

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Физико-механический институт
Высшая школа теоретической механики и математической физики

Работа допущена к защите
Директор ВШТМиМФ,
д.ф. – м.н., чл.-корр. РАН
_____ А. М. Кривцов
« ____ » _____ 2023 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НДС И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ВЫСОКИХ БЕТОННЫХ ПЛОТИН

по направлению подготовки
01.03.03 Механика и математическое моделирование
профиль
01.03.03_01 Механика и математическое моделирование сред с
микроструктурой

Выполнил

студент гр. 5030103/90101

Руководитель

Доцент, к.ф.-м.н.

Г. С. Цвидов

Е. Ю. Витохин

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО**
Физико-механический институт
Высшая школа теоретической механики и математической физики

УТВЕРЖДАЮ
Директор ВШТМиМФ
А. М. Кривцов
«__» _____ 20__ г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

студенту Цвидову Глебу Станиславовичу, гр. 5030103/90101

1. Тема работы: Определение НДС и сейсмостойкости высоких бетонных плотин.
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 05.06.2023
3. Исходные данные по работе: справочная литература, актуальные научные публикации по теме работы.
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): построение конечно-элементной модели плотины в пакете Abaqus, задание особых граничных условий и нагрузок, обработка и анализ результатов.
5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): не предусмотрено.
6. Консультанты по работе: отсутствуют.
7. Дата выдачи задания: 27.02.2023

Руководитель ВКР: _____ Е. Ю. Витохин, доцент ВШТМиМФ, к.ф.-м.н.

Задание принял к исполнению: 27.02.2023

Студент: _____ Г. С. Цвидов

РЕФЕРАТ

На 35 с., 40 рисунков, 3 таблицы

СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СИСТЕМЫ «СООРУЖЕНИЕ – ВОДОХРАНИЛИЩЕ – ОСНОВАНИЕ», ABAQUS, МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПРУЖИНЫ И ДЕМПФЕРЫ, БЕСКОНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ.

В данной работе проводился комплексный численный расчет бетонной плотины, как гидротехнического инженерного сооружения, часто подверженного сейсмическим воздействиям. Цель исследования заключалась в определении поведения плотины при сейсмической нагрузке и ее способности противостоять разрушениям.

В расчете учитывались несколько факторов, влияющих на поведение плотины. Прежде всего, учитывалось статическое давление воды, находящейся в водохранилище. Это давление может оказывать значительное воздействие на плотину, особенно при сейсмических событиях. Дополнительно, был учтен собственный вес бетонной плотины. Это важный параметр, который влияет на распределение статических напряжений и деформаций в конструкции.

Также в расчете было учтено распространение волн в среде водохранилища. Вода моделировалась с использованием конечных и бесконечных акустических элементов, которые обеспечивают учет неотражения волн, что является существенным фактором при моделировании поверхностей воды и их взаимодействия с плотиной.

Граничные условия оказывают значительное влияние на напряженно-деформированное состояние плотины. Были заданы различные граничные условия, в том числе неотражающие границы, такие как двойная асимптотическая граница и вязкая граница в основании системы, которые позволяют точнее описать взаимодействие плотины с окружающей средой и получить более приближенные к реальности результаты.

Численные расчеты проводились в программном пакете *SIMULIA ABAQUS* (*Dassault Systèmes*).

ABSTRACT

35 pages, 40 figures, 3 tables

SEISMIC IMPACT, INTERACTION OF THE STRUCTURE-RESERVOIR-FOUNDATION SYSTEM, ABAQUS, FINITE ELEMENT METHOD, SPRINGS AND DAMPERS, INFINITE ELEMENTS.

In this work, a complex numerical calculation of a concrete dam was carried out, as a hydraulic engineering structure, often subject to seismic effects. The aim of the study was to determine the behavior of the dam under seismic loads and its ability to resist failure.

The calculation took into account several factors that affect the behavior of the dam. First of all, the static pressure of the water in the reservoir was taken into account. This pressure can have a significant effect on the dam, especially during seismic events. Additionally, the self-weight of the concrete dam was taken into account. This is an important parameter that affects the distribution of static stresses and strains in the structure.

The calculation also took into account the propagation of waves in the reservoir medium. The water was modeled using finite and infinite acoustic elements that account for non-reflection of waves, which is an essential factor when modeling water surfaces and their interaction with a dam.

Boundary conditions have a significant impact on the stress-strain state of the dam. Various boundary conditions were specified, including non-reflecting boundaries such as a double asymptotic boundary and a viscous boundary at the base of the system, which make it possible to more accurately describe the interaction of the dam with the environment and obtain more realistic results.

Numerical calculations were carried out in the software package *SIMULIA ABAQUS (Dassault Systèmes)*.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	7
ГЛАВА 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.....	10
2.1 Характеристики модели.....	10
2.2 Описание сейсмической нагрузки.....	12
ГЛАВА 3. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ В ABAQUS	14
3.1 Математическая модель.....	14
3.2 Создание модели в программе.....	14
3.3 Расчет статической задачи.....	16
3.4 Вычисление коэффициентов демпфирования.....	21
3.5 Расчет динамической задачи.....	22
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ.....	32
4.1 Напряжения в самом нагруженном узле.....	32
4.2 Перемещения на гребне плотины.....	36
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	39
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	40

ВВЕДЕНИЕ

Плотины считаются гидротехническими сооружениями повышенной опасности, особенно когда они строятся в зоне, где присутствует риск землетрясений, цунами и подобных природных катастроф. Разрушение или частичное повреждение плотин может привести к серьезным последствиям, включая экономические и экологические проблемы, а также гибель множества людей. В последнее время произошло несколько аварий, связанных с плотинами, которые вызвали наводнения, серьезный ущерб местным экосистемам, разрушение городов и т.д. В большинстве случаев повреждения плотин были нанесены цунами, вызванными землетрясениями, или землетрясениями непосредственно.[14].

Поэтому в настоящее время большое внимание уделяется сейсмической безопасности при проектировании и оценке прочности конструкции плотин. Одним из ключевых вопросов безопасности является точное определение и проверка прочностных условий при воздействии различных нагрузок, включая сейсмические.

Данное исследование рассматривает высокие бетонные гидротехнические сооружения, которые подвержены динамическим нагрузкам. Для возведения таких сооружений используют прочные бетонные смеси от класса В20 до В60, в зависимости от размеров, назначения и сложности сооружения, и степени ответственности, которая на него возлагается. Подобные плотины обычно имеют поперечное сечение, похожее на трапецию и могут достигать более 100 метров в высоту; при этом могут быть как глухими, для удержания определенного уровня верхнего бьефа в водохранилище, так и водосбросными, например, для выработки электроэнергии в случае плотины при ГЭС.

Важнейшую роль при проектировании и оценке прочности плотины играет ее взаимодействие с основанием, его реакция на деформации и напряжения, возникающие в сооружении. В данном исследовании проводится комплексный анализ системы «плотина-водохранилище-сооружение» с использованием метода конечных элементов. Целью этой работы является анализ поведения

высоких бетонных плотин при сейсмическом воздействии. Для того, чтобы представить реальные условия более точно, необходимо корректное моделирование граничных условий и поведения воды в водохранилище (распространение волн, статическое давление на твердотельную часть).

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

При моделировании необходимо учитывать, что удаленная граница должна быть расположена на бесконечном расстоянии от плотины, в виду того, что в жизни границы отсутствуют и сейсмические волны распространяются на огромные расстояния. Бесконечную модель основания при численном решении реализовать невозможно, но при решении задачи все же необходимо соблюдать условие неотражения волн. Данный эффект можно получить при с помощью условия Зоммерфельда [1]. (Уравнение на удаленной фиктивной границе водохранилища):

$$u(x) = o\left(\frac{1}{|x|}\right), \frac{\partial u(x)}{\partial |x|} - iku(x) = o\left(\frac{1}{|x|}\right), |x| \rightarrow \infty$$

Это условие излучения описывает уходящие в бесконечность волны.

Также необходимо моделирование полубесконечной области на удаленной границе. Этот подход обеспечивает замкнутость системы, а также позволяет получить более точные результаты на выходе. Если вместо полубесконечной области на границе задать просто жесткую заделку основания, то волны полностью будут отражаться от границ, что влечет за собой большие погрешности результатов. Для выполнения условия неотражения волн можно воспользоваться несколькими способами задания границ, таких как граница с бесконечными элементами, передающая граница, удаленная граница и т. д.

Возможно снизить реакцию сооружения на сейсмическое воздействие, если применить дополнительный механизм демпфирования основания: взаимодействие между фундаментом и плотиной в некоторой степени может служить демпфером излучения. Демпфирование фундамента помогает уменьшить сейсмическую реакцию плотины при землетрясении [7].

Граничная модель вязкой пружины представляет собой набор частотно-независимых пружин и демпферов, которые взаимодействуют с граничными плоскостями элементов. Пружины и демпферы назначаются каждому элементу индивидуально. (Рис. 1.)

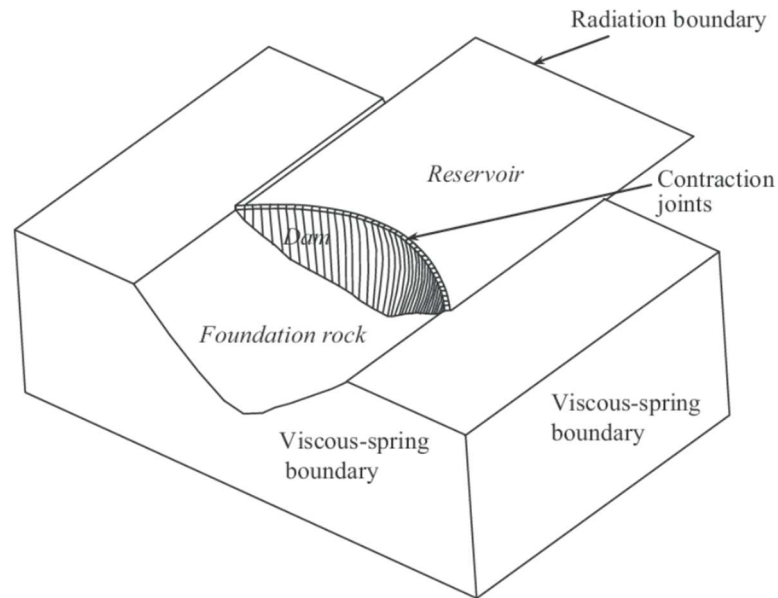


Рисунок 1. Пружины и демпферы на границах основания

Пользуясь формулами, можно найти коэффициенты жесткости и демпфирования:

$$K_{ln} = a_n \frac{2G}{r} A_l; C_{ln} = b\rho c_p A_l$$

$$K_{ls} = a_s \frac{G}{2r} A_l; C_{ls} = b\rho c_s A_l$$

Где K и C – коэффициенты жесткости и демпфирования; l – номер узла на границе, n и s – нормальное и тангенциальное направления граничной плоскости; ρ – плотность; G – модуль сдвига; c_p и c_s – скорости продольной и поперечной волн породы фундамента соответственно; r – расстояние от центра полукруглого основания до точки приложения пружины; A_l – площадь одного элемента; a_n , a_s и b – параметры модели (в данной задаче все равны 1).

По своей природе, демпферы больше подходят для гашения высокочастотной составляющей спектра, а пружины – для низкочастотной. Таким образом, данный набор пружин и демпферов является имитацией продолжения основания до бесконечности. Приблизить результат для удаленного граничного условия к реальной картине и уменьшить отражение волны поможет задание вязкоупругой и бесконечной границ [9].

Также для корректирования результата необходимо учесть контакт плотины и основания с водной средой, распространение в ней волн и ее давление на структуру конструкции. Для задания гидростатического давления используется формула

$$P = \rho gh$$

, где ρ – плотность воды, h - высота водяного столба, ускорение свободного падения. Для учета распространения волн существует множество способов, но наименьшую погрешность (а также учет сжимаемости жидкости) имеет следующее волновое уравнение:

$$c^2 \Delta p - \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0$$

ГЛАВА 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

2.1 Характеристики модели

В данной работе рассматривается высокая бетонная плотина. Высота плотины составляет 145 м, максимальная ширина в основании 110 м.

Гидротехническое сооружение сделано из бетона В20, плотина лежит на скалистом полукруглом основании. Характеристики данных материалов указаны в таблице 1. Параметры модели указаны на рисунках 2–3.

