Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого Институт прикладной математики и механики Высшая школа теоретической механики

Работа допущена к защите

Директор высшей школы

А. М. Кривцов

«\_\_\_»\_\_\_\_20\_\_г.

# ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА ВЛИЯНИЕ УЧЕТА СЖИМАЕМОСТИ ЖИДКОСТИ НА НДС СИСТЕМЫ «СООРУЖЕНИЕ – ОСНОВАНИЕ»

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. 3630103/70101

Руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

А.А. Курлевский

Е.Ю. Витохин

Санкт-Петербург 2021

## САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

## Институт прикладной математики и механики Высшая школа теоретической механики

### **УТВЕРЖДАЮ**

Директор

Высшей школы теоретической механики

\_\_\_\_\_A. М. Кривцов

« » 20 г.

#### ЗАДАНИЕ

# на выполнение выпускной квалификационной работы

студенту Курлевскому Алексею Андреевичу, гр. 3630103/70101

1. Тема работы: Влияние учета сжимаемости жидкости на НДС системы «сооружение основание».

2. Срок сдачи студентом законченной работы: 14.06.2021

3. Исходные данные по работе: Научные статьи по теме работы, чертежи геометрических размеров плотины, таблица физических свойств материалов, вид сейсмической нагрузки

4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов):

Формулировка постановки задачи согласно ее математической модели, создание конечноэлементной модели системы «плотина – водохранилище – основание» с учетом гидродинамического воздействия, выполнение динамического расчета под действием сейсмической нагрузки, анализ реализации модели, сравнение численных результатов, посчитанных в разных пакетах программ.

5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей):

Геометрические параметры системы

6. Консультанты по работе: отсутствуют

7. Дата выдачи задания 01.02.2021

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_ Е. Ю. Витохин

Задание принял к исполнению 01.02.2021

Студент \_\_\_\_\_ А. А. Курлевский

#### ΡΕΦΕΡΑΤ

На 33 с., 29 рисунков, 4 таблицы

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СИСТЕМЫ «ПЛОТИНА – ВОДОХРАНИЛИЩЕ – ОСНОВАНИЕ», ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ, КОНЕЧНО – ЭЛЕМЕНТНЫЙ МЕТОД, ANSYS, ABAQUS, БЕСКОНЕЧНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ.

В данной работе проводился численный анализ бетонной гравитационной плотины под действием сейсмической нагрузки. Кроме сейсмической нагрузки учитывалось распространение волн в водохранилище. Жидкость моделировалась акустическими элементами, а твердотельная часть элементами, соответствующим плоско – напряженному состоянию. Изучено влияние сжимаемости жидкости на НДС системы «сооружение – основание». Так же были реализованы неотражающие граничные условия такие как: отток волны на бесконечность; вязкая граница в основании системы. Расчеты проводились в пакетах ANSYS и Abaqus.

### ABSTRACT

33 pages, 29 figures, 4 tables

# DAM-RESERVOIR-FOUNDATION INTERACTION, HYDRODINAMIC IMPACT, FINITE ELEMENT METHOD, ANSYS, ABAQUS, INFNINTE ELEMENT.

This study is dedicated to a numerical analysis of a concrete gravity platform under seismic load. Besides the seismic load, the hydrodynamic drag on the system was also taken into account. The fluid was modelled by acoustic elements while the solid part was modelled by the elements corresponding to the plane stress state. In particular, the influence of fluid compressibility on the stress strain state system was studied. Additionally, the necessary boundary conditions (infinite zone at the outer boundary of the reservoir; viscous boundary at the base of the system) were also implemented. The calculations were performed in ANSYS and Abaqus.

