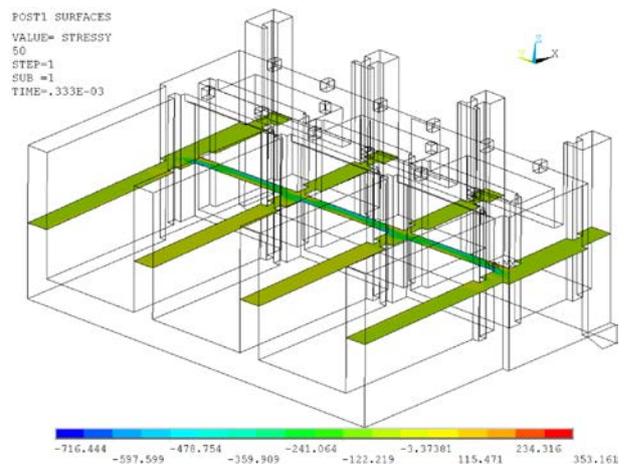


Напряжения по оси Z (вертикально)
Диапазон [-3264.2; 487.7] кПа

Рисунок – 4.4.9. Расчетные напряжения в правобережном устье (Время – 13.970 с)

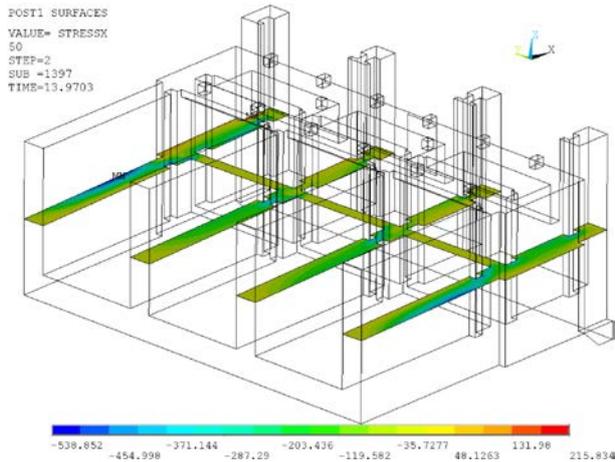


Напряжения по оси X (вдоль потока)
Диапазон [-413.0; 173.8] кПа

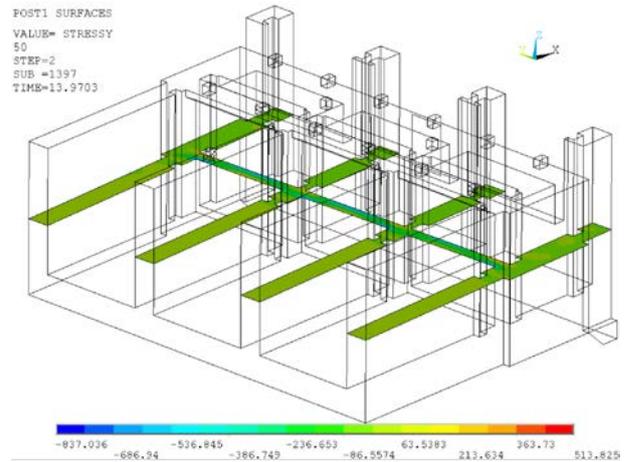


Напряжения по оси Y (поперек потока)
Диапазон [-837.0; 513.8] кПа

Рисунок – 4.4.10. Расчетные напряжения в горизонтальном сечении (Время – 0 с)



*Напряжения по оси X (вдоль потока)
Диапазон [-538.9; 215.8] кПа*

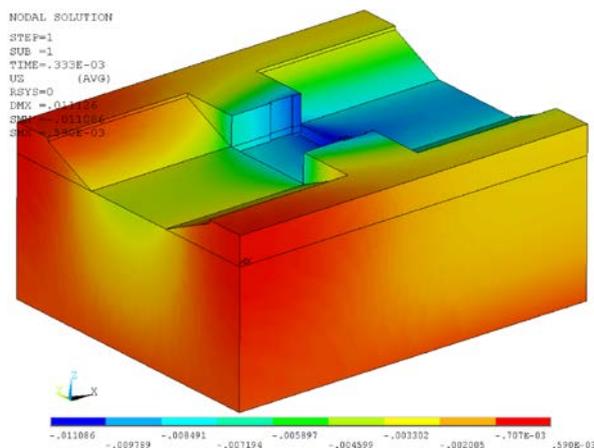


*Напряжения по оси Y (поперек потока)
Диапазон [-716.4; 353.2] кПа*

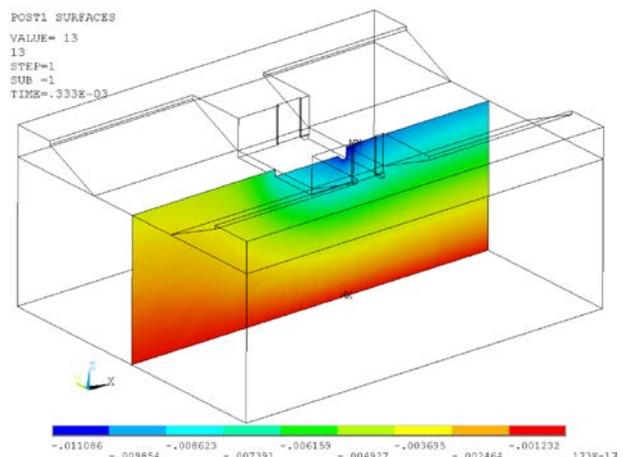
**Рисунок – 4.4.11. Расчетные напряжения в горизонтальном сечении
(Время – 13.970 с)**