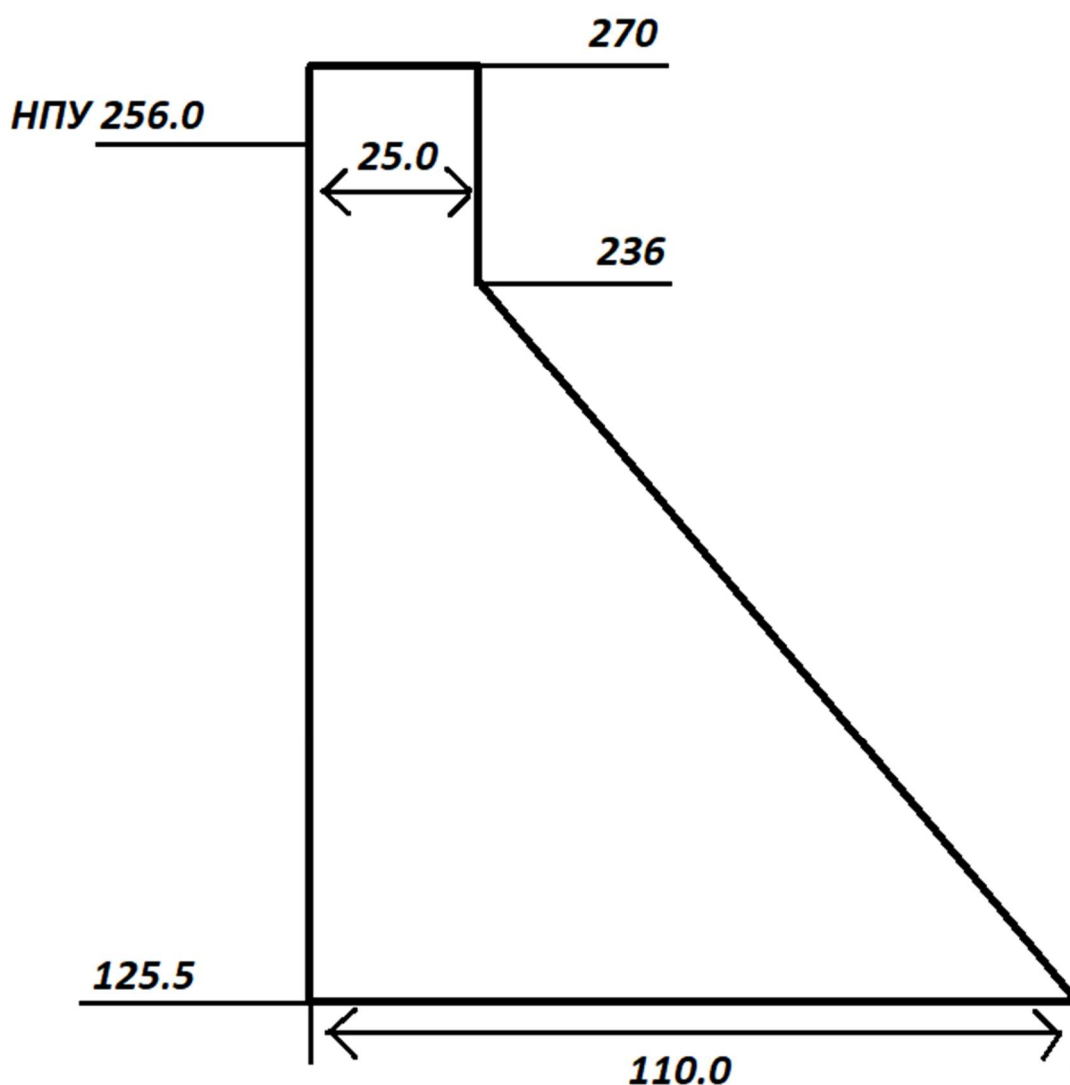


Рисунок 2. Поперечное сечение плотины

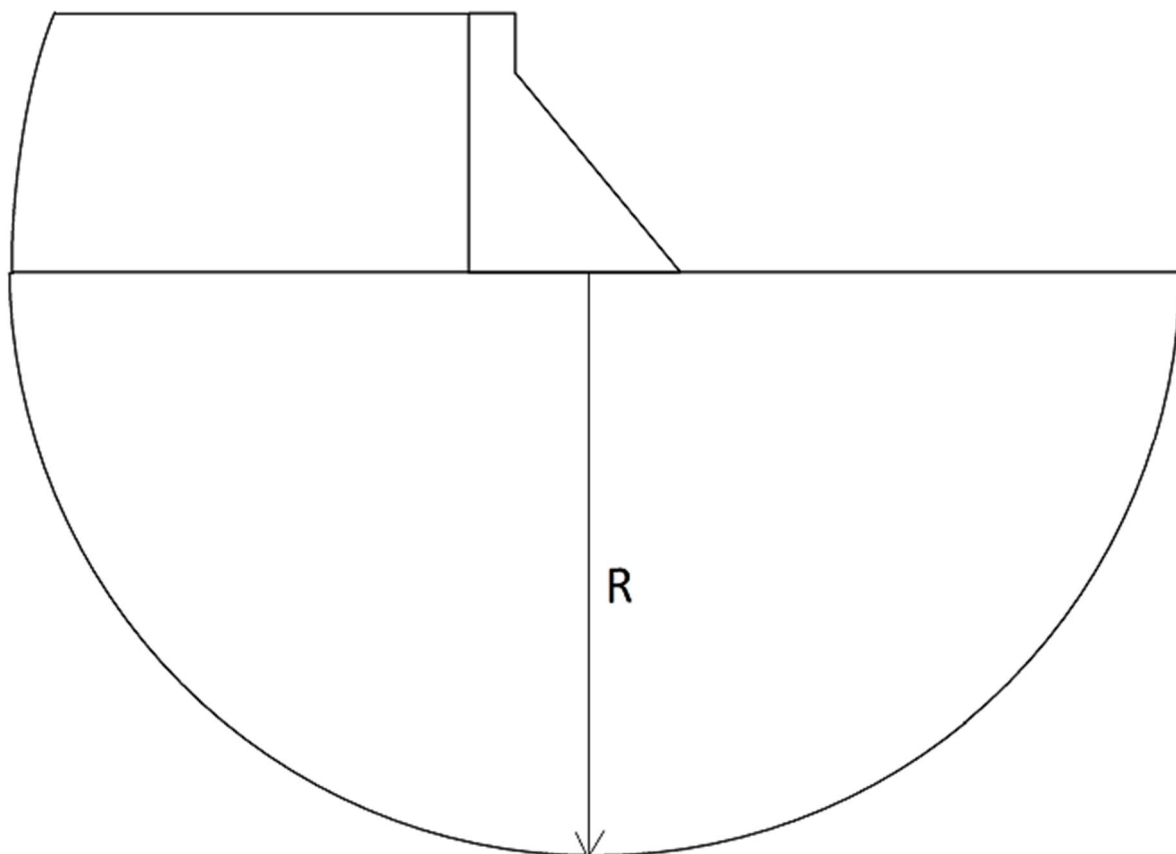


Рисунок 3. Плотина на основании, $R = 2h$ плотины

Таблица 1. Характеристики материалов.

Материал	Параметры	Значения
Бетон класса В20	ρ , кг/м ³	2700
	E , ГПа	20
	ν	0.2
Скалистое основание	ρ , кг/м ³	2500
	E , ГПа	25
	ν	0.2
Вода	ρ , кг/м ³	1000
	K , МПа	2200

2.2 Описание сейсмической нагрузки

Для расчета сейсмической нагрузки используется записанная акселерограмма реального землетрясения. В Abaqus создается дискретная функция в виде таблицы $2 * 4400$, колебания происходят 44 секунды с дискретизацией 0.01 секунда.

Данная акселерограмма была зарегистрирована приборами станции регистрации, её координаты: N 51.598 E 104.038, энергетический класс $K = 15.9$, магнитуда $M = 6.3$, гипоцентральное расстояние до станции регистрации $R = 30$ км, эпицентральное расстояние до станции регистрации $L = 17$ км, глубина гипоцентра примерно $h = 24.7$ км, сейсмическая интенсивность в эпицентре $I = 7$ баллов MSK-64.

Дата события 27.08.2008, время 01:35 [10]. Ниже представлены ее графики для двух направлений:

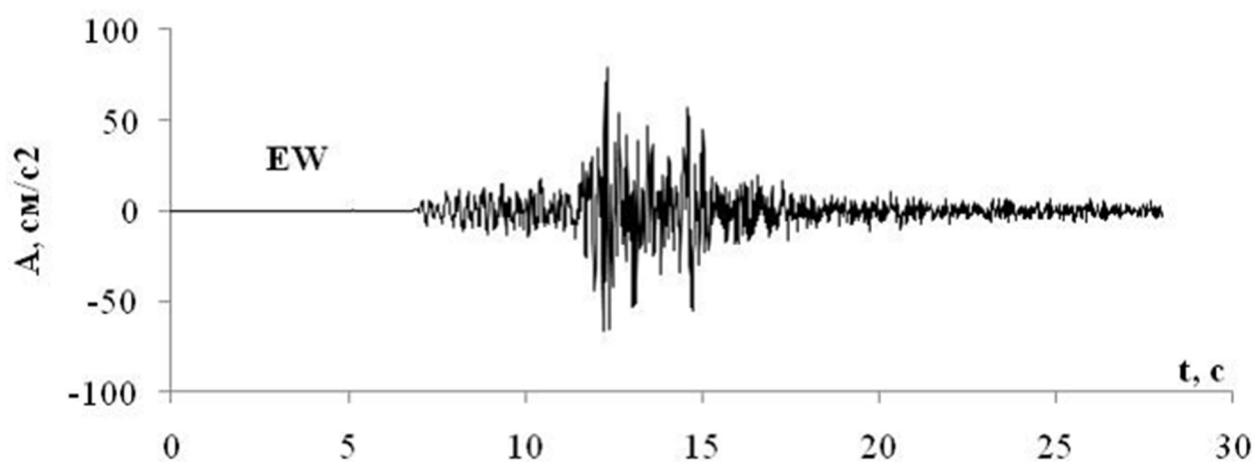


Рисунок 4. График горизонтальной составляющей акселерограммы

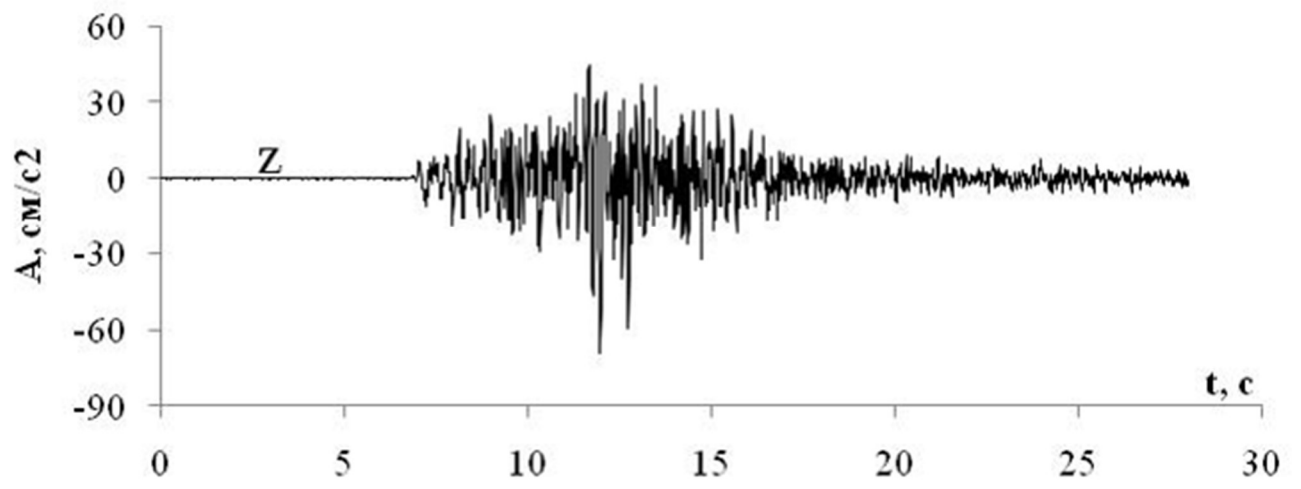


Рисунок 5. График вертикальной составляющей акселерограммы

ГЛАВА 3. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ В ABAQUS

3.1 Математическая модель

Рассматривается взаимодействие и реакция системы «сооружение – основание - водохранилище» под действием сейсмических сил. Получим уравнение для перемещений конечных элементов:

$$M\ddot{u} + B\dot{u} + Cu = -MW_0$$

$$W_0 = I_x X_0 + I_y Y_0$$

Где M, B, C - матрицы масс, демпфирования и жесткости системы; u – вектор узловых перемещений; X_0, Y_0 - компоненты вектора ускорения по координатным осям; I_x, I_y – векторы направляющих косинусов;

Для того, чтобы учесть демпфирование системы и обеспечить затухание колебаний, воспользуемся методом демпфирования по Рэлею. Представим матрицы демпфирования в виде линейной комбинации матриц масс и жесткости [3]:

$$B = \alpha M + \beta K$$

Где α и β – коэффициенты пропорциональности матриц массы и жесткости соответственно.

Для создания конечно-элементной модели и проведения расчетов использованы инструменты программного комплекса SIMULIA ABAQUS (Dassault Systèmes) [5].

3.2 Создание модели в программе

Рельеф основания воссоздается согласно чертежу (Рис. 11). Основание ограничивается дугой радиуса 290м. Сечение плотины создается по чертежу.

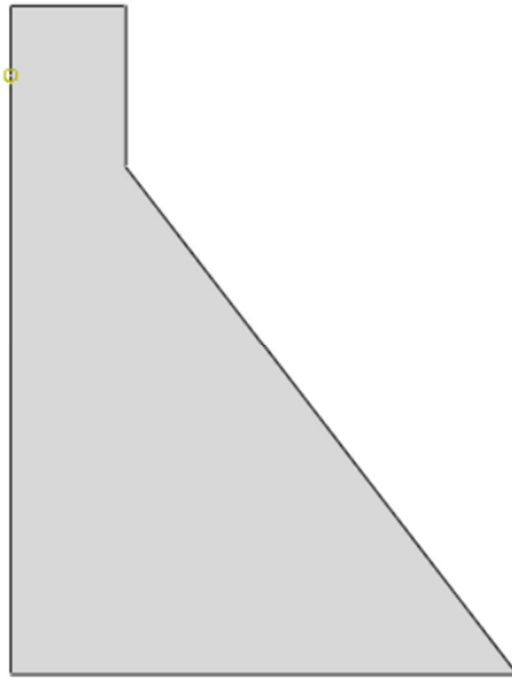


Рисунок 6. Модель плотины

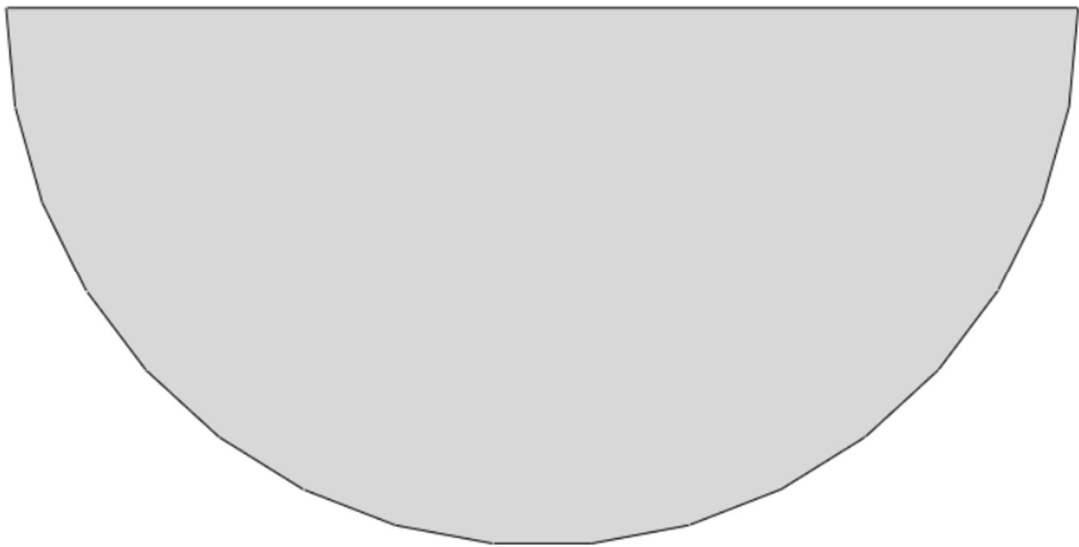


Рисунок 7. Основание

3.3 Расчет статической задачи

Для определения итогового напряженно-деформированного состояния необходимо посчитать и объединить результаты двух моделей: статической с гравитационной нагрузкой и гидростатическим давлением и динамической с сейсмическим воздействием [2].

Рассмотрим статическую задачу: необходимо задать граничные условия в виде жесткой заделки внешней грани основания, приложить к плотине собственный вес, и линию уровня верхнего бьефа к системе «сооружение-основание» [11]. Статическая нагрузка включает в себя собственный вес самого гидротехнического сооружения и гидростатическое давление, действующее на дно водохранилища и напорную грань плотины, которое распределяется по закону $9800 * (130 - Y)$, то есть равно нулю на поверхности воды и ρgh у дна, ρ – плотность воды, h - высота водяного столба. В данной задаче уровень верхнего бьефа равен 130 м.

