

УДК 531.3.534.17

**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКЦИИ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ НА
СЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЕГО
ПАРАМЕТРОВ В СРЕДЕ «MATLAB»**

Шеин Александр Иванович,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г. Пенза,*

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика».

Зайцев Михаил Борисович,

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства,
г. Пенза,*

кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика».

Аннотация

Исследуется отклик высотного здания при варьировании направления, частоты и продолжительности сейсмического воздействия. Анализируются перемещения характерных точек КЭ модели здания с учетом моделирования демпфирования за счет внутреннего трения. Исследовалась математическая модель каркасно-ствольного высотного здания при нестационарном (сейсмическом) воздействии с использованием программного комплекса, основанного на методе конечных элементов (МКЭ). Динамический отклик конструкции определялся численным решением системы дифференциальных уравнений движения с помощью шагового метода Ньюмарка, реализованного авторами в среде «MatLab» в виде программного комплекса. Разработано программное средство для анализа отклика высотного здания при изменении параметров сейсмического воздействия с учетом демпфирования за счет внутреннего трения. Получены перемещения характерных точек КЭ модели здания при различных значениях параметров сейсмического воздействия.

Проанализировано влияние демпфирования за счет внутреннего трения на перемещения характерных узлов модели в резонансной зоне.

Ключевые слова: высотное здание, конечный элемент, собственная частота, матрица демпфирования, параметры сейсмического воздействия.

INVESTIGATION OF THE REACTION OF A HIGH-RISE BUILDING TO SEISMIC EFFECTS WHEN ITS PARAMETERS CHANGE IN THE MATLAB ENVIRONMENT

Shein Alexander Ivanovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Doctor of Sciences, Professor, Head of the department “Mechanics”.

Zaytsev Mihail Borisovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department “Mechanics”.

Abstract

The response of a high-rise building is investigated when the direction, frequency, and duration of seismic action vary. The movements of the characteristic points of the CE model of the building are analyzed, taking into account the modeling of damping due to internal friction. A mathematical model of a frame-and-trunk high-rise building under non-stationary (seismic) impact was studied using a software package based on the finite element method (FEM). The dynamic response of the structure was determined by numerically solving a system of differential equations of motion using the Newmark step method, implemented by the authors in the MatLab environment as a software package. A software tool has been developed to analyze the response of a high-rise building when changing the parameters of a seismic impact, taking into account damping due to internal friction. The displacements of the characteristic points of the CE model of the building at different values of the seismic impact parameters are

obtained. The effect of taking into account damping in the resonant zone on the movements of the characteristic nodes of the model is analyzed.

Keywords: high-rise building, finite element, natural frequency, damping matrix, parameters of seismic impact.

Введение

Расчет и проектирование высотных зданий, возводимых в сейсмически активных районах, связаны с высокой степенью неопределенности основных расчетных характеристик сейсмического воздействия. Начальный момент землетрясения, его направление, амплитуда, спектральный состав, продолжительность являются в общем случае случайными параметрами.

Анализ уязвимости проектируемых зданий и сооружений исключительно важен для оценки последствий землетрясения, а также для разработки научно обоснованных методов защиты зданий и сооружений от обрушения, таких как демпфирование, или гашение колебаний [1-3].

С помощью существующих алгоритмов МКЭ, можно провести расчет механических систем любой сложности, учитывая различные особенности поведения конструкций и материалов для совершенствования разрабатываемых математических моделей и расширения класса решаемых задач. В частности, в современных задачах сейсмического расчета часто возникает проблема учета собственного демпфирования [4]. Важное значение имеет учет внутреннего сопротивления движению здания или сооружения имеет при расчете систем гашения колебаний, в особенности в резонансной зоне.

Создание корректных динамических моделей является актуальной задачей, решение которой представляется важным фактором расчетного обоснования того или иного конструктивного решения.

Предмет, задачи и методы

Исследовался отклик высотного здания на сейсмическое воздействие при варьировании параметров этого воздействия, таких как направление, частота и продолжительность сейсмической нагрузки.