По результатам проведенного расчета получены качественные (распределение) и количественные (значения) данные НДС грунтового массива в основании шлюза-регулятора №1 Кубанских ГЭС. На рисунках 4.4.12. – 4.4.13. приведена картина вертикальных перемещений в массиве грунта от статического одномоментного нагружения и в произвольно выбранный момент времени.

На рисунке 4.4.14 приведены компоненты статических напряжений в массиве основания под фундаментной плитой сооружения и динамических напряжений на 16 ой секунде.

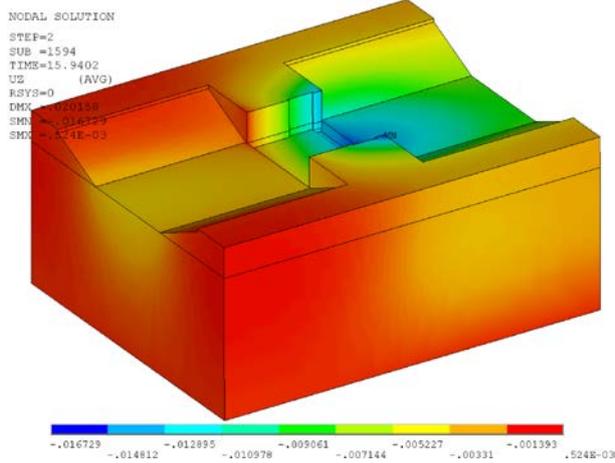


*Вертикальные перемещения (Z) во всем
массиве основания
Диапазон [-0.011; 0.0006] м*

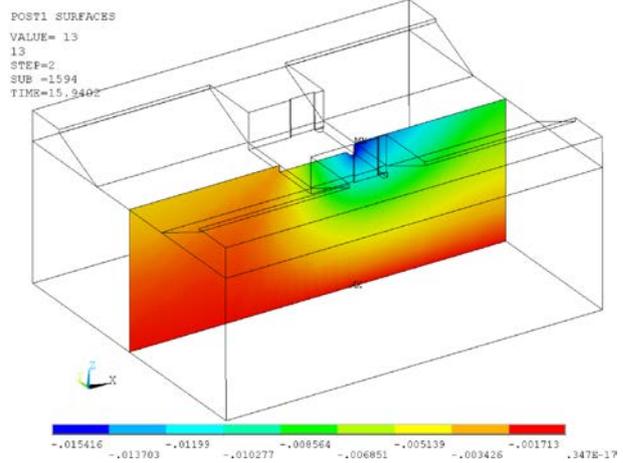


*Вертикальные перемещения (Z) в
центральном сечении (вдоль потока)
Диапазон [-0.011; 0.0006] м*

Рисунок – 4.4.12. Вертикальные перемещения (Z) в основании (Время – 0 с)

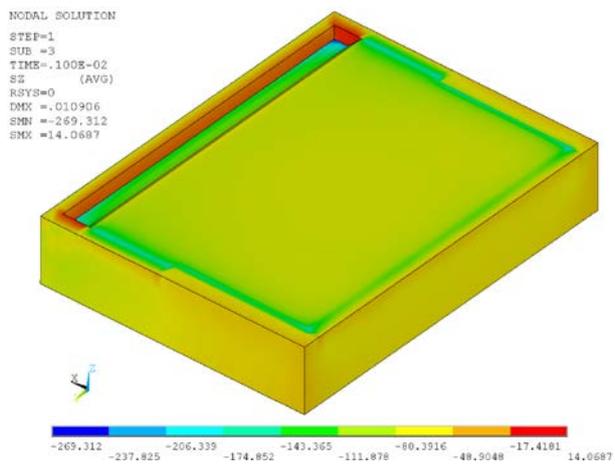


Вертикальные перемещения (Z) во всем массиве основания
Диапазон [-0.017; 0.0006] м

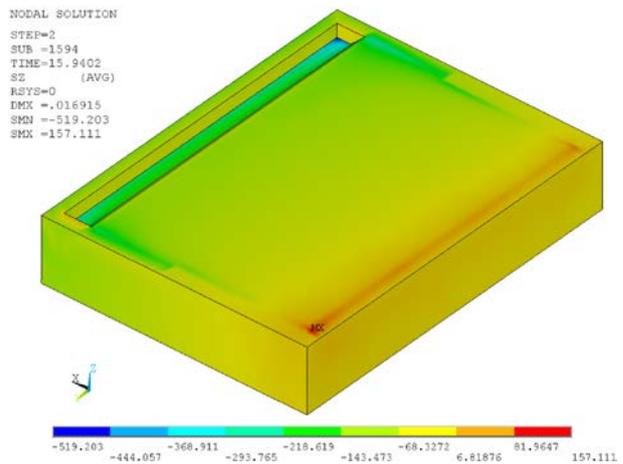


Вертикальные перемещения (Z) в центральном сечении (вдоль потока)
Диапазон [-0.015; 0.0006] м