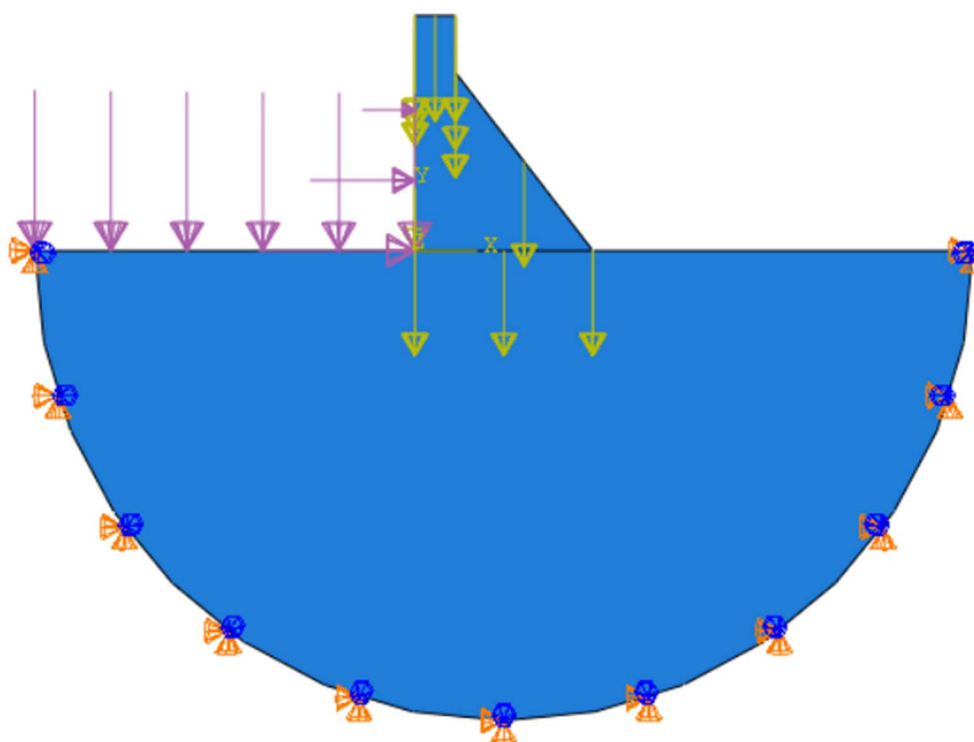


Рисунок 8. Граничные условия и нагрузки в статической модели.

Параметры материалов, используемых для расчета, указаны в таблице 2.

Далее необходимо построить сетку из элементов Tri, при этом соблюсти условие: площади граней (длины ребер) элементов, выходящих на полуокружную границу основания, должны быть примерно равны. Это необходимо для корректного ответа бесконечной границы в виде пружин в дальнейшем, т. к. будут рассчитываться общие коэффициенты жесткости и демпфирования. Средний размер элемента зададим равным 10 м. Произведем расчет, рассмотрим горизонтальные компоненты:

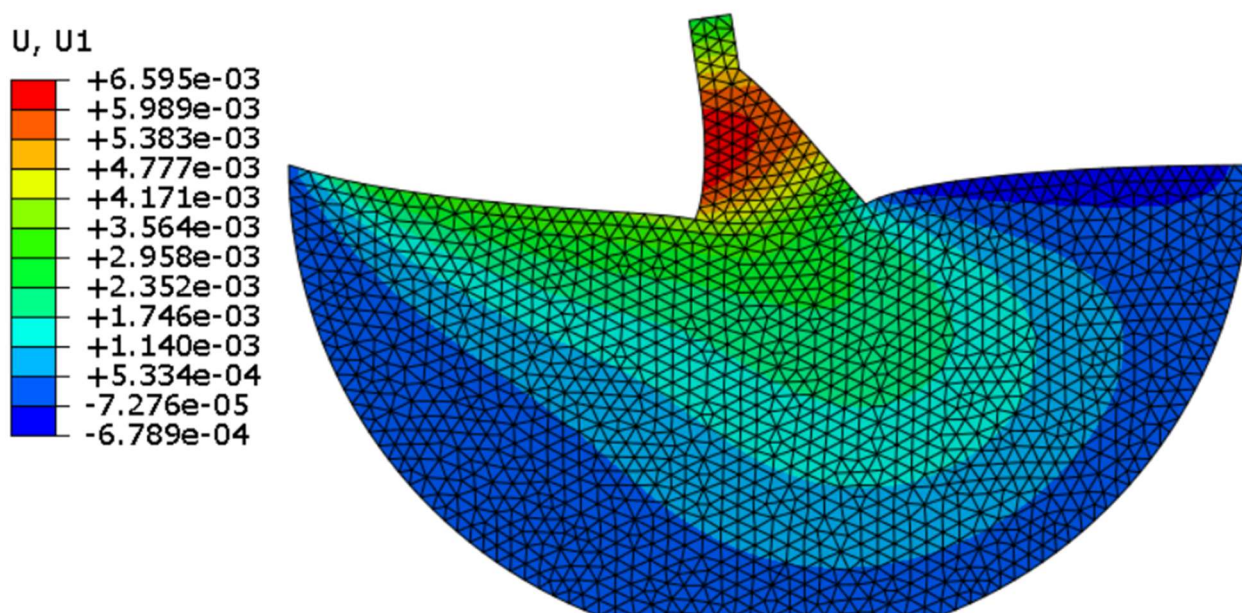


Рисунок 9. Горизонтальная компонента перемещений, м

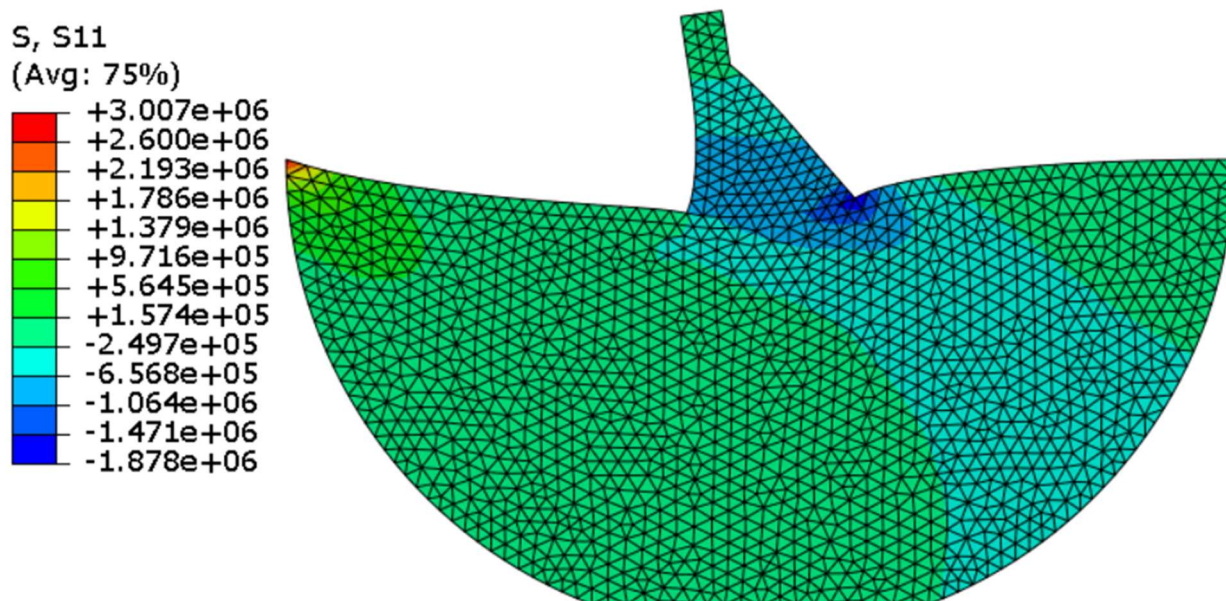


Рисунок 10. Горизонтальная компонента напряжений, Па

Максимальные перемещения составили 6,6 мм в средней части плотины у напорной грани. Максимальные напряжения в плотине сконцентрированы в месте стыка подпорной грани с основанием.

Рассмотрим вертикальные компоненты:

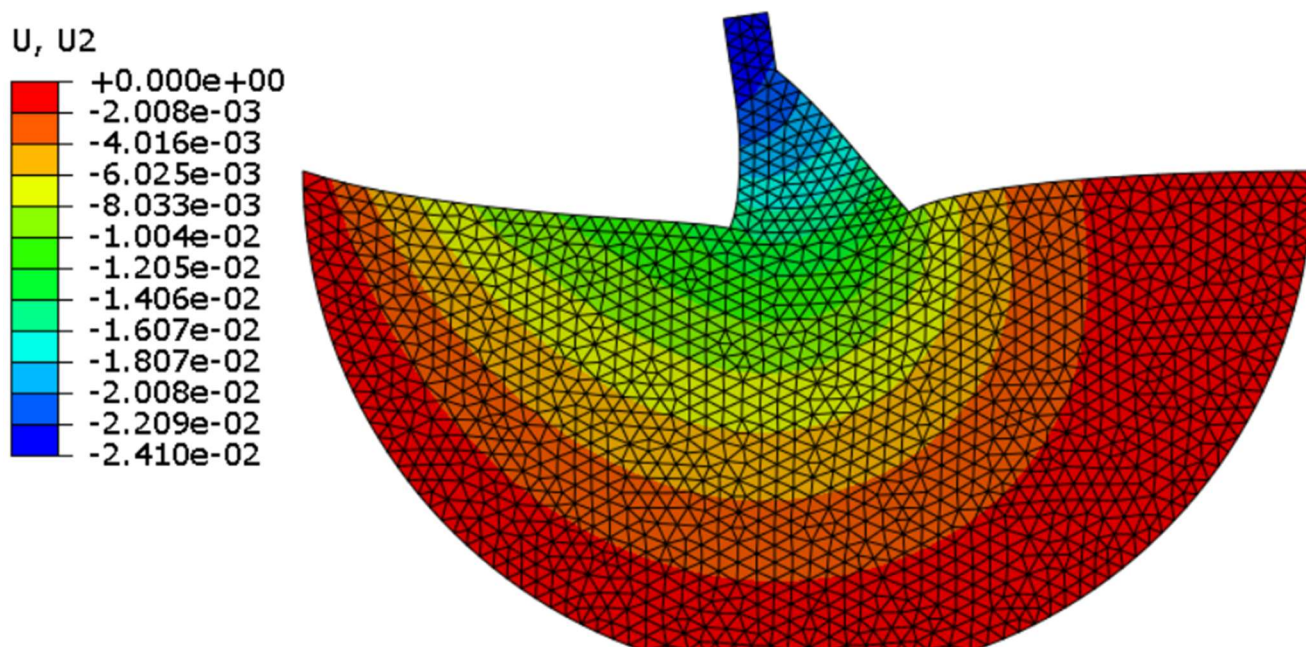


Рисунок 11. Вертикальная компонента перемещений, м

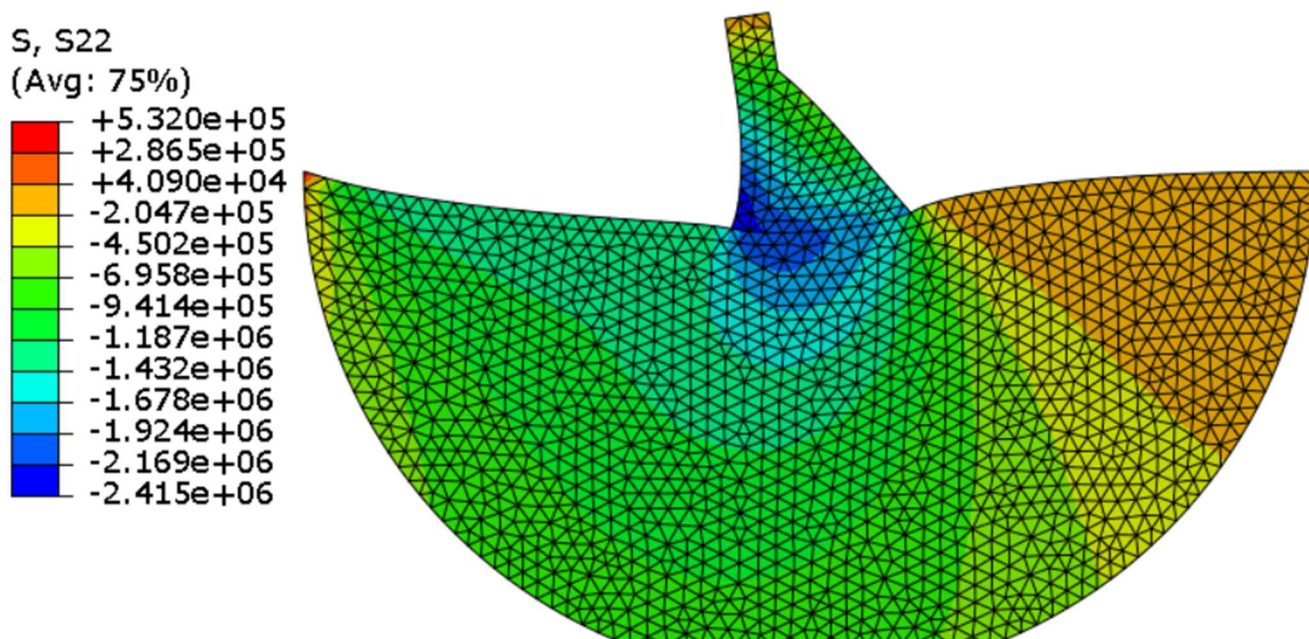


Рисунок 12. Вертикальная компонента напряжений, Па

Максимальные перемещения составили 24 мм на гребне плотины. Максимальные напряжения в плотине сконцентрированы в месте стыка напорной грани с основанием.

Проведен анализ сеточной сходимости при размерах элементов 15, 10, 7 и 5 м. Во всех случаях результаты практически не отличались (в рамках погрешности менее 0,3%). В угоду оптимизации было решено использовать сетку с элементами размера 10 м.