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ
ГЛАВА 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ
2.1 Характеристики плотины9
2.2 Характеристики системы «плотина – водохранилище – основание» 10 2.3 Описание сейсмической нагрузки
ГЛАВА 3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОЛЕЛЬ 12
ГЛАВА 4. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ
4.1 Создание модели в ANSYS 14
4.2 Создание модели в Abaqus16
4.3 Модальный анализ 18
4.4 Расчет коэффициентов демпфирования 22
4.5 Конечно-разностный расчет
4.5 Задание граничных условий 24
ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ
5.1 Тестовый расчет для проверки реализации акустических элементов 25
5.2 Динамический расчет системы без гидродинамического воздействия с жестко закрепленным основанием
5.3. Динамический расчет системы с учетом гидродинамического воздействия при закрепленном на границе основании
5.4 Динамический расчет системы с учетом гидродинамического воздействия
и вязкой границы в основании32
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

#### введение

Гидротехнические сооружения оказывают достаточное сильное влияние на жизнь. С их помощью решается ряд важных задач: защита от наводнений и разрушений берегов, орошение почв, создание водохранилища, добыча электроэнергии и прочие необходимости. Разрушение данных объектов может нанести колоссальный материальный и экономический ущерб.

Известно немало трагедий возникших из-за разрушения гидротехнических объектов. Вывести их из строя могут такие явления как оползни, разрушение фундамента, землетрясение. Чтобы обеспечить надежной защитой для стабильной работы объектов, расположенных в сейсмоопасных районах, необходимо проводить анализ на устойчивость модели к землетрясениям. Развитие применения метода конечных элементов привело к значительному прогрессу в этом направлении. С его помощью можно задать сейсмическую нагрузку и оценить поведение материала и место возникновения трещин в плотине. Однако, несмотря на достигнутые успехи в моделировании бетонных гравитационных плотин, ряд важных вопросов еще предстоит полностью понять и по-прежнему требует особого внимания. Один из них — это моделирование взаимодействия элементов системы «плотина-основание-водохранилище» с учетом сжимаемости жидкости. Этот вопрос и рассматривается в данной работе.

Целью данной работы является изучение влияния сжимаемости жидкости на напряженно-деформированное состояние системы «сооружение – основание». Моделирование проводится в пакетах ANSYS и Abaqus.

5

#### ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

С ростом числа построенных гидротехнических сооружений возникла необходимость моделирования взаимодействия жидкости с твердотельной частью системы. Существует два метода учета влияния жидкости. Первый из них – метод присоединенных масс. Этот способ описал Вестергард в своей статье [12]. Идея его заключается в добавлении массы к каждому элементу, контактирующему с жидкостью, и ее пересчету на каждой итерации. В таком случае, согласно [2] вектор гидродинамических сил записывается в форме:

$$R_W = -M_W(\ddot{u} + W_0)$$

Где *М*<sub>w</sub> – матрица присоединенных масс [1].

Преимущества метода присоединенных масс заключаются в его быстроте, малом количестве вычислительной мощности, простоте реализации. Наряду с этими достоинствами, данный метод имеет значительные недостатки: его применение весьма ограничено и в общем случае зависит от формы колебаний системы. Результаты, опубликованные в [11], показывают, что значения напряжений, полученные данным методом, больше на 15% от полученных теоретических, а в [7] на 13%. Важным фактором в этом методе является то, что он не учитывает сжимаемость жидкости. Это и приводит к большим неточностям при вычислении.

Второй подход учета взаимодействия жидкости и конструкции предполагает, что жидкость сжимаемая. В этом случае решается волновое уравнение относительно гидродинамического давления *p*:

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

С помощью МКЭ можно получить систему уравнений относительно вектора давления и соотношение для вектора гидродинамических сил [13,15]:

Для численного расчета полученных уравнений жидкость моделируют акустическими элементами, обладающими только одной степенью свободы – давление.

В [10,11] показано, что при моделировании данным образом взаимодействия жидкости и конструкции погрешность вычислений напряжений от теоретических равна 6%. Пиковые значения давлений меньше, чем при использовании метода присоединенных масс, а его распределение более равномерное.