Рисунок – 4.4.13. Вертикальные перемещения (Z) в основании (Время – 15.940 с)



Напряжения по оси Z
Диапазон [-269.3; 24.2] кПа
Время – 0 с



Напряжения по оси Z
Диапазон [-519.3; 157.1] кПа
Время – 15.940 с

Рисунок – 4.4.10. Расчетные напряжения в массиве основания под подошвой фундамента в различные моменты времени

4.5. Выводы по главе 4

В результате выполненных расчетных исследований напряженно-деформированного состояния системы «грунтовое основание – водохранилище – шлюз-регулятор №1 Кубанских ГЭС» можно сформулировать нижеследующие выводы:

1. Разработана подробная пространственная конечноэлементная модель системы «грунтовое основание – водохранилище - сооружение шлюза-регулятора №1», отражающая актуальные параметры объекта (геометрические характеристики, свойства материалов, величины нагрузок и воздействий) и позволяющая адекватно оценить основные параметры напряженно-деформированного состояния системы.

2. Выполнен модальный анализ системы на трех различных расчетных моделях с различными способами учета жидкости. Анализ собственных частот и форм колебаний показал значительные расхождения по частоте между всеми тремя вариантами. Данные расхождения объясняются недостатками метода учета жидкости присоединенными массами (для низконапорных сооружений с криволинейной напорной гранью) и несовершенствами гидродинамических элементов (FLUID80).

3. Динамический анализ системы на горизонтальное сейсмическое воздействие показал ожидаемые результаты, подтвердил выводы, сделанные на основании верификационного примера №3 (п.3.4.3 настоящей работы), и обосновал предпочтительность использования акустических элементов (FLUID30) для подобных низконапорных гидротехнических сооружений со сложной формой напорной грани и подводящего канала.

4. Проведен динамический расчет системы «грунтовое основание - сооружение шлюза-регулятора №1 – водный массив» на сейсмическое воздействие, заданное полной трехкомпонентной акселерограммой, при учете жидкости акустическими элементами (FLUID30). Полученные результаты показали ожидаемую картину распределения динамического НДС в основании и несущих конструкциях шлюз-регулятор №1 Кубанских ГЭС.

5. Продемонстрирована возможность проведения оценки сейсмостойкости оборудования гидроэнергетических объектов или выдача рекомендаций для его изготовления по полученным расчетным спектрам ответа, привязанным к местам установки такого оборудования.

6. 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 сложной формой напорной грани.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных диссертационных исследований и разработок 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 ($H < 10$ 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 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов / Я.М. Айзенберг. – Стройиздат, 1976.
2. Андрианова Е.А. Вероятностная и возможностная оценки вибраций агрегатного блока ГЭС от пульсации воды в водобойном колодце / Е.А. Андрианова, Б.Д. Кауфман // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 5. – С. 34-37.
3. Белостоцкий А.М. Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов. Том 1. К 25-летию Научно-исследовательского центра СтаДиО. / А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов. – АСВ. – 2016. – 426 с.
4. Белостоцкий А.М. Актуальные проблемы численного моделирования зданий, сооружений и комплексов. Том 2. К 25-летию Научно-исследовательского центра СтаДиО. / А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов. – АСВ. – 2016. – 426 с.
5. Белостоцкий А.М. Математическое и компьютерное моделирование в основе мониторинга зданий и сооружений / А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов, Т.Б. Кайтуков. – Издательство АСВ. – Москва, 2018. – 712 с.
6. Белостоцкий А.М. О некоторых вопросах численного моделирования трехмерного динамического напряженно-деформированного состояния систем «основание-плотина-водохранилище» при сейсмических воздействиях / А.М. Белостоцкий, П.А. Акимов, Т.Н.Л. Нгуен // XX Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства, строительной индустрии и архитектуры» (28-29 июня 2019 г.). – 2019. – С. 88.
7. Белостоцкий А.М. Верификация методики численного моделирования динамического напряженно-деформированного состояния трехмерных систем «сооружение-жидкость» / А.М. Белостоцкий, Д.С. Дмитриев, Н.Т.Н. Льюнг // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2015. – Т. 11. – № 4. – С. 124-132.

8. Белостоцкий А.М. 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.

9. Белостоцкий А.М. Расчет конструкций большепролетных зданий с учетом физической геометрической и конструктивной нелинейностей / А.М. Белостоцкий, А.С. Павлов // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2010. – Т. 6. – № 1-2. – С. 80-86.

10. Белостоцкий А.М. Численное моделирование статического и динамического напряженно-деформированного состояния пространственных систем «сооружение – основание – водохранилище» с учетом нелинейных эффектов открытия – закрытия швов и макротрещин. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.07 – «Гидротехническое строительство». / А.М. Белостоцкий. – МГУП, 1998. – 367 с.

11. Березин Е.Н. Численное моделирование задач идеальной несжимаемой жидкости со свободными границами методом граничных элементов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». / Березин Е.Н. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2006. – 146 с.