Зависимость максимальных перемещений от размера элемента

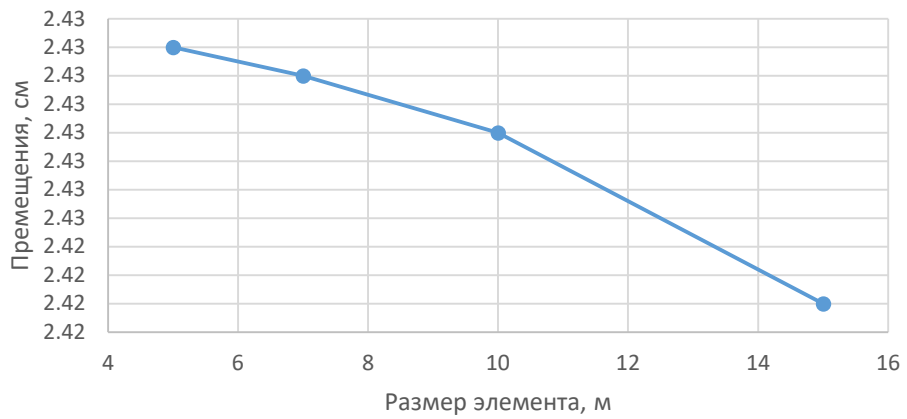


Рисунок 13. Зависимость максимальных перемещений от размера элемента

Зависимость максимальных напряжений от размера элемента

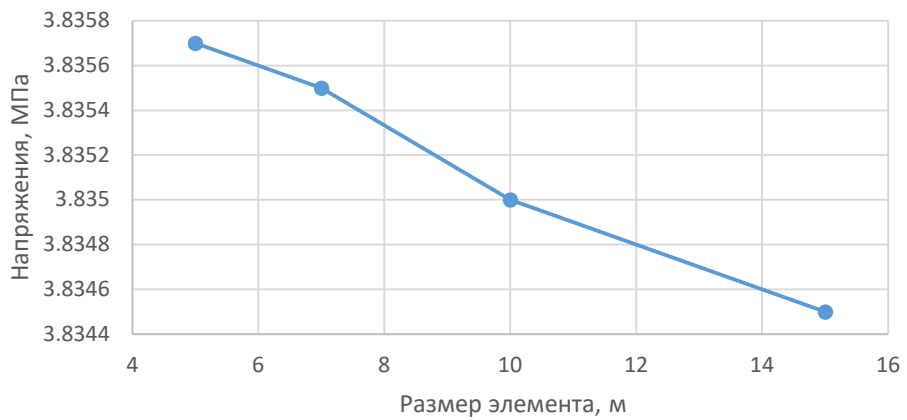


Рисунок 14. Зависимость максимальных напряжений от размера элемента

3.4 Вычисление коэффициентов демпфирования

В данной системе для конечно-элементной твердотельной части модели используется демпфирование по Рэлею. Демпфирование по Рэлею — это метод демпфирования, который используется для снижения колебаний и вибраций в системах. Он основан на принципе добавления дополнительных демпферов к системе, чтобы поглощать и рассеивать энергию колебаний.

В методе демпфирования по Рэлею используются специальные устройства, называемые демпферами по Рэлею или демпферами массы. Эти устройства представляют собой массовые элементы, которые подвешиваются к системе с помощью пружин и демпферов. При колебаниях системы демпферы по Рэлею начинают двигаться, поглощая и рассеивая энергию колебаний [8].

Демпферы по Рэлею могут быть использованы в различных инженерных системах, таких как здания, мосты, сооружения, чтобы снизить воздействие сейсмических или других динамических нагрузок. Эффективность демпфирования по Рэлею зависит от правильного выбора параметров демпферов, таких как их масса, жесткость и демпфирование. Недостаточное или неправильное демпфирование может не привести к достижению желаемого эффекта и повысить риск повреждения системы.

Матрица демпфирования является результатом линейной комбинации матрицы масс и матрицы жесткости с соответствующими коэффициентами α и β : $B = \alpha M + \beta K$

Коэффициенты пропорциональности матриц масс и жесткости считаются по формулам:

$$\alpha = 2\xi\omega$$

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega}$$

Здесь ξ — коэффициент демпфирования, ω — основной тон собственных колебаний.

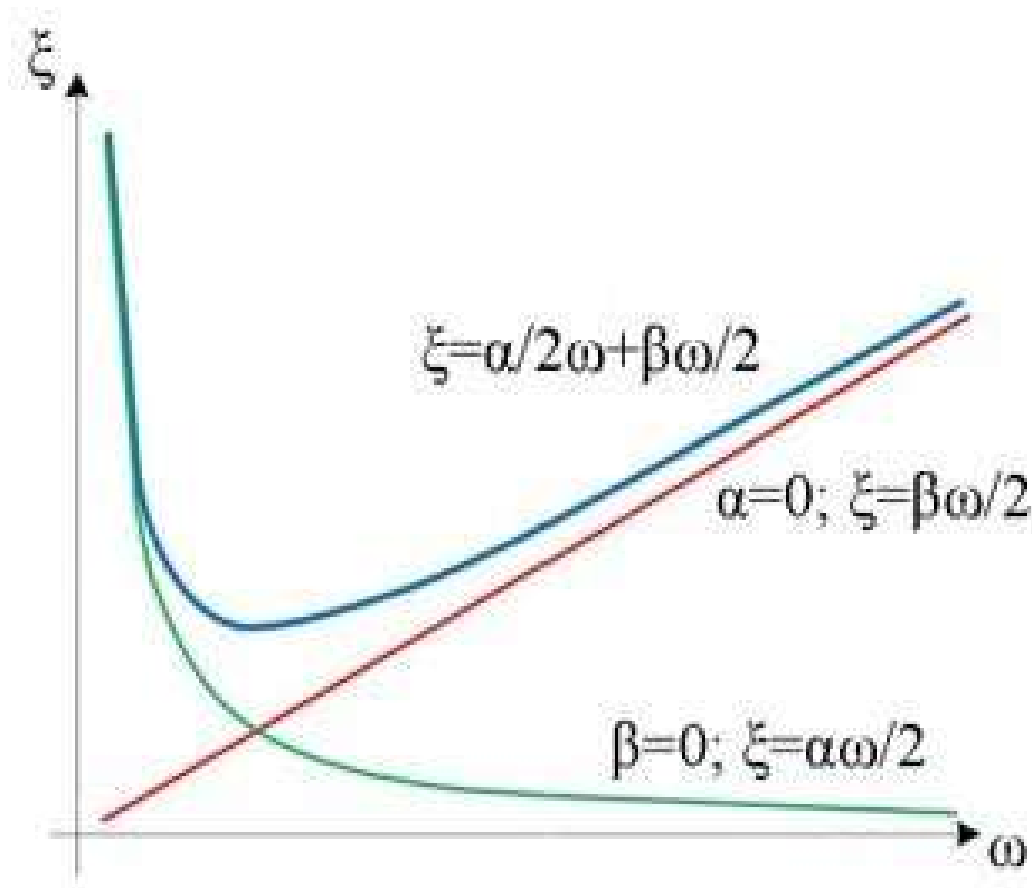


Рисунок 15. Зависимость коэффициента демпфирования от частоты по Рэлею
Итоговые коэффициенты демпфирования α и β :

$$\alpha = 1.57475473354$$

$$\beta = 0.00635019523$$

3.5 Расчет динамической задачи

В динамической задаче также будет рассмотрена реакция воды в водохранилище на сейсмическое воздействие, распространение волн в ней и ее взаимодействие с сооружением и основанием. Для моделирования реакции воды в Abaqus используются конечные акустические элементы AC2D4 и бесконечные ACIN2D2, узлы которых не имеют свободы перемещений, но имеют давление [6]. Создадим ее модель:

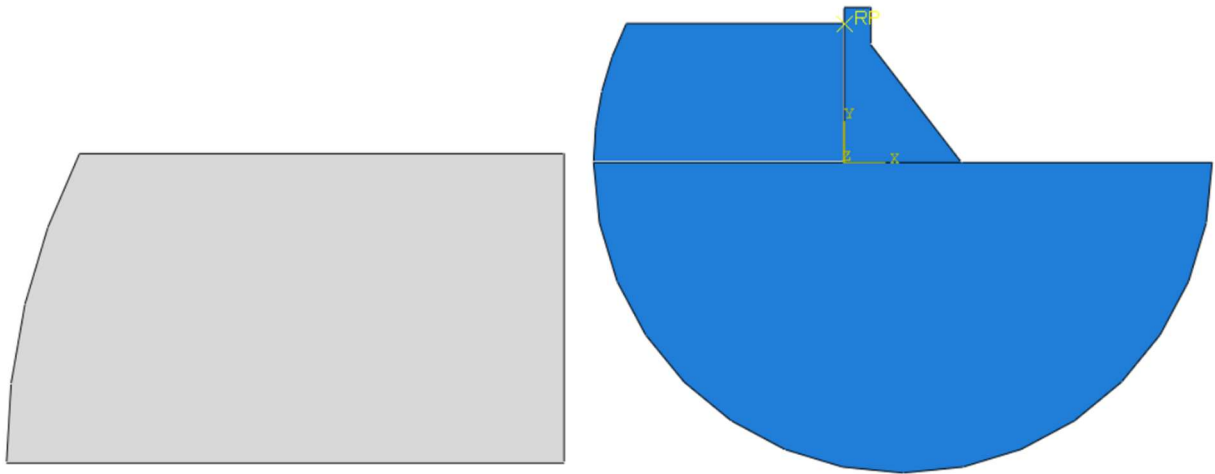


Рисунок 16. Модель жидкой среды отдельно и в общей сборке.

Также на скругленную границу модели воды создан stringer, который служит началом для бесконечных акустических элементов типа ACIN2D2, которые необходимы для корректного учета распространения волн в водохранилище.

На верхней поверхности конечной модели воды задается граничное условие – давление равно нулю. На контактных поверхностях «сооружение - водохранилище» и «сооружение - основание» задаются контактные взаимодействия типа Tie, связывающие переменные давления в водохранилище и переменные перемещения в плотине и основании.

Для соблюдения условия неотражения волн от границ основания нужно задать особые граничные условия, а именно - двойную асимптотическую границу и вязкую границу, в виде демпферов и пружин, которые являются бесконечным продолжением грани основания, представляющей собой полуокружность [12].

Для назначения пружин на граничные узлы сетки создается цилиндрическая система координат в центре подошвы плотины, таким образом расстояние от источника волн до местоположения узла всегда будет одинаковым и равным радиусу полуокружности, на которой располагается основание, что дополнительно упростит расчет коэффициентов [4]. Параметры демпферов и пружин вычисляются по следующим формулам:

$$K_{ln} = a_n \frac{2G}{r} A_l; C_{ln} = b\rho c_p A_l$$

$$K_{ls} = a_s \frac{G}{2r} A_l; C_{ls} = b\rho c_s A_l$$

Формулы для значений скоростей c_p и c_s :

$$c_p = \sqrt{\frac{2G(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)}}$$

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Где ν – коэффициент Пуассона, G – модуль сдвига.

В данной задаче при расчете динамической модели используется коэффициент Пуассона равный 0.2, модуль сдвига равный 24 ГПа. Также при расчете сейсмического воздействия задается плотность материала основания (скалистый грунт), равная 2500кг/м³ В результате расчетов получились следующие значения:

К каждому узлу основания приложены 2 элемента типа «springs/dashpots», по нормали и по касательной.

Таблица 2. Коэффициенты пружин и демпферов.

	Нормальные	Тангенциальные
Пружины	1714500000 Н/м	428625000 Н/м
Демпферы	126375000 Нс/м	77375000 Нс/м

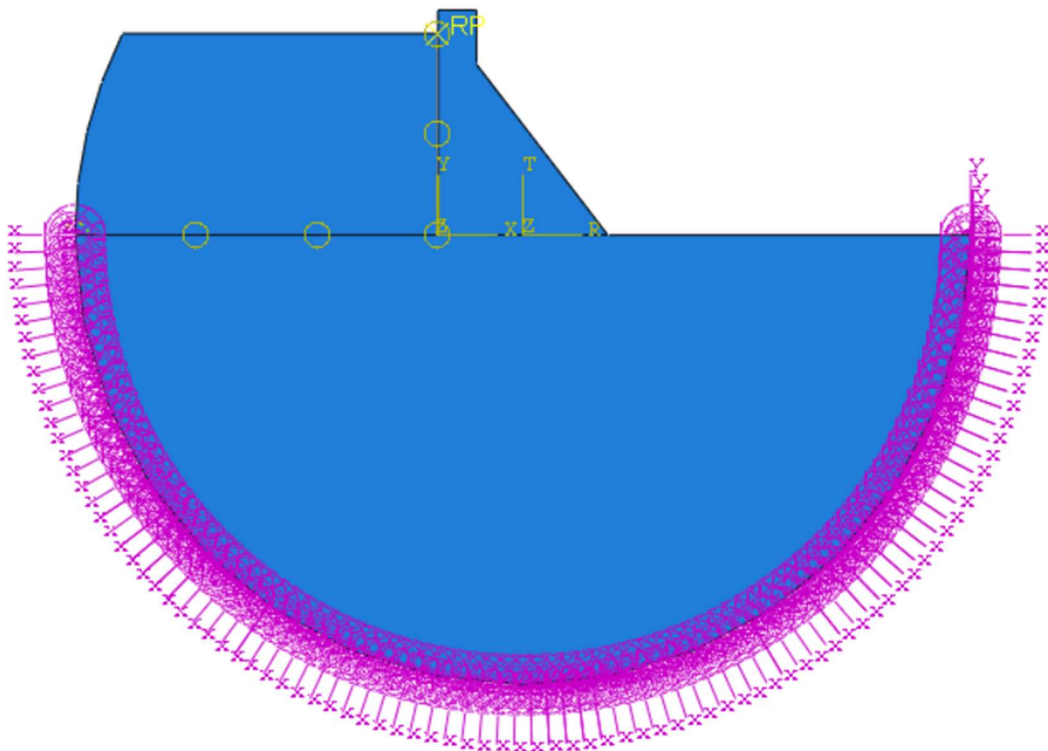


Рисунок 17. Пружины и демпферы на границе основания.

Таблица 3. Характеристики модели в *Abaqus*.