При моделировании жидкости в водохранилище необходимо учесть, что удаленная граница расположена бесконечно далеко от плотины. Данный эффект можно получить при с помощью условия Зоммерфельда или условия Шэрана. В [9] приведено сравнение с теоретическим значением максимального давления на плотине при учете неотражающей границы и заданием нулевого давления на дальней границе. Если длина водохранилища равна высоте плотине, то погрешность при учете неотражающей границы составит 5.62%, а без учета 19,12%. Но при увеличении длины резервуара ошибка снизится до 0.002% с неотражающей границей, а без нее до 0.133%

Немало важным фактором является моделирование полубесконечной области на границе основания. Этот метод обеспечит не только замкнутость системы, но и повысит точность результатов. Если реализовать самое простое граничное условие в виде жесткого закрепления основания, то, конечно, система станет замкнутой, но волны будут полностью отражаться от границы. Это приведет к значительному искажению результатов. За последнее время для обеспечения неотражения волн было предложено несколько способов, таких как граница с бесконечными элементами, двойная удаленная граница, асимптотическая граница, передающая граница и др. На примере [6,8] вязкую границу можно задать напрямую с помощью нормальных и касательных демпферов. Коэффициент демпфирования нужно вычислять с учетом типа демпфера. В [14] сравниваются результаты для фиксированной, вязкой, вязко –

7

упругой и бесконечной границы. Авторы статьи подтвердили мнение о фиксированной границе, а также утверждают, что использование вязкой границы довольно ограничено. Демпфера не способы гасить высокочастотные колебания. Поэтому данный тип условия может давать точные результаты только при низкочастотных нагрузках. Кроме того, авторы утверждают, что вязкоупругая и бесконечная границы могут уменьшить отражение волны и приблизить результат для удаленного граничного условия.

# ГЛАВА 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

# 2.1 Характеристики плотины

В данной работе рассматривается плотина высотой 85 м и шириной 63.5 м. Напорный уровень расположен на высоте 208 м, а сама система расположена на высоте 140.14 м. Сооружение сделано из двух бетонов марок B30 и B20. Геометрические характеристики сооружения показаны на рисунке 1. В основании взят скалистый материал с соответствующими характеристиками. Численные параметры системы указаны в таблице 1



Рисунок 1. Геометрические характеристики.

	Характеристика	Значение
Вода	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1000
	Модуль объемного сжатия, МПа	2070
	Скорость распространения звука, м/с	1482.1
Бетон В30	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2430
	Модуль Юнга, МПа	32500
	Коэффициент Пуассона	0.2
Бетон В20	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2405
	Модуль Юнга, МПа	27500
	Коэффициент Пуассона	0,2
Основание (скала)	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2643
	Модуль Юнга, МПа	27580
	Коэффициент Пуассона	0.33

Таблица 1. Физические параметры системы.

# 2.2 Характеристики системы «плотина – водохранилище – основание».

Ширина основания равна 900 м, высота 300 м. Высота водохранилища составляет 67.86 м, длина 530 м. Схема системы изображена на рисунке 2.



Рисунок 2. Геометрические характеристики системы.

# 2.3 Описание сейсмической нагрузки.

Для анализа сейсмоустойчивости сооружения прикладывается массовая сила к элементам плотины в горизонтальном направлении. Нагрузка задается в виде синуса с частотой 5 Гц.



Рисунок 3. Нагрузка в горизонтальном направлении, действующая на элементы плотины.

#### ГЛАВА З. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В данной работе рассматривается система «сооружение-основание» с учетом взаимодействия с водной средой под действием динамической сейсмической нагрузки. Задача рассматривается в плоско-деформированном состоянии. Математическая модель взята из [2].

С помощью метода конечных элементов можно получить уравнение для «твердотельной» части в перемещениях:

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

Где

$$W_0 = I_x \ddot{X_0} + I_y \ddot{Y_0} + I_z \ddot{Z_0}$$

Здесь M, B, K - матрицы масс, демпфирования и жесткости системы; u – вектор узловых перемещений;  $\ddot{X}_0, \ddot{Y}_0, \ddot{Z}_0$  компоненты вектора переносного ускорения  $w_0$  в направлениях глобальных осей координат;  $I_x, I_y, I_z$  – векторы направляющих косинусов;  $W_0$  – вектор узловых ускорений, соответствующий вектору ускорений  $w_0$ ;  $R_w$  – вектор гидродинамических сил, действующих в расположенных на границе с областью жидкости узлах.