Здание прямоугольное в плане (рис.1, а-б) с размерами – 30х18 м и высотой 150 м (50 этажей).

Конструктивная схема здания – каркасно-ствольная, с железобетонным ядром (стволом) жесткости, сечением 6х6 м и толщиной стенки 250 мм. Стенки ядра армированы сетками из стержневой стали Ø12 А400. Шаг стержней сетки – 200 мм.

Колонны каркаса сечением 700х700 мм в нижней половине здания и 500х500 мм в верхней, армированы рабочей стержневой арматурой Ø32 А400. Шаг стержней – 100 мм.

Монолитные железобетонные плиты перекрытий (покрытия) толщиной 200 мм армированы сетками из стержневой стали Ø10 А400. Шаг стержней сетки – 200 мм.

В вертикальных несущих железобетонных конструкциях (колонны и ядро жесткости) принят тяжелый бетон класса В35, в перекрытиях – тяжелый бетон класса В30.

Схемы армирования конструкций здания представлены на рис.1, в.

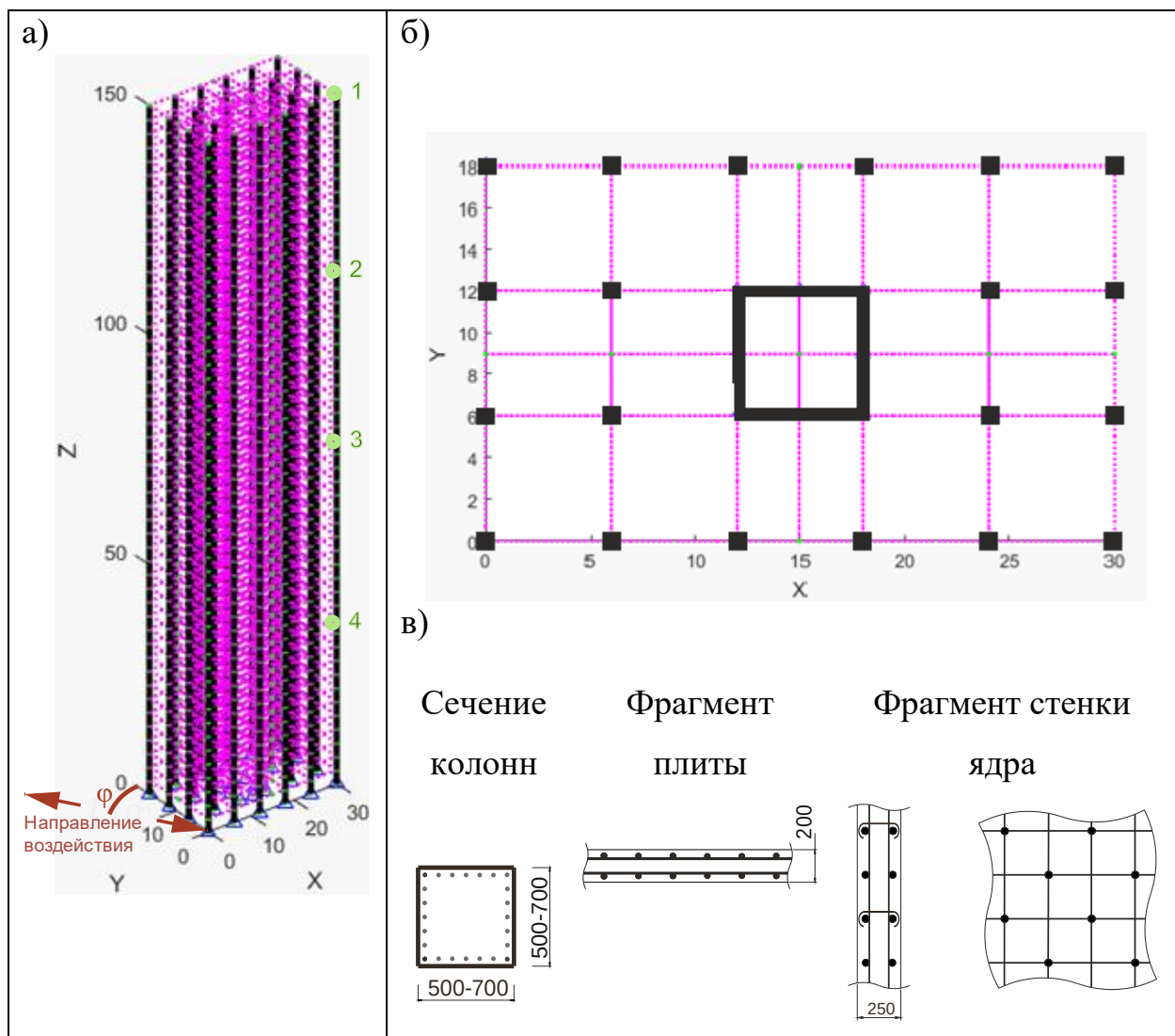


Рисунок 1 – Конечно-элементная модель высотного здания

а) конечно-элементная модель, б) схема расстановки колонн и ядра, в) схемы армирования конструкций

Сейсмическое воздействие моделировалось акселерограммой

землетрясения, представленной на рис. 2.

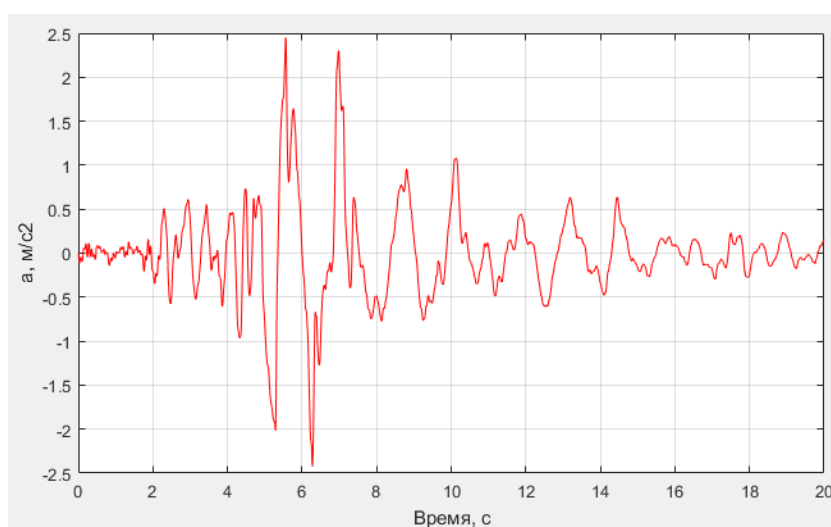


Рисунок 2 – Акселерограмма землетрясения

Максимальное ускорение – 2.451 м/сек² достигается в момент времени $t = 5.56$ сек. Максимальная скорость – 0.427 м/сек достигается в момент времени $t = 5.35$ сек. Максимальное перемещение – 0.116 м достигается в момент времени $t = 12.48$ сек. Средняя частота $P_a = 5.604$ рад/с, средний период $T = 1.121$ с.

Для выполнения исследования авторами разработан программный комплекс «Fluctuations» в среде «MatLab», реализующий интегрирование системы дифференциальных уравнений движения пластинчато-стержневой системы в форме МКЭ:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = P, \quad (1)$$

где M – диагональная матрица масс, C – матрица демпфирования, K – матрица жесткости конечно-элементной модели пластинчато-стержневой системы, P – вектор сейсмического воздействия.

Стержневой пространственный КЭ, используемый для расчёта произвольной пространственной пластинчато-стержневой системы, имеет три линейных и три угловых перемещения в узле. Прямоугольный КЭ тонкой пластины имеет одно линейное (перпендикулярное плоскости КЭ) и два угловых (повороты вокруг локальных осей КЭ из его плоскости) перемещения в узле.