	Плотина	Основание	Водохранилище	Бесконечная граница	Всего
Количество элементов	193	2770	286	13	3262
Количество узлов	121	1461	322	14	1892
Тип элементов	CPE3	CPE3	AC2D4	ACIN2D2	

Визуализация результатов расчетов для момента времени $t = 19,12$ с приведена ниже:

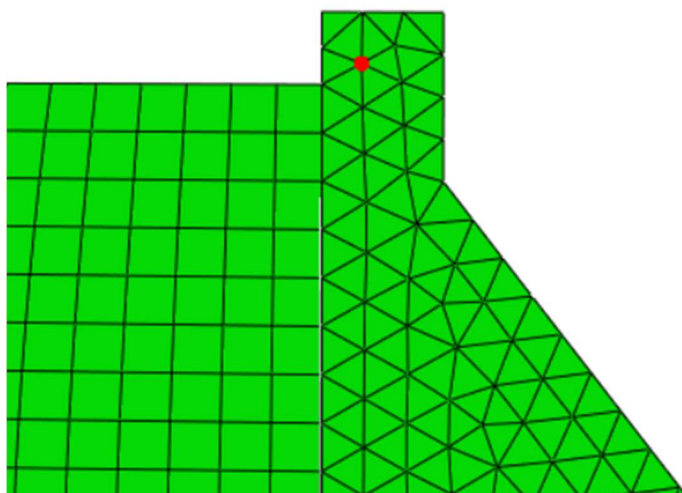


Рисунок 18. Узел, в котором рассматриваются значения в момент времени $t = 19,12$ с