12. Бирбраер А.Н. Расчет конструкций на сейсмостойкость / А.Н. Бирбраер. – Наука СПб., 1998.

13. Бирбраер А.Н. Экстремальные воздействия на сооружения / А.Н. Бирбраер, А.Ю. Роледер. – Изд-во Политехнического ун-та, 2009.

14. Бирбраер А.Н. Вклад высших мод в динамический отклик конструкций на высокочастотные воздействия / А.Н. Бирбраер, Ю.В. Сазонова // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – № 6. – С. 22-27.

15. Бирбраер А.Н. Расчет сейсмостойкости резервуаров с жидкостью, применяемых на АЭС / А.Н. Бирбраер, С.Г. Шульман // Изв. ВНИИГ им. Веденеева. – 1977. – Т. 118. – С. 91-101.
16. Бронштейн В.И. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния высоких плотин / В.И. Бронштейн, М.Е. Грошев // Гидротехническое строительство. – 2002. – № 6. – С. 16.
17. Бронштейн В.И. Повреждения плотин при землетрясениях и методы их сейсмоусиления / В.И. Бронштейн // Геориск. – 2010. – № 3. – С. 36-43.
18. Вовкушевский А.В. Вычислительная программа для расчёта сооружений с односторонними связями методом конечных элементов / А.В. Вовкушевский // Изв. ВНИИ гидротехн. им. БЕ Веденеева. М. – 1978. – С. 4346.
19. Вовкушевский А.В. Расчет массивных гидротехнических сооружений с учетом раскрытия швов / А.В. Вовкушевский, Б.А. Шойхет // М.: Энергоиздат. – 1981. – Т. 2.
20. Гидротехнические сооружения / М.М. Гришин [и др.]. – 1979.
21. Григолюк Э.И. Взаимодействие упругих конструкций с жидкостью:(Удар и погружение) / Э.И. Григолюк, А.Г. Горшков. – Судостроение, 1976.
22. Григолюк Э.И. Нестационарная гидроупругость оболочек / Э.И. Григолюк, А.Г. Горшков // Л.: Судостроение. – 1974. – Т. 208.
23. Гришин М.М. Гидротехнические сооружения: Учебник для вузов / М.М. Гришин. – Госстройиздат, 1949.
24. Гродко Л.Н. К плоской задаче о поверхностных волнах тяжелой несжимаемой жидкости, вызываемых колебаниями гибкой стенки в канале конечной глубины / Гродко Л.Н. // Инженерный журнал. – 1961. – Т. I. – № 4.
25. 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 // Computational Civil and Structural Engineering. – 2018. – Т. 14. – № 1. – С. 26-35.

26. 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.

27. 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.

28. Елизарова Т.Г. Математические модели и численные методы в динамике жидкости и газа / Т.Г. Елизарова // Лекции–М.: Физический факультет МГУ. – 2005.

29. ЗАО НИЦ СтаДиО. Верификационный отчет по ПК ANSYS Mechanical (4 тома). Свидетельство РААСН о верификации ПС № 02/ANSYS/2009 от 10.07.2009 года. / ЗАО НИЦ СтаДиО, ГОУ ВПО МГСУ. – 2009.

30. Зарецкий Ю.К. Математическая модель мониторинга системы «здание ГЭС-грунтовое основание» / Ю.К. Зарецкий, М.И. Карабаев, В.П. Тверитнев // Юбил. сб. науч. тр. Гидропроекта (1930-2000). – 1930. – № 159. – С. 692-703.

31. Зарецкий Ю.К. Статика и динамика грунтовых плотин / Ю.К. Зарецкий, В.Н. Ломбардо // М.: Энергоатомиздат. – 1983. – Т. 255. – С. 3.

32. Инструкция о ведении Российского регистра гидротехнических сооружений РД 03-307а-99: утв. МПР России 12.07.1999, приказ № 144; Минэнерго России 12.07.1997, приказ № К-3357; Минтранс России 12.07.1999, приказ № К-141 637-ис.; Ростехнадзором России 12.07.1999, приказ № 01/229а. – Стройконсультант Стандарт (Standart), 2006.

33. К вопросу о математическом и компьютерном моделировании статического и динамического состояния связанных систем «сооружение – жидкость». Часть 1: Математические постановки задач поведения систем «сооружение – жидкость». / А.М. Белостоцкий [и др.] // «Вопросы прикладной математики и вычислительной механики». Сборник научных трудов. – 2016. – С. 168-175.

34. К вопросу о математическом и компьютерном моделировании статического и динамического состояния связанных систем «сооружение – жидкость». Часть 2: Математические постановки задач поведения систем «сооружение – жидкость». / А.М. Белостоцкий [и др.] // «Вопросы прикладной математики и вычислительной механики». Сборник научных трудов. – 2016. – С. 176-189.

35. К вопросу о математическом и компьютерном моделировании статического и динамического состояния связанных систем «сооружение – жидкость». Часть 3: Математические постановки задач поведения систем «сооружение – жидкость». / А.М. Белостоцкий [и др.] // «Вопросы прикладной математики и вычислительной механики». Сборник научных трудов. – 2016. – С. 190-198.