Матрица демпфирования C определялась равенством

$$C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K, \quad (2)$$

где коэффициенты демпфирования α и β , для вычисления которых необходимо найти первые две частоты собственных колебаний исследуемого здания [5]. Частоты были приняты по результатам частотно - векторного анализа, выполненного при помощи модуля «Frequencies» вышеуказанного программного средства, реализующего решение системы однородных алгебраических уравнений свободных колебаний пластинчато-стержневой системы [6-7]:

$$|M^{-1}K - \omega^2 E| = 0, \quad (3)$$

где ω – частота собственных колебаний.

Сейсмическое воздействие моделировалось приведением кинематического воздействия к силовому, а ориентация вектора сейсмического воздействия

принималась в плоскости OXY в зависимости от угла φ к горизонтальной оси OY глобальной системы координат. Конечно-элементная модель рассматриваемого высотного здания представлена на рис.1, а.

В работе исследовалось, как влияет изменение некоторых параметров сейсмического воздействия на перемещения характерных узлов конечно-элементной модели высотного здания.

Результаты исследований и обсуждение

1. Частотно-векторный анализ.

При помощи разработанного программного средства были получены частоты и формы колебаний здания, характерные перемещения которого на низших частотах представлены на рис. 3.

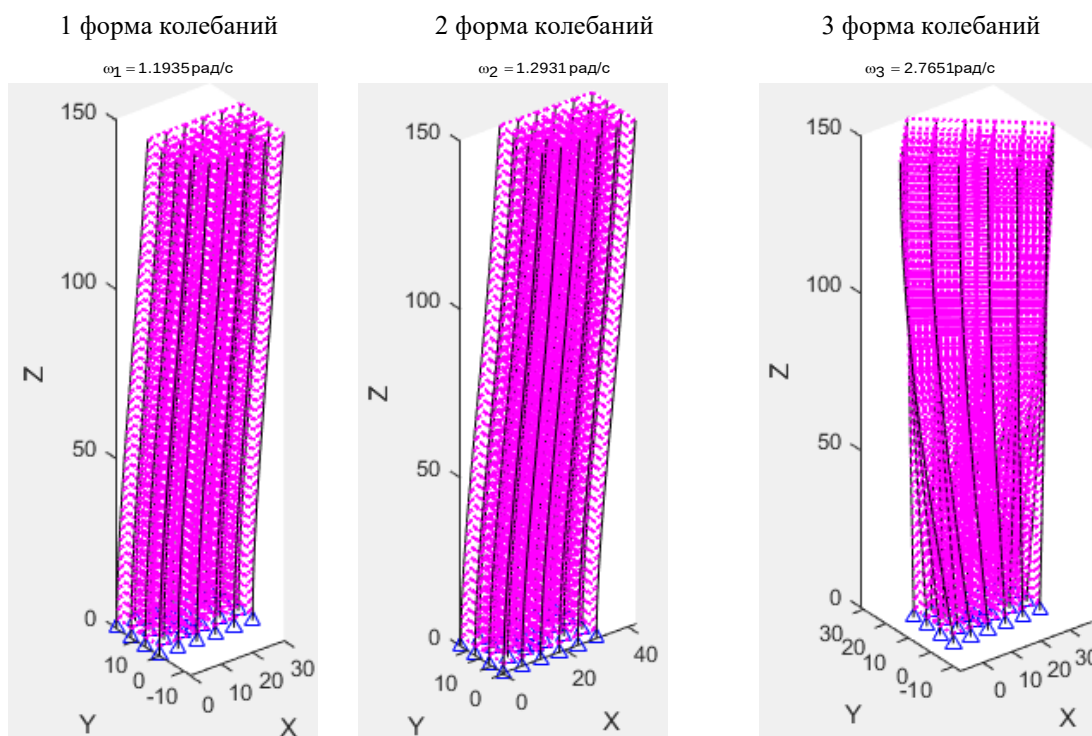
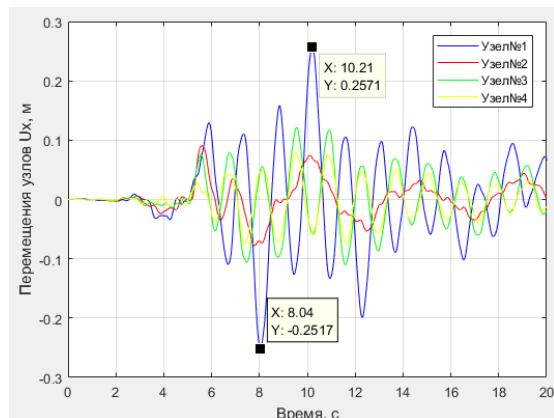