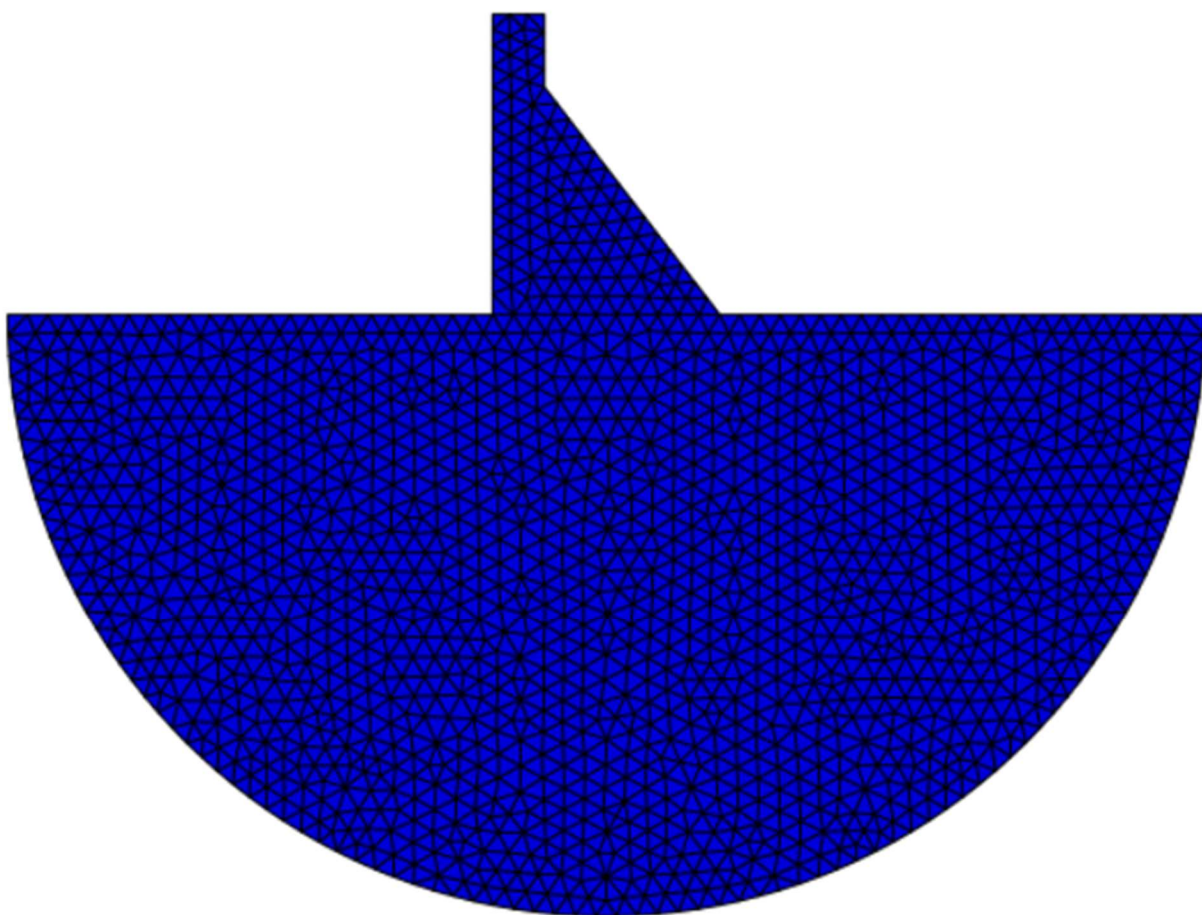


Рисунок 19. Недеформированное состояние

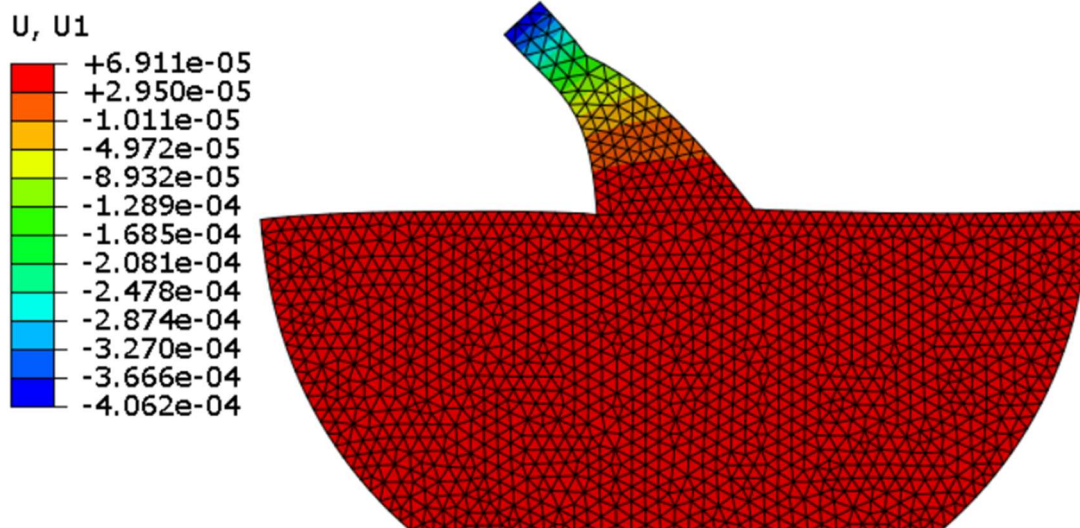


Рисунок 20. Горизонтальные перемещения, м

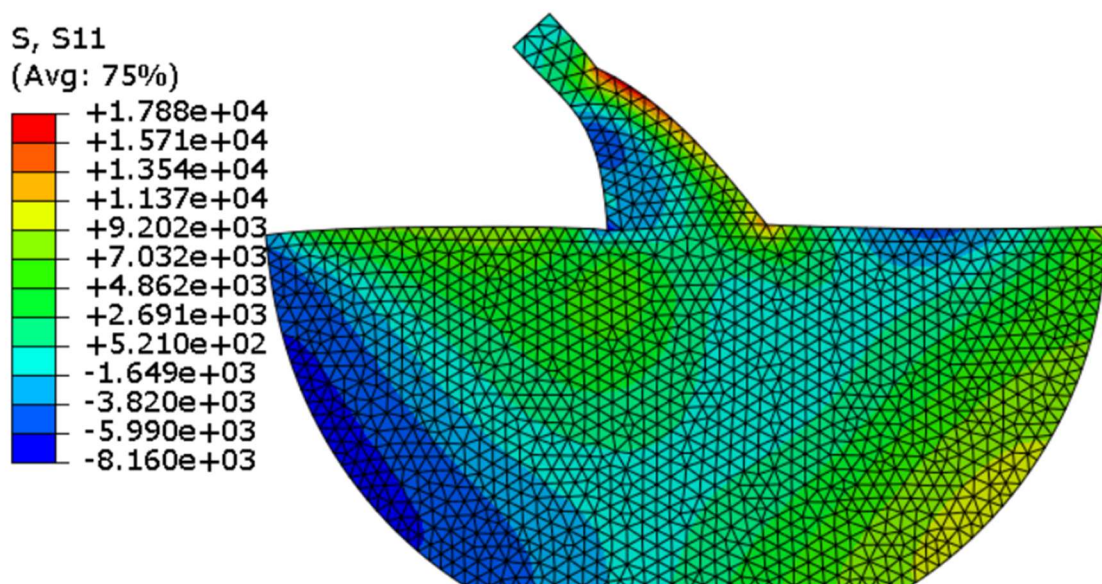


Рисунок 21. Горизонтальные напряжения, Па

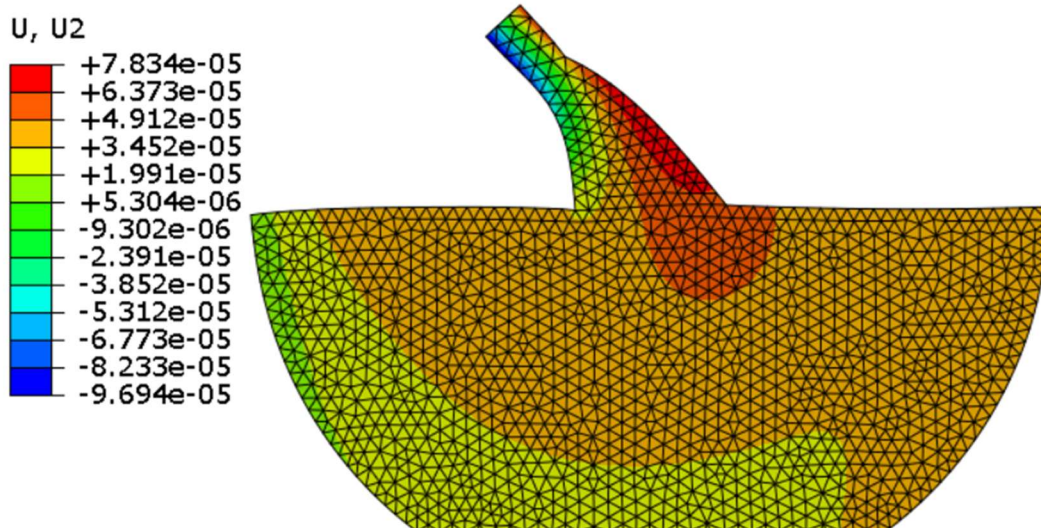


Рисунок 22. Вертикальные перемещения, м

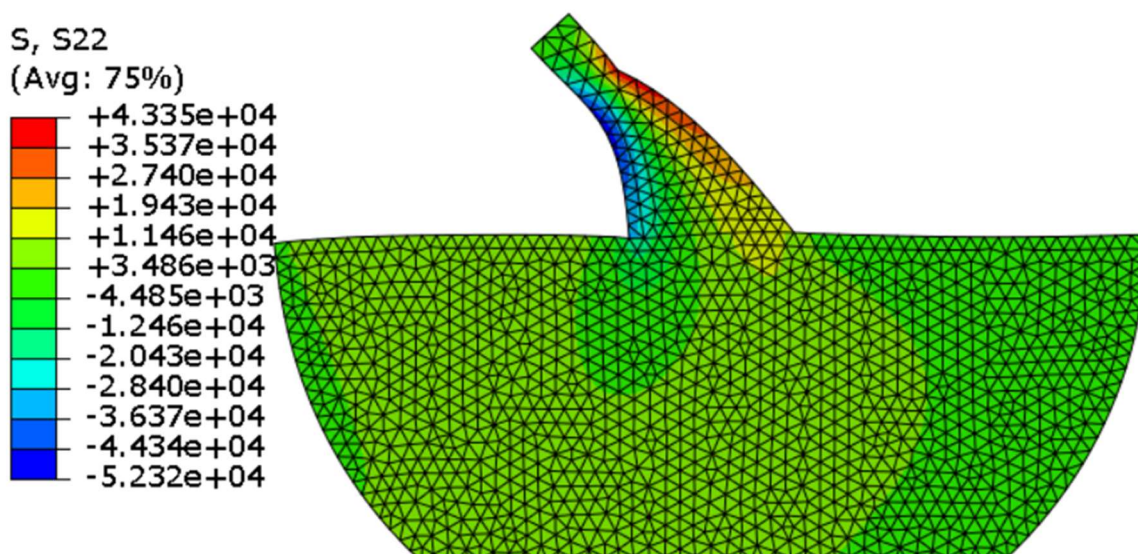


Рисунок 23. Вертикальные напряжения, Па

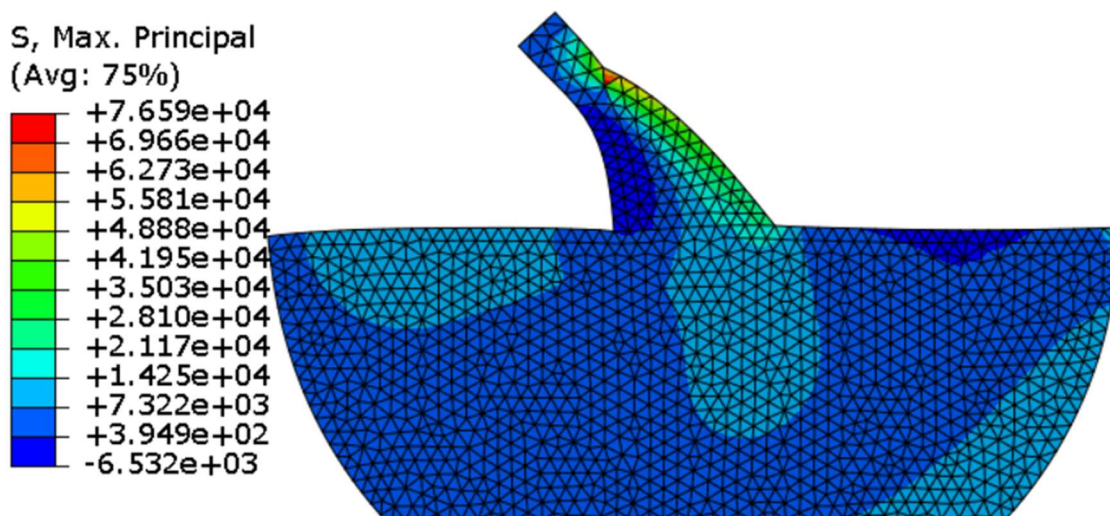


Рисунок 24. Первые главные напряжения, Па

Хронограмма горизонтальных напряжений

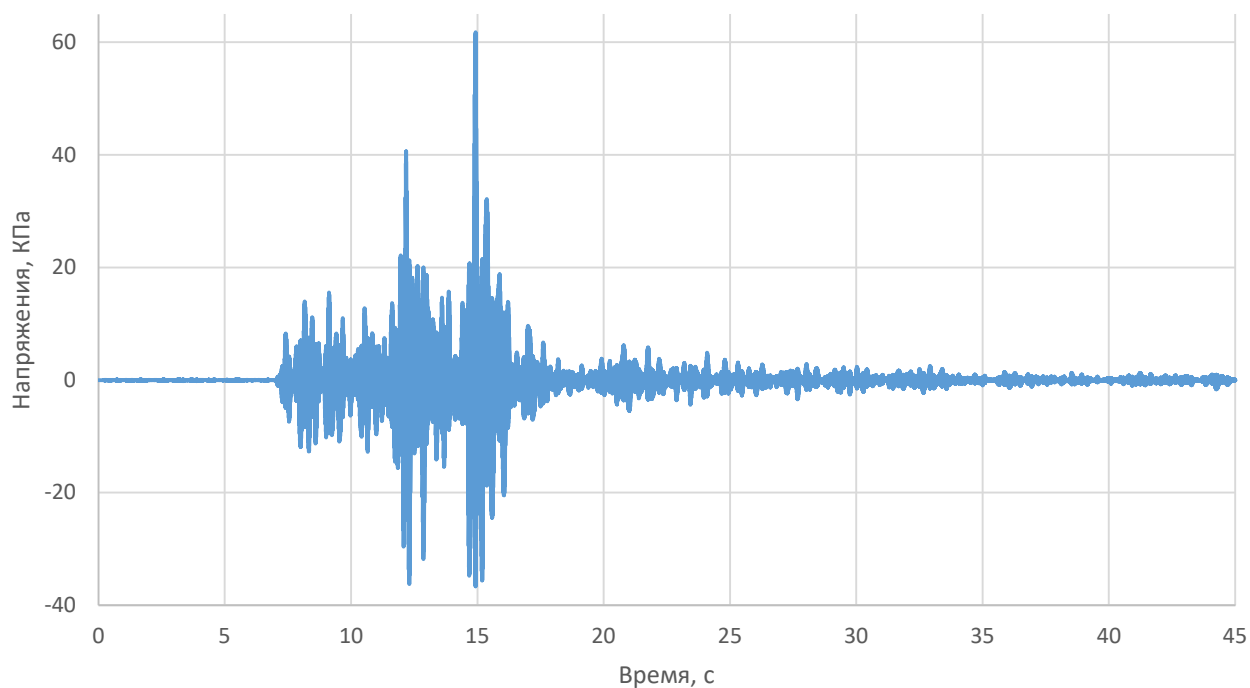


Рисунок 25. Горизонтальные напряжения в узле на гребне плотины, КПа

Хронограмма вертикальных напряжений

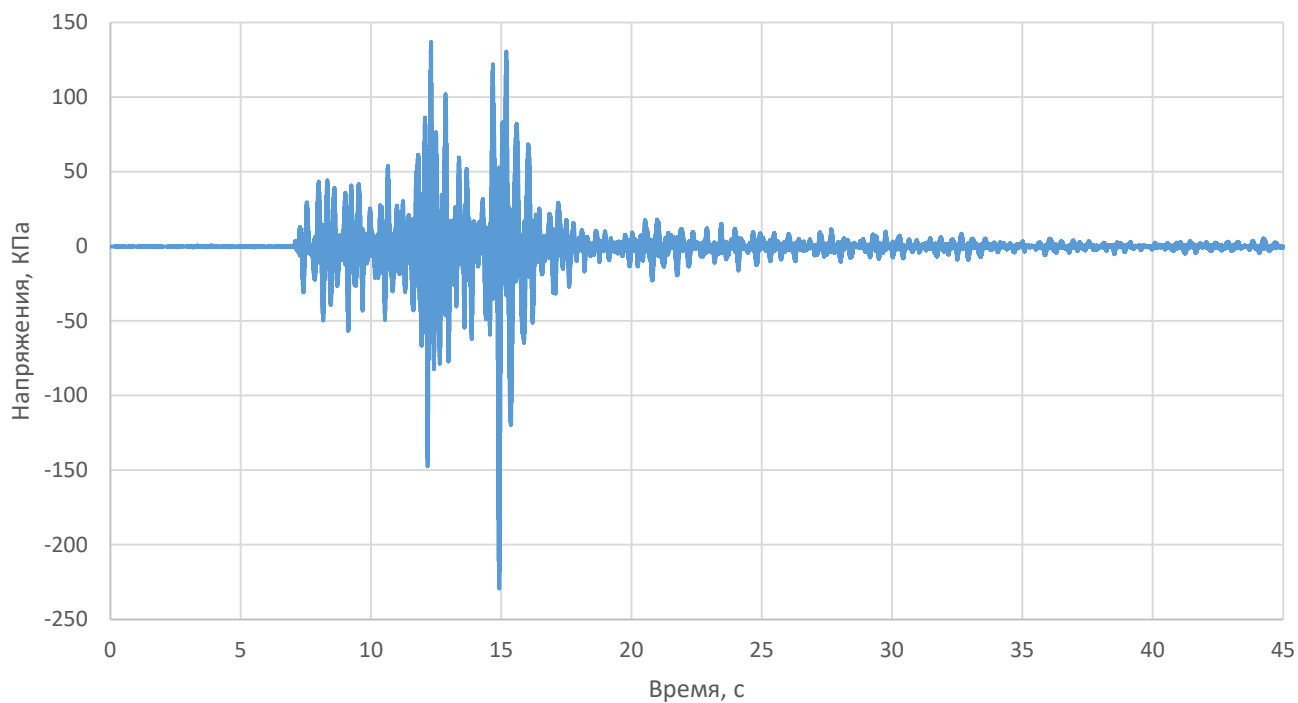


Рисунок 26. Вертикальные напряжения в узле на гребне плотины, КПа

Хронограмма горизонтальных перемещений

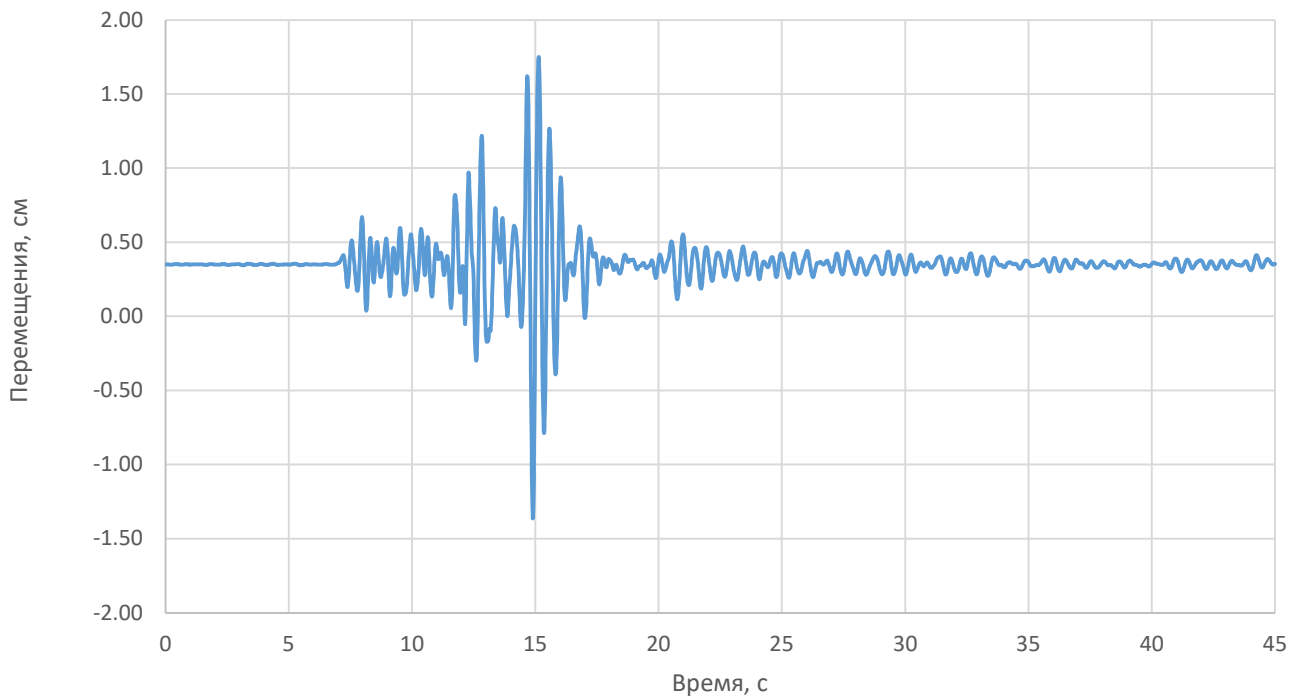


Рисунок 27. Горизонтальные перемещения в узле на гребне плотины, см

Хронограмма вертикальных перемещений

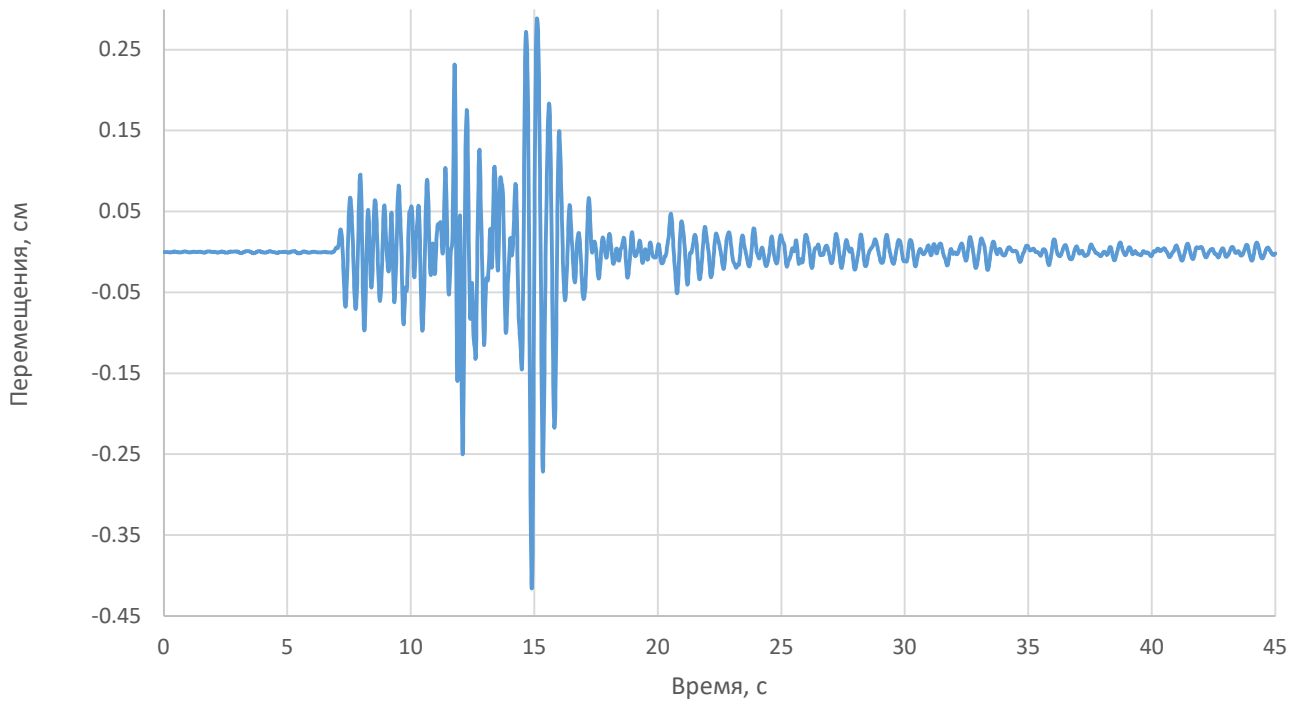


Рисунок 28. Вертикальные перемещения в узле на гребне плотины, см.

Графики напряжений в узле на гребне плотины показывают, что наибольшая нагрузка пришлась на вертикальную составляющую, и достигла 230 КПа. Величина весьма небольшая, ввиду широкого в сечении фундамента плотины и умеренной магнитуды землетрясения в 6,3 балла.

Из графиков перемещений можно сделать вывод, что максимальные перемещения достигаются по горизонтальной оси, в промежуток времени с 14,9 с до 15,14 с. Величина колеблется от $-17,2$ мм до $+14$ мм. Максимальная амплитуда составляет 31 мм, средняя среди крупных толчков – 13 мм.

Можно заметить, что максимальные напряжения и перемещения в плотине соответствуют пикам на графике акселерограммы, что говорит о корректном учете демпфирования в системе, а также соответствии полученного решения реальной картине землетрясения и распространения сейсмических волн. [15].

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1 Напряжения в самом нагруженном узле

В результате расчетов динамической задачи получены данные напряжений и перемещений в твердотельной части. По полученным данным построены графики перемещений в узле на гребне плотины и напряжений в узле в самой нижней точке на напорной грани плотины (Рисунок 18).

Данные для узлов были сложены с результатами статического деформированного состояния [13].



Рисунок 29. Max Principal Stress в самом нагруженном узле, МПа.

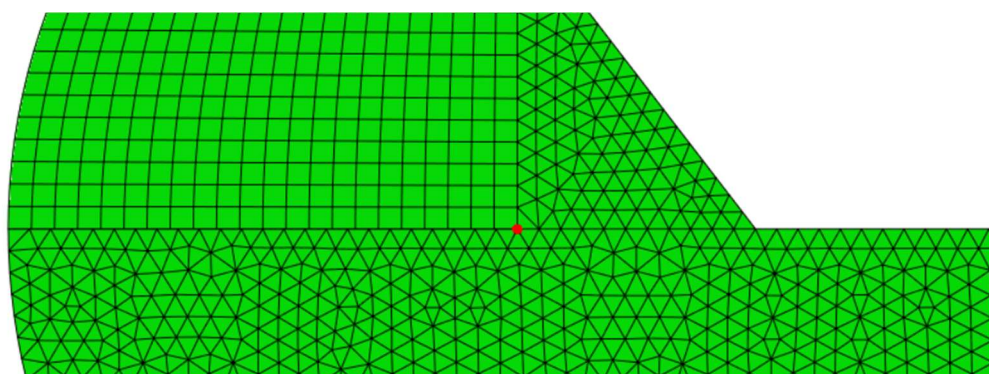


Рисунок 30. Самый нагруженный узел в системе.

Хронограмма суммарных вертикальных напряжений

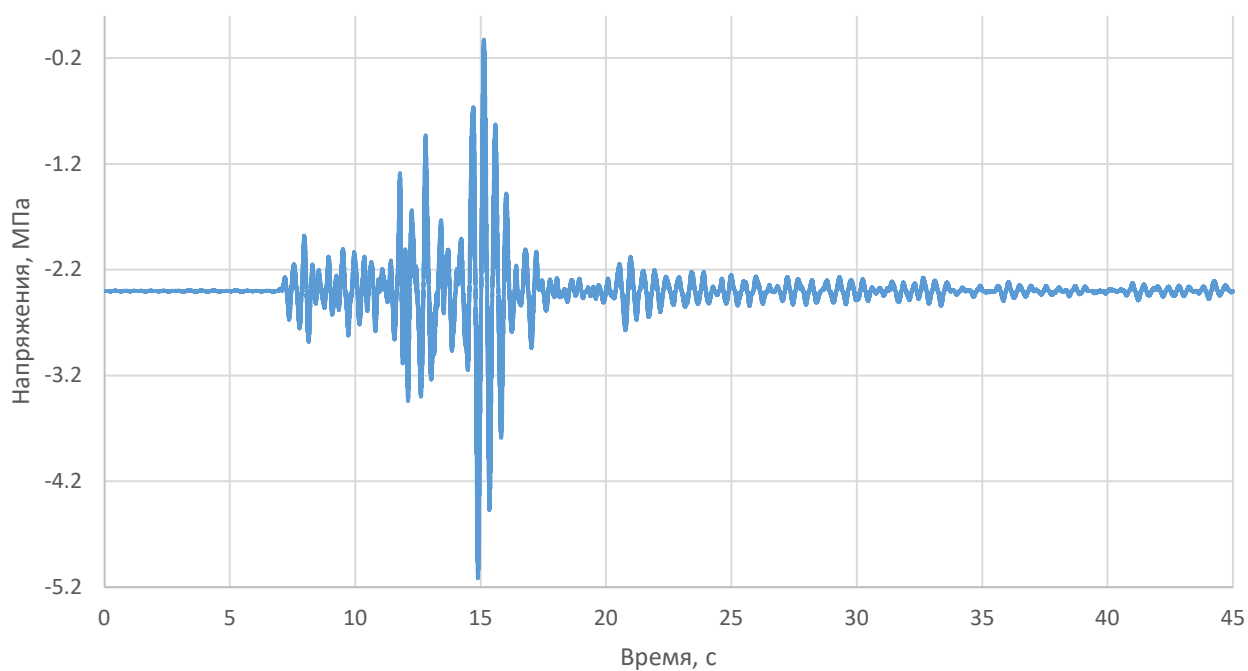


Рисунок 31. Вертикальные напряжения в самом нагруженном узле, МПа.