36. К вопросу о моделировании взаимодействия сооружения с жидкостью / А.М. Белостоцкий [и др.] // Вопросы прикладной математики и вычислительной механики. – 2014. – С. 122-129.

37. Каганов Г.М. Методика оценки долговечности гидротехнических сооружений на основе моделирования. / Г.М. Каганов // Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. – 1981. – С. 65-68.

38. Кауфман Б.Д. Оценка надёжности гидротехнических сооружений при динамических воздействиях в условиях неполноты исходной информации. Автореферат диссертации д. т. н. С-Петербург. 2015. 35 с / Б.Д. Кауфман. – 2015.

39. Кауфман Б.Д. Учет влияния неопределенных факторов при определении гидродинамического давления на плотину / Б.Д. Кауфман // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 9. – С. 59-69.
40. Кауфман Б.Д. Собственные колебания осциллятора, взаимодействующего с упругой полуплоскостью / Б.Д. Кауфман, С.Г. Шульман // Известия ВНИИГ им. БЕ Веденеева. – 1978. – Т. 122. – С. 105.
41. Козинец Г.Л. Определение динамических характеристик сооружений, контактирующих с водой, на примере арочной бетонной плотины Саяно-Шушенской ГЭС / Г.Л. Козинец // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 5. – С. 43-48.
42. Комплексная реконструкция и модернизация Каскада Кубанских ГЭС. Уточнение исходной сейсмичности и сейсмическое микрорайонирование участков основных сооружений ГАЭС. Технический отчет. – 2012.
43. Кульмач П.П. Гидродинамика Гидротехнических сооружений / Кульмач П.П. – АН СССР. – 1963.
44. Кульмач П.П. Колебания гибких вертикальных стенок в жидкости / Кульмач П.П. // Тр. Коорд. Совещаний по гидротехнике. – 1965. – № 28.
45. Кульмач П.П. О влиянии жидкости на колебания жесткой преграды. / Кульмач П.П. // Труды ВИТУ ВМФ. – 1959. – № 50.
46. Кульмач П.П. Практические рекомендации по определению воздействия жидкости на гибкие стенки при колебаниях. / Кульмач П.П. // «Известия ВНИИГ». – 1966. – Т. 82.
47. Кульмач П.П. Практический метод определения воздействия воды на массивные гидротехнические сооружения при колебаниях. / Кульмач П.П. // «Известия ВНИИГ». – 1964. – Т. 74.
48. Ломбардо В.Н. Задание сейсмологической информации при расчетах сейсмостойкости массивных сооружений / В.Н. Ломбардо // Изв. ВНИИГ им. БЕ Веденеева. Л.: Энергия. – 1973. – № 103. – С. 164-170.

49. Ломбардо В.Н. Учет работы упругих и инерционных сил основания при определении сейсмических нагрузок для плотины Курпсайской ГЭС / В.Н. Ломбардо // Гидротехническое строительство. – 1983. – № 4. – С. 16.

50. Ляпичев Ю.П. Сейсмонапряженное состояние новой плотины из укатанного бетона и камня, упроченного цементом / Ю.П. Ляпичев, М.Е. Грошев // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2005. – № 1.

51. Ляпичев Ю.П. Устойчивость и прочность новой конструкции плотины из особо тощего укатанного бетона при максимальных сейсмических воздействиях / Ю.П. Ляпичев, М.Е. Грошев // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2008. – № 1.

52. Мамрадзе Г.П. Прогнозирование волн в водохранилищах при сейсмических воздействиях / Г.П. Мамрадзе, Е.Л. Гвелесиани, Г.Я. Джинджихашвили // М.: Энергоатомиздат. – 1991.

53. Мамрадзе Г.П. Состояние и направление исследования гидродинамического давления, действующего на гидросооружения при сейсмических воздействиях / Г.П. Мамрадзе, С.Г. Шульман // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – 1969. – С. 238.

54. Мамрадзе Г.П. Экспериментальное исследование динамического давления воды при землетресении на напорную грань плотины при V-образной форме каньона / Мамрадзе Г.П. // Гидротехническое строительство. – 1967. – № 8. – С. 40-42.

55. Мгалобелов Ю.Б. Прочность и устойчивость скальных оснований бетонных плотин / Ю.Б. Мгалобелов // Энергия. – 1979.

56. Моисеев Н.Н. Численные методы расчета собственных частот колебаний ограниченного объема жидкости. Т. 3 / Н.Н. Моисеев, А.А. Петров. – Вычислительный центр АН СССР, 1966.

57. Нгуен Тай Нанг Лыонг. Численное моделирование трехмерного динамического напряженно-деформированного состояния систем «основание – плотина – водохранилище» при сейсмических воздействиях / Нгуен Тай Нанг Лыонг. – Москва: НИУ «Московский государственный строительный университет», 2017.

58. Некоторые традиционные подходы к сейсмическому расчету конструкций и сооружений, взаимодействующих с жидкостью / А.М. Белостоцкий [и др.] // Вопросы прикладной математики и вычислительной механики. – 2014. – С. 102-121.

59. О динамическом расчете связанной системы «сооружение-жидкость» на основе метода конечных элементов / А.М. Белостоцкий [и др.] // Вопросы прикладной математики и вычислительной механики. – 2014. – С. 184-202.