Рисунок 3 – Формы колебаний здания

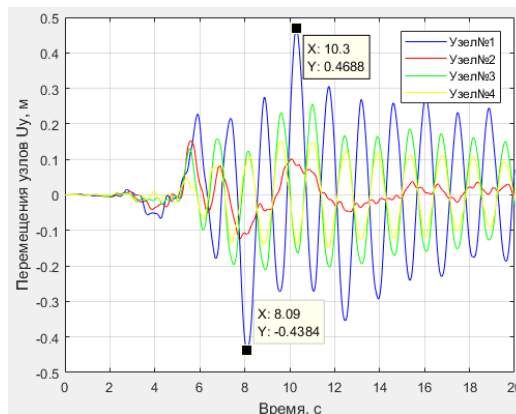
2. Перемещения характерных узлов модели здания при различных направлениях воздействия.

На рис.4-7 представлены результаты определения перемещений характерных узлов конечно-элементной модели здания при помощи разработанного программного средства, в зависимости от угла направления сейсмического воздействия φ (см. рис.1, а).

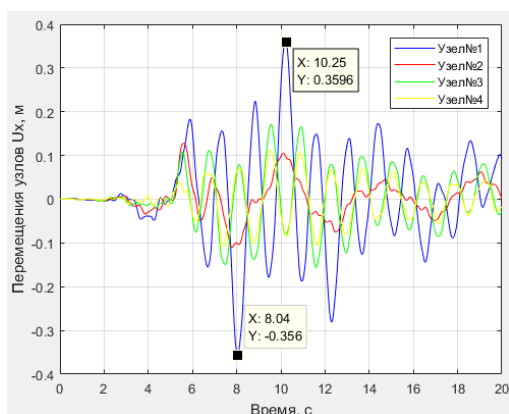
а)



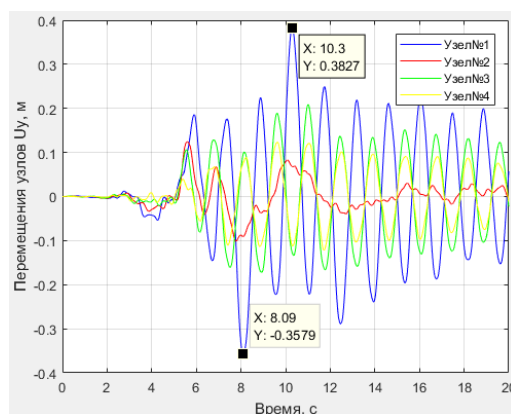
б)

Рисунок 4 – Перемещения характерных узлов ($\varphi = 30^\circ$)а) вдоль оси OX , б) вдоль оси OY

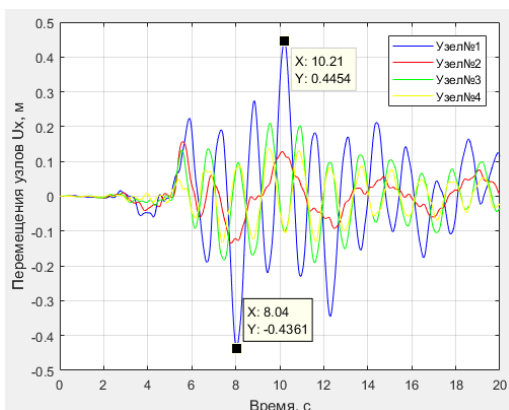
а)