Хронограмма суммарных горизонтальных напряжений

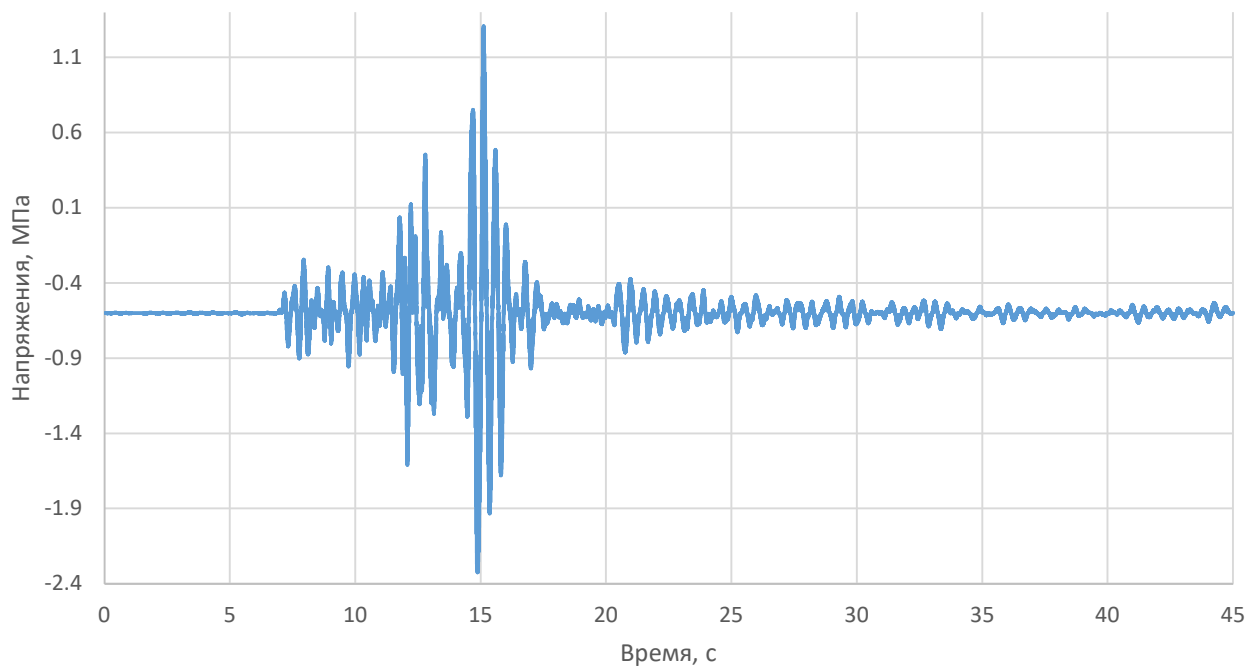


Рисунок 32. Горизонтальные напряжения в самом нагруженном узле, МПа

S, S11
(Avg: 75%)

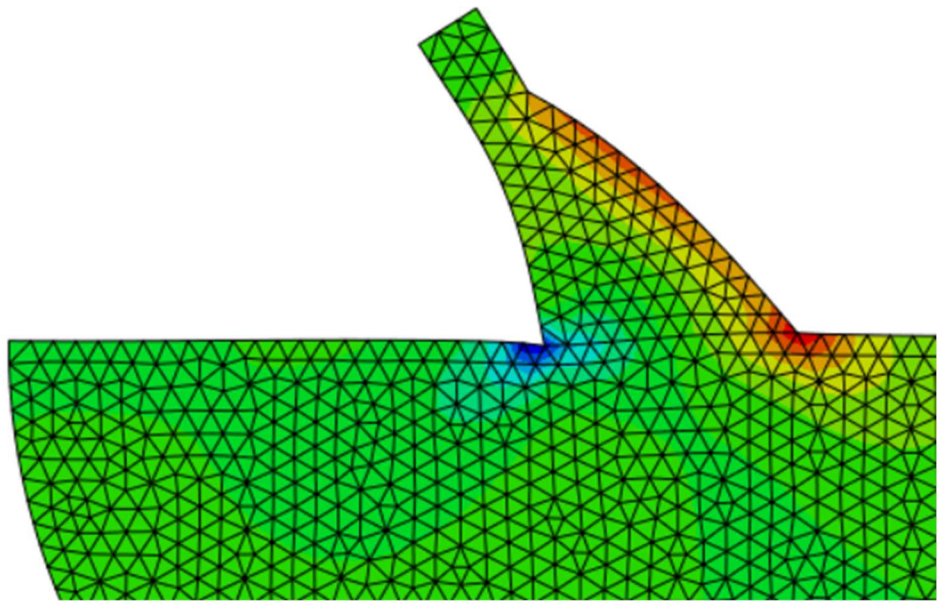
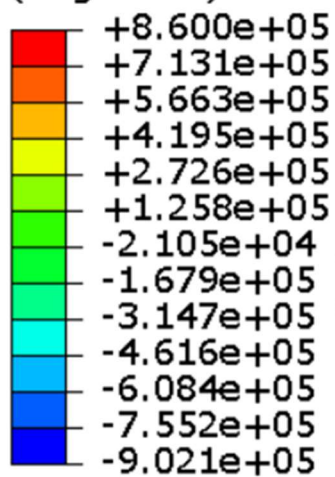


Рисунок 33. Горизонтальные напряжения в момент наибольшей нагрузки, Па, $t = 14,91$ с

S, S22
(Avg: 75%)

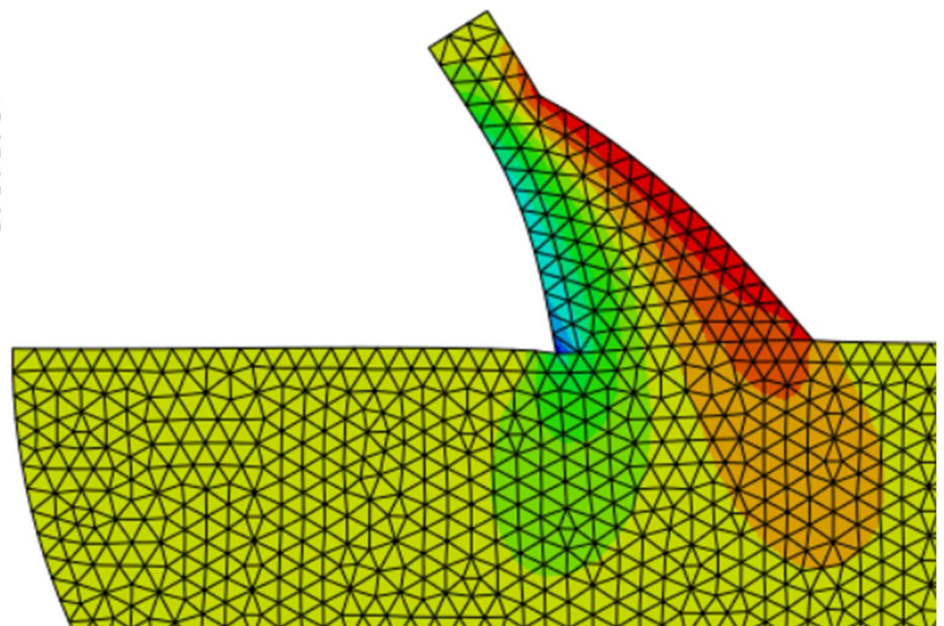
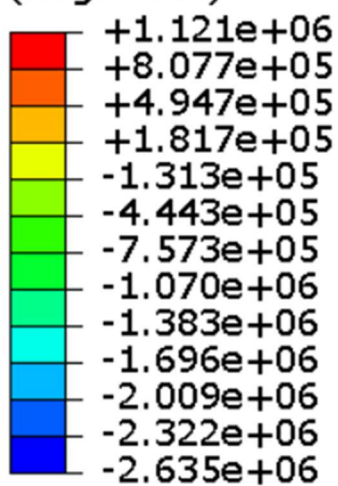


Рисунок 34. Вертикальные напряжения в момент наибольшей нагрузки, Па, $t = 14,91$ с

S, Max. Principal
(Avg: 75%)

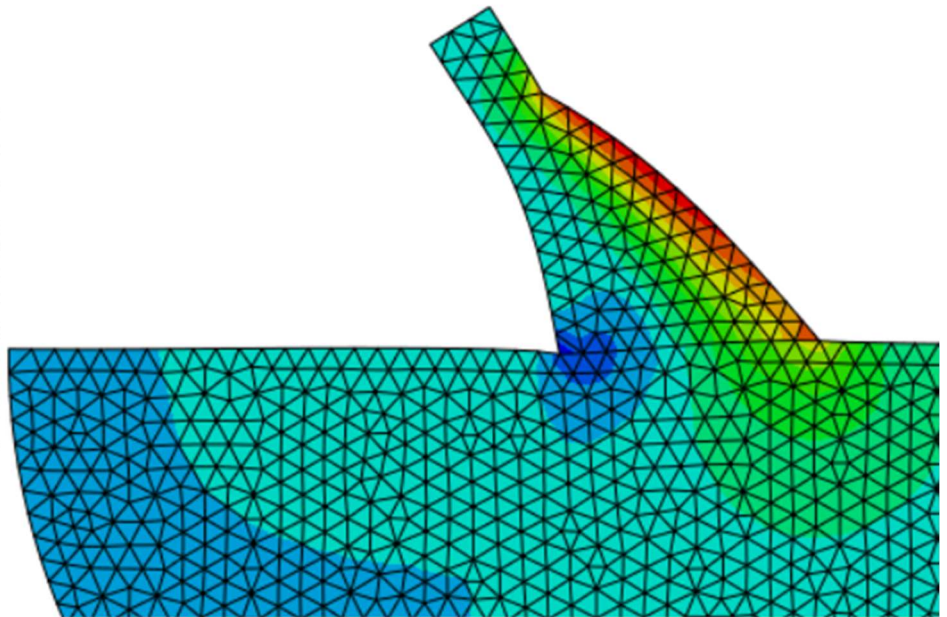
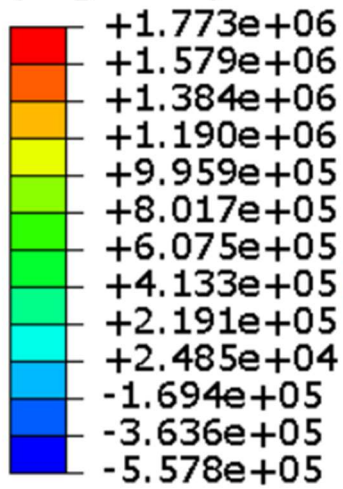


Рисунок 35. Первые главные напряжения в момент наибольшей нагрузки, Па, $t = 14,91$ с

Согласно графикам, максимальные суммарные напряжения в узле в самой нижней точке на напорной грани плотины достигают 5,1 МПа, из них большая часть приходится на вертикальную компоненту.