60. О моделировании связанных систем "сооружение-жидкость": Постановки задач, конечноэлементные аппроксимации и алгоритмы решения / А.М. Белостоцкий [и др.] // Вопросы прикладной математики и вычислительной механики. – 2014. – С. 203-228.

61. О моделировании систем «сооружение-жидкость». Библиографический обзор. Часть 1: Постановки и методы математического моделирования сооружения и жидкости / А.М. Белостоцкий [и др.] // Вопросы прикладной математики и вычислительной механики. – 2014. – С. 130-158.

62. О традиционных и современных методах численного моделирования связанных систем «сооружение-жидкость» / А.М. Белостоцкий [и др.] // Вопросы прикладной математики и вычислительной механики. – 2014. – С. 159-183.

63. Особенности расчета и проектирования сталежелезобетонных напорных водоводов / С.Е. Лисичкин [и др.] // Гидротехническое строительство. – 1999. – № 1. – С. 37.

64. Постановка, конечноэлементная аппроксимация и алгоритмы решения задач расчетного обоснования связанных систем «сооружение-жидкость» / А.М.

Белостоцкий [и др.] // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – № 5. – С. 21-28.

65. Разработка методики расчета прочности железобетонных конструкций гидротехнических сооружений, усиленных посредством внешнего армирования на основе композитных материалов, при действии поперечных сил / О.Д. Рубин [и др.] // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2016. – № 3.

66. Расчетная оценка прочности высоконапорных водоводов большого диаметра гидроузла «Три ущелья» / О.Д. Рубин [и др.] // Гидротехническое строительство. – 1999. – № 4. – С. 40.

67. Расчетное обоснование и технические решения по усилению железобетонных конструкций ГЭС (ГАЭС), имеющих трещины различного направления, при действии комплекса нагрузок / А.В. Александров [и др.] // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2014. – № 6.

68. Расчетное обоснование решений по обеспечению надежности конструкций водосброса № 2 бетонной плотины Богучанской ГЭС / О. Рубин [и др.] // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2005. – Т. 244. – С. 228-234.

69. Руководство по учету сейсмических воздействий при проектировании гидротехнических сооружений. Методическое пособие. – Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве», 2016.

70. Савич А.И. Современное состояние и пути обеспечения сейсмостойкости и гидродинамической безопасности крупных энергообъектов / А.И. Савич, В.И. Бронштейн // Гидротехническое строительство. – 2000. – № 8-9. – С. 60-70.

71. Седов Л.И. Механика сплошной среды / Л.И. Седов. – Лань, 2004.

72. Седов Л.И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики / Л.И. Седов. – Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1966.
73. СП 14.13330.2014 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах».
74. Сравнительный анализ методик численного моделирования динамики трехмерных систем «основание-арочная плотина-водохранилище» при сейсмических воздействиях / А.М. Белостоцкий [и др.] // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2016. – Т. 12. – № 2. – С. 65-74.
75. Статическое и динамическое поведение Саяно-Шушенской арочно-гравитационной плотины / А.И. Савич [и др.] // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 3. – С. 2-13.
76. СТО 70238424.27.140.034-2009 Гидроэлектростанции. Оценка сейсмостойкости оборудования. Нормы и требования.
77. Федеральный закон «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» от 21.12.1994 N 68-ФЗ.
78. Шейнин И.С. Влиянии поверхностных волн на колебания вертикальной упругой стенки в жидкости / Шейнин И.С. // «Известия ВНИИГ». – 1967. – Т. 83.
79. Шульман С.Г. Расчеты сейсмостойкости гидросооружений с учетом влияния водной среды. М / С.Г. Шульман // Энергия. – 1976. – С. 336.
80. Шульман С.Г. Сейсмическое давление воды на гидротехнические сооружения / С.Г. Шульман // Энергия. – 1970. – С. 166.
81. Akkose M. Reservoir water level effects on nonlinear dynamic response of arch dams / M. Akkose, A. Bayraktar, A. Dumanoglu // Journal of Fluids and Structures. – 2008. – Т. 24. – № 3. – С. 418-435.
82. Akköse M. Investigation of hydrodynamic effects on linear and nonlinear earthquake responses of arch dams by the Lagrangian approach / M. Akköse, A.A.

DUMANOĞLU, M.E. Tuna // Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. – 2004. – T. 28. – № 1. – C. 25-40.

83. Akköse M. Investigation of hydrodynamic effects on linear and nonlinear earthquake responses of arch dams by the Lagrangian approach / M. Akköse, A.A. DUMANOĞLU, M.E. Tuna // Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences. – 2004. – T. 28. – № 1. – C. 25-40.

84. ANSYS Mechanical // Release 16.2 Ansys Inc // Basic Analysis Guide.

85. Arabshahi H. Earthquake response of concrete gravity dams including dam–foundation interface nonlinearities / H. Arabshahi, V. Lotfi // Engineering structures. – 2008. – T. 30. – № 11. – C. 3065-3073.