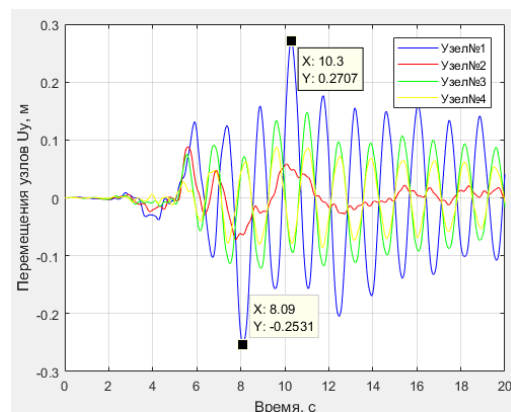
б)

Рисунок 5 – Перемещения характерных узлов ($\varphi = 45^\circ$)а) вдоль оси OX , б) вдоль оси OY

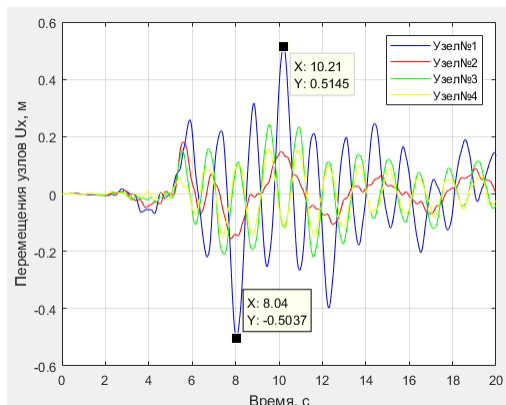
а)



б)

Рисунок 6 – Перемещения характерных узлов ($\varphi = 60^\circ$)а) вдоль оси OX , б) вдоль оси OY

а)



б)

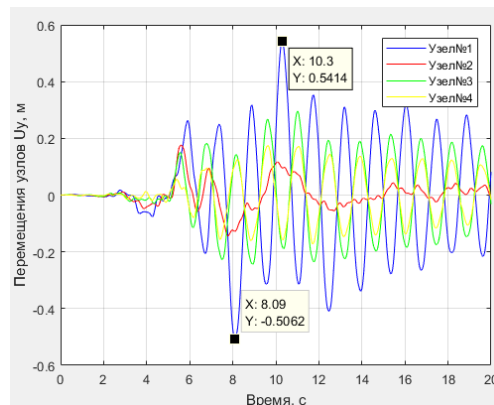


Рисунок 7 – Перемещения характерных узлов

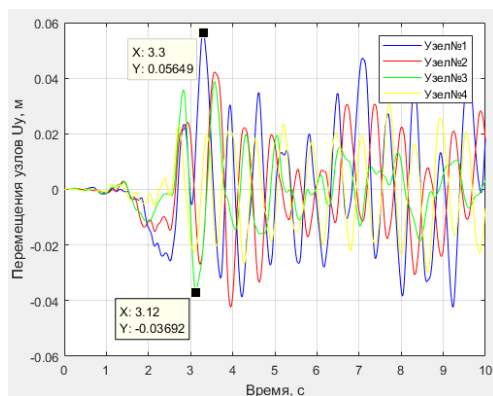
а) вдоль оси OX при $\varphi = 90^\circ$, б) вдоль оси OY при $\varphi = 0^\circ$

Результаты расчета показывают существенные изменения перемещений вдоль соответствующих осей с увеличением (уменьшением) угла φ , однако крутильных колебаний не наблюдается. При этом колебания конструкции происходят по высшим формам, со средней частотой 4 - 4.5 рад/с.

3. *Перемещения характерных узлов модели здания при изменении частоты и длительности сейсмического воздействия.*

На рис.8. представлены результаты определения перемещений характерных узлов конечно-элементной модели здания при увеличении (уменьшении) частоты и длительности сейсмического воздействия. При этом акселерограмма рассматриваемого воздействия (рис.2) была модифицирована таким образом, что величины расчетных ускорений остались неизменными, а длительность воздействия, соответственно и частота, увеличивалась, либо уменьшалась. Направление воздействия было принято вдоль оси OY ($\varphi = 0^\circ$).