Для того, чтобы учитывать затухание во всей системе, необходимо воспользоваться демпфированием по Рэлею. Суть данного метода заключается в представлении матрицы демпфирования в виде линейной комбинации матрицы масс и жесткости:

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

Где *α*, *β* – коэффициенты пропорциональности матриц масс и жесткости соответственно.

Учет распространения волн в водохранилище основан на использовании волнового уравнения в терминах гидродинамического давления *p*.

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

Тогда граничные условия можно записать в следующем виде:

$$rac{\partial p}{\partial n} = -
ho_w ar{n} \cdot (w + w_0)$$
 на  $\Gamma_1$   
 $rac{\partial p}{\partial n} = -
ho_w ar{n} \cdot (w + w_0) - q rac{\partial p}{\partial t}$  на  $\Gamma_2$   
 $p = 0$  на  $\Gamma_3$ 

Где Г<sub>1</sub> – напорная грань плотины, Г<sub>2</sub> – дно водохранилища, Г<sub>3</sub> – свободная граница.

На удаленной границе  $\Gamma_4$  необходимо реализовать условие неотражения волн для обеспечения оттока волны на бесконечность. Так в ANSYS реализовано условие Зоммерфельда, а в Abaqus условие Шэрана, соответствующее двойной асимптотической границе:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{1}{V_w} \frac{\partial p}{\partial t}$$
 – условие Зоммерфельда $\frac{\partial p}{\partial n} = -\frac{\pi}{2h} p - \frac{1}{V_w} \frac{\partial p}{\partial t}$  – условие Шэрана

Во всех граничных условиях  $V_w$  – скорость распространения волн сжатия в жидкости,  $\rho_w$  – плотность жидкости, h - глубина, p – давление,  $\bar{n}$  – единичный вектор, направленный по внешней нормали к области жидкости, w – вектор ускорения, t – время. Коэффициент q, определяющий поглощение энергии дном водоема, определяется при обработке результатов.

Применяя метод конечных элементов к волновому уравнению, можно записать систему уравнений относительно давления и получить соотношение для члена, учитывающего гидродинамическое воздействие:

$$G\ddot{P} + D\dot{P} + HP = -\rho_w L^T (\ddot{u} + W_0), R_w = LP$$

## ГЛАВА 4. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ

#### 4.1 Создание модели в ANSYS.

В плотине и основании используются элементы типа PLANE182. Порядок элементов линейный.

Для моделирования жидкости и границы раздела для взаимодействия жидкости с конструкцией используются акустические элементы. В основном данные элементы применяют для исследования распространения звуковых волн или динамики подводной части. Согласно [5] в ANSYS для плоской задачи предусмотрен элемент FLUID29. Это 4-х узловой элемент с тремя степенями свободы: вертикальное И горизонтальное перемещение давление. И свободы Трансляционные степени реализуются только на узлах, контактирующих с твердым телом. Используя систему в [4], для акустических элементов можно вычислить давление:

$$[M_F]\{\vec{p_e}\} + [C_F]\{\vec{p_e}\} + [K_F]\{p_e\} = \{f_F\}$$

Где  $[M_F], [C_F], [K_F]$  матрицы масс, демпфирования и жесткости соответственно,  $f_F$  – внешний «силовой» вектор в жидкости.

Для взаимодействия акустической среды с элементами конструкции решается следующая система:

$$\begin{bmatrix} [M_S] & 0\\ \overline{\rho_0}R^T & [M_F] \end{bmatrix} \begin{cases} \{\ddot{u_e}\}\\ \{\ddot{p_e}\} \end{cases} + \begin{bmatrix} [C_S] & 0\\ 0 & [C_F] \end{bmatrix} \begin{cases} \{\dot{u_e}\}\\ \{\dot{p_e}\} \end{cases} + \begin{bmatrix} [K_S] & -[R]\\ 0 & [K_F] \end{bmatrix} \begin{cases} \{u_e\}\\ \{p_e\} \end{cases} = \begin{cases} f_S\\ f_F \end{cases}$$

Где  $[M_S], [C_S], [K_S]$  матрицы масс, демпфирования и жесткости соответственно для твердотельной части,  $f_S$  – вектор внешних сил, действующих на конструкцию. [R] – связывающая матрица, в которой представлены условия связи на границе раздела акустической средой и элементами конструкции.