4.2 Перемещения на гребне плотины

Хронограмма суммарных горизонтальных перемещений

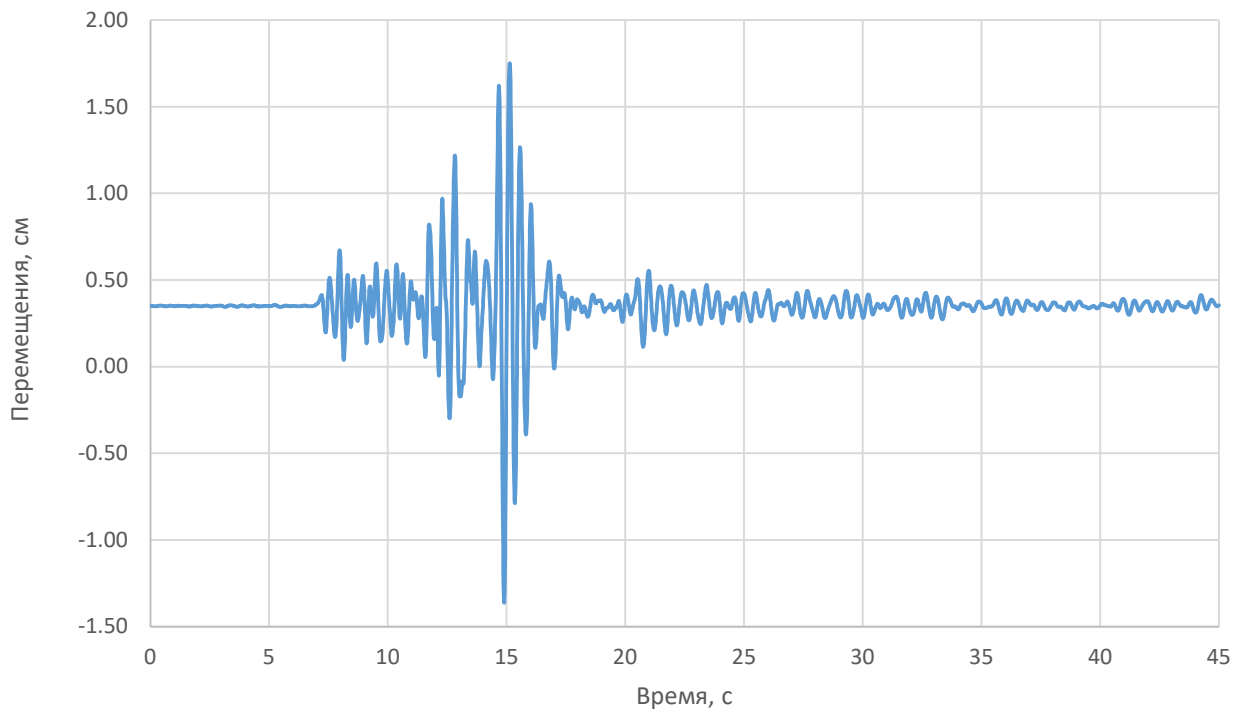


Рисунок 36. Горизонтальные перемещения в узле на гребне плотины, см

Хронограмма суммарных вертикальных перемещений

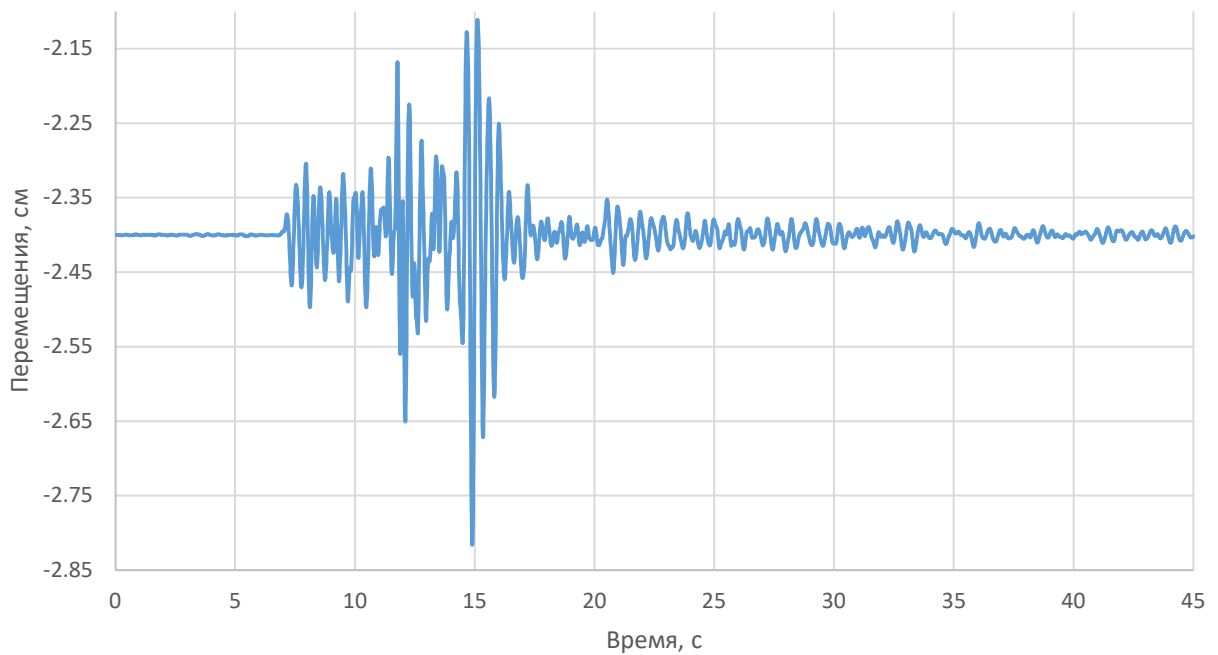


Рисунок 37. Вертикальные перемещения в узле на гребне плотины, см

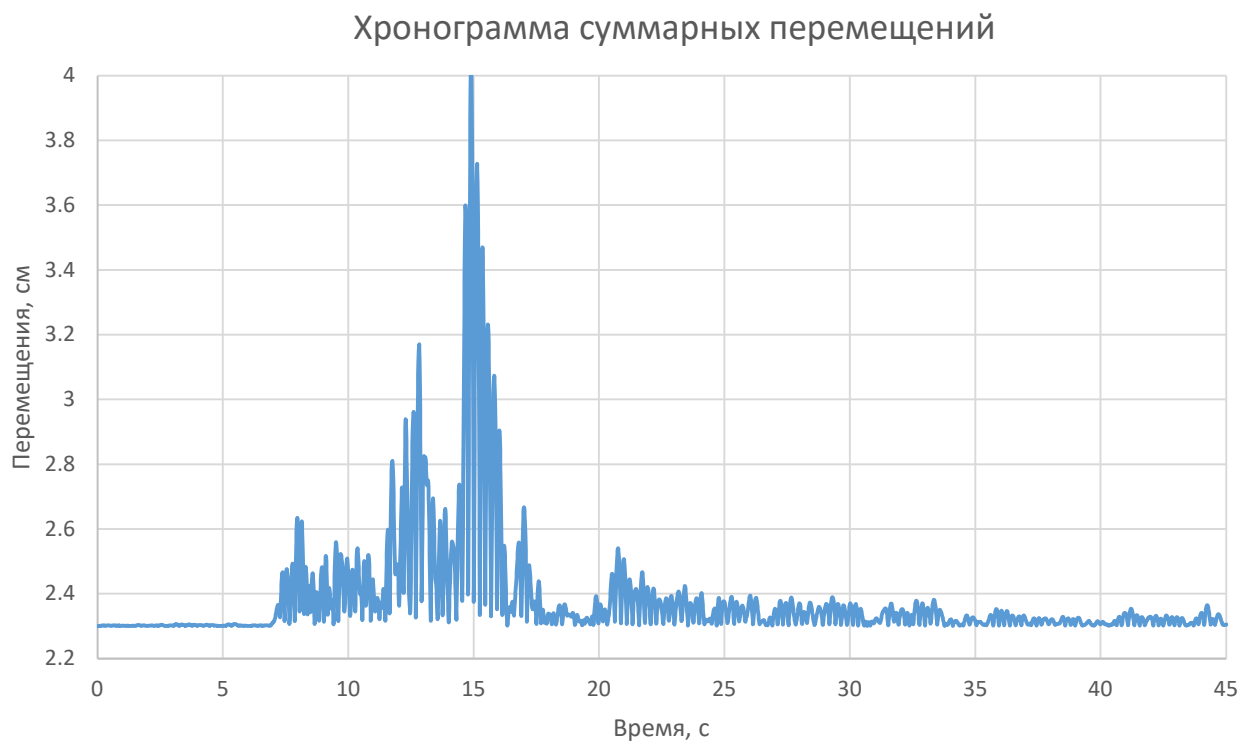


Рисунок 38. Суммарные перемещения в узле на гребне плотины, см

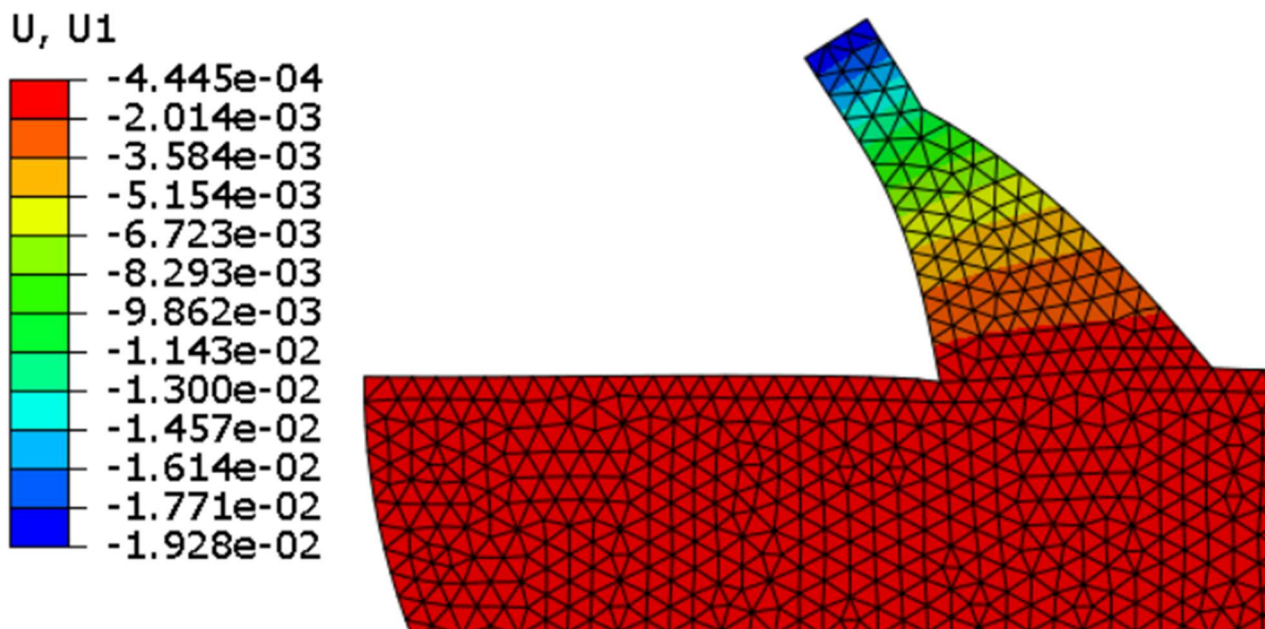


Рисунок 39. Горизонтальные перемещения в момент наибольшей нагрузки, м, $t = 14,91$ с

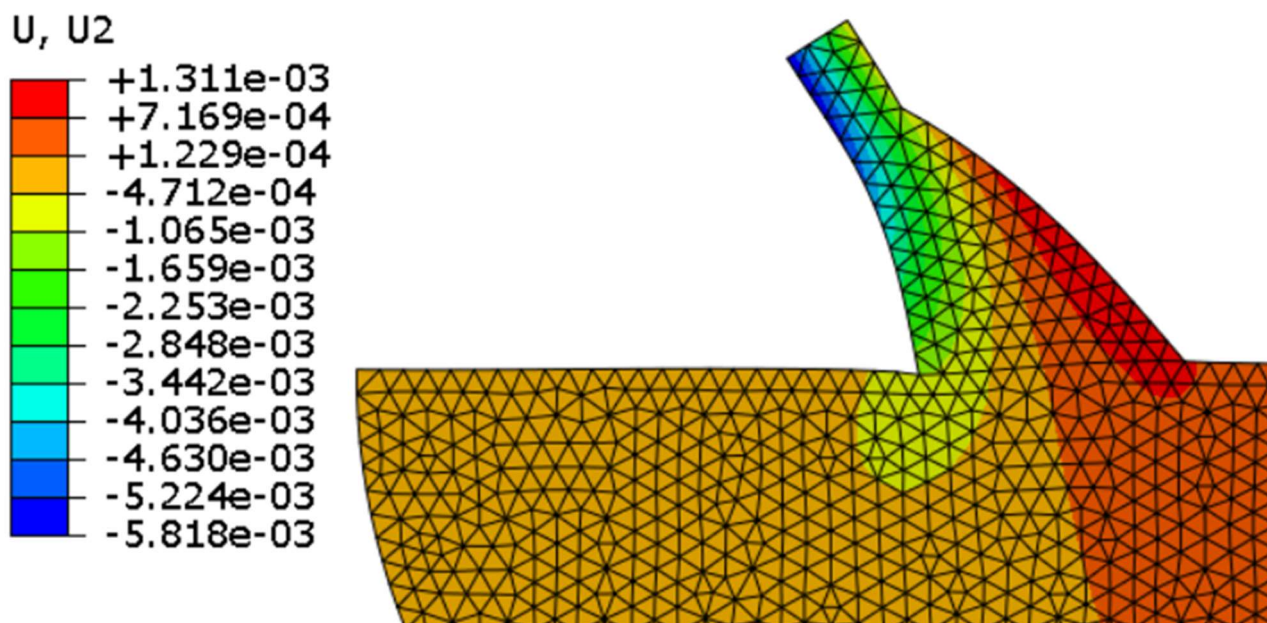


Рисунок 40. Вертикальные перемещения в момент наибольшей нагрузки, м, $t = 14,91$ с

Из графиков перемещений можно сделать вывод, что максимальные перемещения достигаются в промежуток времени с 14,9 с до 15,14 с. Максимальная амплитуда составляет 41 мм, средняя среди крупных толчков – 25 мм. Установленные нормы «безопасных» перемещений в 100 мм («опасных» - более 300 мм) для подобных сооружений позволяют сказать, что исследованное сейсмическое воздействие на плотину не окажет существенного влияния на состояние сооружения и его пригодность к эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проделанной работы было исследовано влияние сейсмического воздействия на статическое напряженно-деформированное состояние плотины с учетом неотражающих условий на границах, а также граничных условий в виде пружин, демпферов и бесконечной удаленной границы. Была создана конечно-элементная модель системы «сооружение – основание – водохранилище». В результате работы были определены перемещения и напряжения в системе при воздействии сейсмических сил. Произведено сравнение численных результатов, полученных в программном пакете SIMULIA ABAQUS (Dassault Systèmes), оценено влияние рассмотренной сейсмической нагрузки на напряженно-деформированное состояние плотины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Музаев И. Д., Музаев Н. И. Математическое моделирование сейсмических колебаний системы, состоящей из водохранилища, плотины, фундаментного блока и подфундаментных слоев грунта – Вычислительные технологии, том 20, № 4, 2015.
2. Gaohui Wang, Yongxiang Wang, Wenbo Lu, Mao Yu, Chao Wang, Deterministic 3D seismic damage analysis of Guandi concrete gravity dam: A case study. - Engineering Structures 148 263–276, 2017.
3. Барабаш М. С., Пикуль А.В. Материальное демпфирование при расчете конструкций на динамическое воздействие. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, / Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций, 13(3) 13–18, 2017, с. 1415.
4. Дмитриев Д. С. Уточненный динамический анализ напряженно-деформированного состояния трехмерной системы «основание – водохранилище - гидротехническое сооружение» при сейсмическом воздействии. – ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К. А. Тимирязева, 2019, 56 с.
5. Скворцова А. Е., Судакова В. Н., Цейтлин Б. В. Расчет сейсмических колебаний конструкций, взаимодействующих с жидкостью //Научно-технические проблемы прогнозирования надёжности и долговечности конструкций и методы их решения: Труды 4-й Международной конференции. СПб.: Нестор. – 2001. – С. 274.
6. Lee J., G. L. Fenves. Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures. - Journal of Engineering Mechanics, vol. 124, no. 8, 1998, pp. 892–900.
7. Morrison P., R. Maley, G. Brady, R. Porcella. Earthquake recordings on or near dams. USCOLD 2017 – 15с.
8. Nielsen A. H. Absorbing boundary conditions for seismic analysis in ABAQUS //ABAQUS users' conference. – 2006. – С. 359–376.

9. Pasbani-Khiavi M., Gharabaghi A. R. M., Abedi K. Dam-reservoir interaction analysis using finite element model //The 14 th world conference on earthquake engineering, October. – 2008. – C. 12–17
10. Rajib S., D.K. Paul, L. Stempniewski. Influence of reservoir and foundation on the nonlinear dynamic response of concrete gravity dams. - ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No. 490, Vol. 44, No. 2, June 2007, pp. 377–38.
11. Subrata M., Damodar Maity. Experimental investigation on nonlinear dynamic response of concrete gravity dam-reservoir system. Eng Struct 2014; 80:289-97.
12. Westergaard H. M. Water pressures on dams during earthquakes //Transactions of the American society of Civil Engineers. – 1933. – T. 98. – №. 2. – C. 418–433.
13. Zienkiewicz O.C., Newton R.E. Coupled vibrations of a structure submerged in a fluid. // International Symposium on Finite Element Techniques, University of Stuttgart, Germany, 1969
14. Abaqus 6.10 User's Documentation Getting Started with Abaqus Interactive Edition. 2012.
15. Abaqus Analysis User's Guide, Volume 5, Version 6.13.