86. Bathe K.-J. Finite element procedures / K.-J. Bathe. – Klaus-Jurgen Bathe, 2006.

87. Bathe K.-J. Finite element analysis of fluid flows fully coupled with structural interactions / K.-J. Bathe, H. Zhang, S. Ji // Computers & Structures. – 1999. – T. 72. – № 1-3. – C. 1-16.

88. Bayraktar A. Influence of base-rock characteristics on the stochastic dynamic response of dam–reservoir–foundation systems / A. Bayraktar, E. Hançer, M. Akköse // Engineering Structures. – 2005. – T. 27. – № 10. – C. 1498-1508.

89. Berrabah A. Dynamic Soil-Fluid-Structure Interaction Applied For Concrete Dam / A. Berrabah // Universite Aboubekr Belkaid Tlemcen. Basic Terms of Dam Characteristics (2011), New Hampshire Department Of Environmental Services. – 2012.

90. Braess H. Arbitrary Lagrangian Eulerian finite element analysis of free surface flow / H. Braess, P. Wriggers // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2000. – T. 190. – № 1-2. – C. 95-109.

91. Brahtz J. Discussion of water pressures on dams during earthquakes / J. Brahtz, C. Heilbron // Trans. Amer. Soc. Civil Eng. – 1933. – T. 98. – C. 452-460.

92. Calayir Y. Static and dynamic analysis of fluid and fluid-structure systems by the Lagrangian method / Y. Calayir, A. Dumanoglu // *Computers & structures*. – 1993. – T. 49. – № 4. – С. 625-632.
93. Chen B.-F. Nonlinear hydrodynamic effects on concrete dam / B.-F. Chen // *Engineering structures*. – 1996. – T. 18. – № 3. – С. 201-212.
94. Domínguez J. Earthquake analysis of arch dams. II: Dam-water-foundation interaction / J. Domínguez, O. Maeso // *Journal of engineering mechanics*. – 1993. – T. 119. – № 3. – С. 513-530.
95. Dunne T. Adaptive finite element approximation of fluid-structure interaction based on an Eulerian variational formulation / T. Dunne, R. Rannacher // *Fluid-structure interaction*. – Springer, 2006. – С. 110-145.
96. Experimental investigation and numerical modelling of steep forced water waves / H. Bredmose [и др.] // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2003. – Т. 490. – С. 217-249.
97. Fenves G. Earthquake analysis of concrete gravity dams including reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction / G. Fenves, A.K. Chopra // *Earthquake engineering and structural dynamics*. – 1984. – Т. 12. – № 5. – С. 663-680.
98. Guan F. New techniques for modelling reservoir-dam and foundation-dam interaction / F. Guan, I. Moore // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 1997. – Т. 16. – № 4. – С. 285-293.
99. Hamdan F. Near-field fluid-structure interaction using Lagrangian fluid finite elements / F. Hamdan // *Computers & structures*. – 1999. – Т. 71. – № 2. – С. 123-141.
100. Hariri-Ardebili M. Reservoir fluctuation effects on seismic response of high concrete arch dams considering material nonlinearity / M. Hariri-Ardebili, H. Mirzabozorg // *Journal of Civil Engineering Research*. – 2011. – Т. 1. – № 1. – С. 9-20.

101. Hatanaka M. Study on the earthquake-resistant design of gravity type dams / M. Hatanaka // Proceedings of the second world conference on earthquake engineering. – 1960. – T. 3. – C. 2041-2059.
102. Hatano T. An examination on the resonance of hydrodynamic pressure during earthquakes due to elasticity of water / T. Hatano // Transactions of the Japan Society of Civil Engineers. – 1966. – T. 1966. – № 129. – C. 1-5.
103. Hatano T. Effect of Earthquakes on gravity Dams (part 2) / Hatano T. // Trans. of JSCE. – 1947. – T. 49.
104. Hoskins L.M. Water pressure in a tank caused by a simulated earthquake / L.M. Hoskins, L.S. Jacobsen // Bulletin of the seismological society of America. – 1934. – T. 24. – № 1. – C. 1-32.
105. Houqun C. Application of transmitting boundaries to non-linear dynamic analysis of an arch dam-foundation-reservoir system / C. Houqun, D. Xiuli, H. Shunzai // Developments in geotechnical engineering. – Elsevier, 1998. – T. 83. – C. 115-124.
106. International Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams. Theme A–Fluid Structure Interaction Arch Dam – Reservoir at Seismic loading. Graz University of Technology // ICOLD : 15-188. – 2013.
107. Karman T. Water pressures on dams during earthquakes. / Karman T., Bauman P. // Proc. Am. Soc. Civ. Engrs. – 1931. – T. 57. – № 9.
108. Kotsubo S. Dynamic water pressure on dams due to irregular earthquakes / S. Kotsubo // Memoirs Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka, Japan. – 1959. – T. 18. – № 4. – C. 119-129.
109. Küçükarslan S. Transient analysis of dam–reservoir interaction including the reservoir bottom effects / S. Küçükarslan, S. Coşkun, B. Taşkın // Journal of Fluids and Structures. – 2005. – T. 20. – № 8. – C. 1073-1084.
110. Küçükarslan S. Time-domain dynamic analysis of dam–reservoir–foundation interaction including the reservoir bottom absorption / S. Küçükarslan //

International journal for numerical and analytical methods in geomechanics. – 2004. – T. 28. – № 9. – C. 963-980.