Для создания полубесконечной области на границе основания моделируется вязкая граница, состоящая из нормальных и касательных демпферов. Параметры демпфирования вычисляются по следующим формулам:

$$d_n = \rho v_p l_{node}$$
$$d_t = \rho v_x l_{node}$$

Где  $d_n$  – коэффициент демпфирования в нормальном направлении,  $d_t$  – коэффициент демпфирования в касательном направлении,  $\rho$  – плотность материала,  $l_{node}$  – длина, приходящаяся на узел,  $v_p$  – скорость продольных волн,  $v_s$  – скорость поперечных волн.

Значения  $v_s$  и  $v_p$  вычисляются по формулам:

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

Где *G* – модуль сдвига, *v* – коэффициент Пуассона.

В ANSYS продольные демпфера реализованы в элементе типа COMBIN14, в котором и указываются параметры демпфирования.



Рисунок 4. Конечно-элементная модель в ANSYS.

	Плотина	Основание	Водохранилище	Всего
Количество	2696	11987	9044	23727
элементов				
Количество	2843	12238	9246	24327
узлов				
Тип	PLANE182	PLANE182,	FLUID29,	
элементов		COMBIN14	FLUID129	

Таблица 2. Характеристики модели в ANSYS.

#### 4.2 Создание модели в Abaqus.

Плотина и основание моделируются 4-х узловыми элементами СРЕ4, и 3х узловыми СРЕ3, соответствующие плоско–деформированному состоянию.

В Abaqus для моделирования водохранилища используются аналогичные акустические элементы (тип элемента AC2D4). Для учета бесконечно удаленной границы на внешней границе водохранилища используется элемента ACIN2D2.

В соответствии с [3], уравнение равновесия в Abaqus для акустических элементов записывается в следующем виде:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \gamma \dot{u}^f + \rho_f \ddot{u}^f = 0$$

Где p – гидродинамическое давление в жидкости, x – координата положения частицы в пространстве,  $\dot{u}^{f}$  – скорость жидкости,  $\ddot{u}^{f}$  – ускорение жидкости,  $\rho_{f}$  – плотность жидкости,  $\gamma$  – объемное сопротивление.

Основное соотношение для акустической среды выглядит следующим образом:

$$p = -K_f \varepsilon_V$$

Где  $K_f$  — модуль объемного сжатия,  $\varepsilon_V = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$  — объемная деформация.

Для учета полубесконечной области на границе основания в Abaqus предусмотрены бесконечные элементы типа CINPE4. С их помощью моделируется вязкая граница.



Рисунок 5. Конечно - элементная модель в Abaqus.

	Плотина	Основание	Водохранилище	Всего
Количество	2834	11906	9112	23852
элементов				
Количество	2950	12182	9315	24447
узлов				
Тип	CPE4,CPE3	CPE4, CPE3	AC2D4,	
элементов		CINPE4	ACIN2D4	

Таблица 3. Характеристики системы в Abaqus.

Характерные точки для анализов результатов приведены на рисунке 6.



Рисунок 6. Рассматриваемы точки системы.

## 4.3 Модальный анализ

Для определения эквивалентности модели, построенной в ANSYS и Abaqus, и коэффициентов демпфирования по Рэлею проводится модальный анализ. Уравнение движения плотины записывается в виде:

$$M\ddot{u} + Ku = 0$$

Решение данного дифференциального уравнения ищется в виде:

$$u = \phi \cos\left(\omega t\right)$$

Где  $\phi$  – собственный вектор,  $\omega$  – собственная частота.

Подставив данное решение в уравнение, получим:

$$(-\omega^2 M + K)\phi = 0$$

Полученное уравнение имеет нетривиальное решение тогда и только тогда, когда определитель данной системы не равен нулю. Отсюда находим собственные формы и частоты конструкции. Состояния системы для первых пяти собственных частот приведены на рисунках 8–12.



Рисунок 7. Недеформированное состояние системы.



Рисунок 8. Собственная форма системы, соответствующая первой собственной частоте.



Рисунок 9. Собственная форма системы, соответствующая второй собственной частоте.



Рисунок 10. Собственная форма системы, соответствующая третьей собственной частоте.



Рисунок 11. Собственная форма системы, соответствующая четвертой собственной частоте.



Рисунок 12. Собственная форма системы, соответствующая пятой собственной частоте.

Численные значения для первых пяти собственных частот представлены в таблице 4.

ANSYS	Abaqus
-------	--------

1 - ая частота, Гц	3,4529	3,4468
2 - ая частота, Гц	7,6184	7,6145
3 - я частота, Гц	8,3516	8,3440
4 - ая частота, Гц	15,5340	15,5170
5 - ая частота, Гц	22,8920	22,8830

Таблица 4. Значения первых пяти собственных частот.

# 4.4 Расчет коэффициентов демпфирования.

Как было указано ранее, в исследуемой системе реализуется демпфирование по Рэлею. Это означает, что матрица демпфирования представляется в виде:

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

Коэффициент пропорциональности Рэлея вычисляются по формулам:

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

Где *ξ* – коэффициент демпфирование, *ω* – наименьшая собственная частота, полученная при модальном расчете.



Рисунок 13. Зависимость коэффициентов демпфирования от собственной частоты.

Таким образом, при декременте затухания 5% можно посчитать коэффициенты пропорциональности:

$$\alpha = 2\xi\omega = 2 \cdot 0,05 \cdot 3,4468 \cdot 2 \cdot \pi = 2,1657$$
$$\beta = \frac{2\xi}{\omega} = \frac{2 \cdot 0,05}{3,4468 \cdot 2 \cdot \pi} = 0,0046$$

#### 4.5 Конечно-разностный расчет

Для проверки качества реализации акустических элементов решается волновое уравнение методом конечных разностей. Введем равномерную сетку для продольной координаты и времени:

$$x = ih, i \in [1; N^*]$$
$$t = k\Delta t, k \in [1, K]$$

Где h - шаг по координате,  $\Delta t$  – шаг по времени, i и k – номер узла по координате и времени соответственно.

Расчет давления осуществляется по следующей формуле:

$$p_i^{k+1} = \frac{\Delta t^2 c^2}{h^2} \left( p_{i+1}^k - 2p_i^k + p_{i-1}^k \right) + 2p_i^k - p_i^{k-1}$$

Где *р* – давление, *с* – скорость звука в среде.

Для сходимости метода шаг по времени берется, используя условие Куранта:

$$\Delta t = K^* \frac{h}{c}$$

Где  $K^* = 0.1 -$ число Куранта.

Расчет методом конечных разностей производится в математическом пакете MATLAB.

#### 4.5 Задание граничных условий.

Граничные условия для данной модели задаются согласно поставленной задаче:

1. На свободной поверхности задается нулевое давление

2. На Контактных поверхностях «сооружение-основание», «основание-водохранилище», «сооружение-водохранилище» реализуется контакт типа Tie в Abaqus, и контакт типа Bonded в ANSYS. Кроме того, в ANSYS на поверхностях, контактирующих с водной средой, ставится условие Fluid-Structure Interaction.

3. Неотражающая акустическая граница реализована элементами FLUID129 и ACIN2D4.

### ГЛАВА 5. РЕЗУЛЬТАТЫ

# 5.1 Тестовый расчет для проверки реализации акустических элементов

Рассмотрим прямоугольную область длиной 1 м и шириной 0.001 м. К левой границе данной области приложим импульсное единичное давление. Скорость звука примем равным 1 м/с. Шаг сетки равен  $h = 10^{-2}$  м, шаг интегрирования  $\Delta t = 10^{-3}$  с.Получим следующие результаты:







Рисунок 15. Эпюра давления в момент времени t=0.2 с.