111. Kuhl E. An arbitrary Lagrangian Eulerian finite-element approach for fluid–structure interaction phenomena / E. Kuhl, S. Hulshoff, R. De Borst // International journal for numerical methods in engineering. – 2003. – T. 57. – № 1. – C. 117-142.

112. Lee J. A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams / J. Lee, G.L. Fenves // Earthquake engineering & structural dynamics. – 1998. – T. 27. – № 9. – C. 937-956.

113. Liu C. An Eulerian description of fluids containing visco-elastic particles / C. Liu, N.J. WALKINGTON // *Archive for rational mechanics and analysis*. – 2001. – T. 159. – № 3. – C. 229-252.

114. Lotfi V. Seismic analysis of concrete gravity dams by decoupled modal approach in time domain / V. Lotfi // Electron. J. Struct. Eng. – 2003. – T. 3. – C. 102-116.

115. Mendes P. Analysis of fluid–structure interaction by an arbitrary Lagrangian–Eulerian finite element formulation / P. Mendes, F. Branco // International Journal for Numerical Methods in Fluids. – 1999. – T. 30. – № 7. – C. 897-919.

116. Mononobe N. Discussion on “Water pressures on dams during earthquakes” / Mononobe N. // Proc. Am. Soc. Civ. Engrs.,. – 1933. – T. 59. – № 8.

117. Nagashima T. Seismic response analysis of an oil storage tank using Lagrangian fluid elements / T. Nagashima, T. Tsukuda // Coupled systems mechanics. – 2013. – T. 2. – № 4. – C. 389-410.

118. Nasserzare J. Inverse identification of dam-reservoir interaction including the effect of reservoir bottom absorption / J. Nasserzare, F. ZIEGLER, Y. LEI. – 2003.

119. Numerical simulation of loads and impacts, stress-strain state, strength and stability of unique structures, buildings and facilities. Experience of StaDyO research & engineering centre / A.M. Belostosky [и др.] // IOP Conference Series: Materials

Science and Engineering VII International Symposium Actual Problems of Computational Simulation in Civil Engineering 1–8 July 2018, Novosibirsk, Russian Federation. – Novosibirsk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2018. – T. 456.

120. Pavlov A.S. About Experience of Determining Stiffness and Strength Characteristics of Structural Joints for Modeling Nonlinear Processes of Deformation and Failure of Long Span Structures / A.S. Pavlov, A.M. Belostotsky // *Applied Mechanics and Materials*. – 2015. – T. 709. – C. 97-100.

121. Ribeiro P.M.V. Semi-analytical solution of dam-reservoir interaction in the fundamental mode shape / P.M.V. Ribeiro, C.A.E. Melo, L.J. Pedrosa // *The Brazilian technical community working in the field of Solid Mechanics has longed for a specialized conference. Hence, the Technical Committee on Solid Mechanics, from the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, ABCM, set as its main task to organize this conference, with the present book reflecting the effort of the committee to maintain the scientific standards attained in the first conference.* – 2009. – C. 445.

122. Rodríguez-Ferran A. Arbitrary Lagrangian–Eulerian (ALE) formulation for hyperelastoplasticity / A. Rodríguez-Ferran, A. Pérez-Foguet, A. Huerta // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. – 2002. – T. 53. – № 8. – C. 1831-1851.

123. Shariatmadar H. Modal Response of Dam-Reservoir-Foundation Interaction / H. Shariatmadar, A. Mirhaj // *Proceedings of the 8th International Congress on Civil Engineering, Shiraz, Iran.* – 2009. – C. 11-13.

124. Takashi N. An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for interaction of fluid and a rigid body / N. Takashi, T.J. Hughes // *Computer methods in applied mechanics and engineering*. – 1992. – T. 95. – № 1. – C. 115-138.

125. Tan H. Earthquake analysis of arch dams including dam-water-foundation rock interaction / H. Tan, A.K. Chopra // *Earthquake engineering & structural dynamics*. – 1995. – T. 24. – № 11. – C. 1453-1474.

126. The ALE/Lagrangian particle finite element method: a new approach to computation of free-surface flows and fluid–object interactions / F. Del Pin [и др.] // Computers & Fluids. – 2007. – Т. 36. – № 1. – С. 27-38.

127. Tiago Konno de Dornellas Cysneiros. Wave sloshing inside a reservoir / Tiago Konno de Dornellas Cysneiros, Roger Matsumoto Moreira, Raphael David Aquilino Bacchi // International Congress of Mechanical Engineering. – 2007. – № 19.

128. Westergaard H.M. Water pressures on dams during earthquakes / H.M. Westergaard // Proc. Am. Soc. Civ. Engrs. – 1931. – Т. 57. – № 9.

129. Wilson E.L. Three-dimensional static and dynamic analysis of structures / E.L. Wilson. – 2002.

130. Zienkiewicz O.C. Coupled vibrations of a structure submerged in a compressible fluid / O.C. Zienkiewicz // Proc. of Symposium on Finite Element Techniques Held at the University of Stuttgart. – 1969.