Рисунок 16. Эпюра давления в момент времени t=0.3 с.

Из рисунков 14–16 можно сделать вывод, что результаты конечноразностного расчета и Abaqus довольно хорошо совпадают. В среднем, результаты в Abaqus отличаются от результатов в MATLAB на 5%. Видно, что с течением времени амплитуда колебаний постепенно затухает. Исходя из сказанного, можно сказать, что решение соответствует физическому смыслу распространению волны.

Уменьшим шаг по сетке на порядок, а шаг по времени оставим прежним. Получим следующие результаты:



Рисунок 17. Эпюра давления в момент времени t=0.2 с.

На рисунке 17 показано, что при данных условиях распространение давления в ANSYS отличается от Abaqus на 8%. В конечно-разностном расчете при таких условиях решение расходится.

5.2 Динамический расчет системы без гидродинамического воздействия с жестко закрепленным основанием.

Проведем численный расчет для упрощенной модели системы. Данный пример не предусматривает моделирование акустических элементов, а граница основания жестко закреплена.



Рисунок 18. Горизонтальные перемещения в точке плотины при отсутствии гидродинамических сил и с жестко закрепленным основанием.





На рисунках 18–19 видно, что результаты для твердотельной части системы получились одинаковыми. Можно сделать вывод о том, что расчетные сетки, построенные в пакетах Abaqus и ANSYS, получились идентичными. Так же полученные зависимости говорят об одинаковом задании свойств системы.

5.3. Динамический расчет системы с учетом гидродинамического воздействия при закрепленном на границе основании.

В данном примере моделируется жидкость при помощи акустических элементов и их взаимодействие с элементами конструкции. Учет влияния жидкости реализован как на напорную грань плотины, так и на дно водохранилища. Основание остается зафиксированным. На внешней границе водохранилища реализуется условие неотражения волн.

29



Рисунок 20. Горизонтальные перемещения в точке основания с фиксированной границей в основании.



Рисунок 21. Горизонтальные перемещения в точке плотины с фиксированным основанием.



Рисунок 22. Зависимость давления от времени в правой области водохранилища с фиксированным основанием.



Рисунок 23. Зависимость давления в левой области водохранилища с фиксированным основанием.

На рисунках 20–23 видно, что при закрепленном основании результаты качественно похожи, но количественно сильно отличаются. Зависимости давления в правой части водохранилища совпадают до целого значения. В левой же части давление практически одинаковое до момента времени t = 3.5 с. Далее происходит сдвиг по фазе, и в ANSYS значения становятся больше на 715 Па чем в Abaqus. Для данного распределения такая разница уже существенна. Кроме того, можно заметить, что амплитуда колебаний находится на постоянном уровне, что говорит о правильной реализации бесконечно удаленной границы. Из-за разного распределения давления в водохранилище в твердотельной части системы возникают различные перемещения

# 5.4 Динамический расчет системы с учетом гидродинамического воздействия и вязкой границы в основании.

В данном расчете моделируется не только акустическая среда, но и учитывается вязкая граница в основании системы. Как уже говорилось ранее, для создания бесконечной границы в ANSYS используются касательные и нормальные демпфера, а в Abaqus бесконечные элементы.

Убедимся, что при моделировании вязкой границы разными способами, результат получается одинаковый. Рассмотрим модель без акустических элементов с вязкой границей в основании.

32



Рисунок 24. Горизонтальные перемещения в точке основания с вязкой границей.



Рисунок 25. Горизонтальные перемещения в точке плотины с вязкой границей в основании.

Из графиков, изображенных на рисунках 24–25 видно, что при разном способе моделирования вязкой границы, горизонтальные перемещения системы совпадают.

Рассмотрим модель с акустическими элементами и вязкой границей в основании.



Рисунок 26. Горизонтальные перемещения в точке плотины с вязкой границей.



Рисунок 27. Горизонтальные перемещения в точке основания с вязкой границей.



Рисунок 28. Зависимость давления от времени в правой области водохранилища с вязкой границей.



Рисунок 29. Зависимость давления от времени в левой области водохранилища с вязкой границей.

Результаты изображенные на рисунках 26–29 показывают, что вязкая граница не оказывает существенно влияние на перемещение плотины, но значения перемещений в точке основания изменились на порядок. Их значения в ANSYS существенно больше, чем значения в Abaqus. Из-за того, что уменьшились перемещения в основании, уменьшились и значения давлений, но колебания стали совпадать по фазе.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проделанной работы было исследовано влияние учета сжимаемости жидкости на НДС системы «сооружениеоснование». Для получения результатов были решены следующие задачи:

- 1. Создана К-Э модель системы «плотина основание водохранилище».
- 2. Учтены неотражающие граничные условия на границе основания и на удаленной границе жидкости.
- 3. Найдены собственные формы и частоты системы.
- 4. Проведен конечно-разностный расчет для исследования акустической среды.
- 5. Определено НДС системы «сооружение-основание» под действием сейсмической нагрузки.
- 6. Выполнено сравнение численных результатов, полученных в пакетах ANSYS и Abaqus. На крупной сетке разница значений давления в Abaqus от конечно-разностного расчета составила 5%. При уменьшении шага сетки эпюры в ANSYS отличаются от Abaqus на 8%. Значения перемещений в отсутствии гидродинамического воздействия и с закрепленным на границе основанием получились одинаковые. Также результаты совпали при разном моделировании вязкой границы. При учете распространения волн в водохранилище совпадения не получилось как с вязкой, так и с закрепленной границей.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Скворцова А. Е., Судакова В. Н., Цейтлин Б. В. Расчет сейсмических колебаний конструкций, взаимодействующих с жидкостью //Научнотехнические проблемы прогнозирования надёжности и долговечности конструкций и методы их решения: Труды 4-й Международной конференции. СПб.: Нестор. – 2001. – С. 274.

2. Цейтлин Б. В. и др. Теоретические исследования колебаний бетонных гидротехнических сооружений при действии сейсмических нагрузок //Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. БЕ Веденеева. – 2014. – Т. 271. – С. 120-137.

3. Abaqus 6.10 User's Documentation Getting Started with Abaqus Interactive Edition. 2012.

4. ANSYS Acoustic Analysis Guide. Release 2020 R1. January 2020

ANSYS Mechanical APDL Element Reference. Release 14.0. November
 2011.

 Burman A., Maity D., Sreedeep S. Iterative analysis of concrete gravity dam – nonlinear foundation interaction. International Journal of Engineering, Science and Technology. Vol. 2, No. 4, 2010, pp. 85-99

7. Muto M. et al. Effective modelling of dam-reservoir interaction effects using acoustic finite elements //Proceedings of Innovative Dam and Levee Design and Construction for Sustainable Water Management, 32nd Annual USSD Conference, New Orleans, Louisiana. – 2012. – C. 1161-1168.

 Nielsen A. H. Absorbing boundary conditions for seismic analysis in ABAQUS //ABAQUS users' conference. – 2006. – C. 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. Rodríguez J. et al. Fluid-structure interaction in civil engineering structures //SIMULIA Commun Conf. – 2012.

38

11. Scheulen F., Von Gersdorff N., Duron Z., Knarr M. Numerical volume validation for large concrete gravity dams. Collaborative Management of Integrated Watersheds. P. 233-238

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. Wilson E. L., Khalvati M. Finite elements for the dynamic analysis of fluid-solid systems //International Journal for Numerical Methods in Engineering.
– 1983. – T. 19. – №. 11. – C. 1657-1668.

14. Ye D. et al. Semi-infinite Domain Artificial Boundary Conditions in Dynamic Analysis //2015 International Power, Electronics and Materials Engineering Conference. – Atlantis Press, 2015.

15. 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