а)



б)

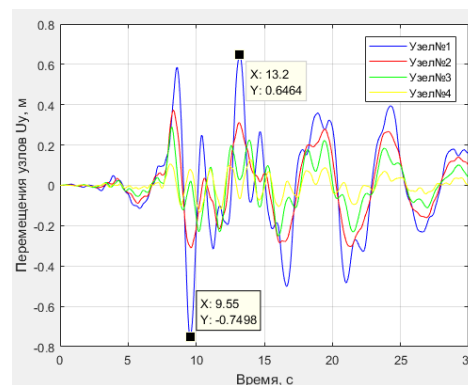
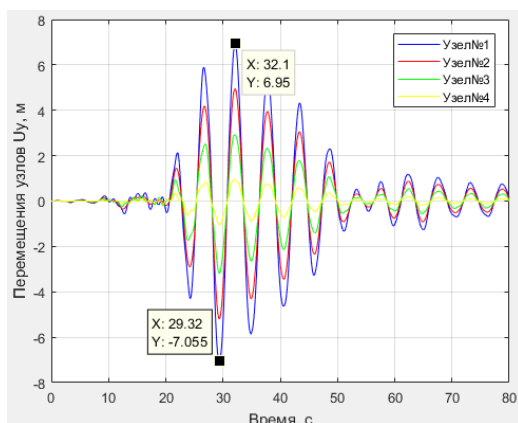


Рисунок 8 – Перемещения характерных узлов при изменении частот

а) при увеличении частоты на 50%, б) при уменьшении частоты на 50%

На рис.9. представлены результаты определения перемещений характерных узлов конечно-элементной модели здания при уменьшении частоты сейсмического воздействия до значения, близкого к резонансной зоне $P = P_a/4 = 1.4$ рад/с. В данном случае частота основного тона колебаний здания $\omega_1 = 1.1935$ рад/с.

а)



б)

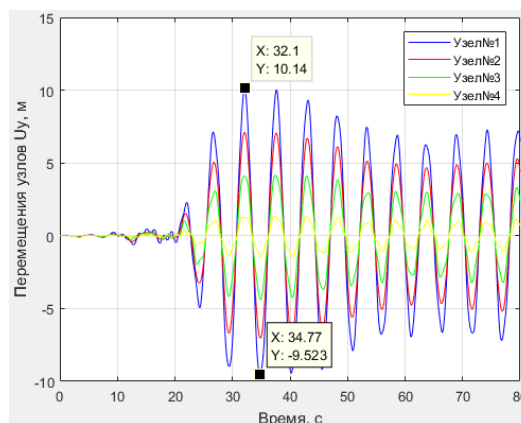


Рисунок 9 – Перемещения характерных узлов при резонансе
а) с учетом затухания, б) без учета затухания

Результаты расчета показывают, что при изменении частоты внешнего воздействия в дорезонансной зоне существенного изменения максимальных перемещений не происходит. В резонансной зоне значения максимальных перемещений, полученных с учетом демпфирования, отличаются от этих же значений, вычисленных без учета затухания примерно на 70%.

Выводы

Проведено численное исследование отклика высотного здания при изменении параметров сейсмического воздействия при помощи разработанного в среде «MATLAB» программного средства. Получены перемещения характерных точек КЭ модели здания при различных значениях параметров сейсмического воздействия. Показано значительное влияние учета демпфирования на напряженно-деформированное состояние конструкции. В частности, для данной задачи значения максимальных перемещений в резонансной зоне, полученные с

учетом демпфирования, на 70% меньше этих же значений, вычисленных без учета затухания.

При разработке дополнительных (внешних) систем демпфирования зданий целесообразно учитывать силы внутреннего сопротивления движению.

Библиографический список:

1. Шеин, А. И. Математическое моделирование работы реактивного гасителя колебаний башни градирни / А. И. Шеин, М. Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2023. – № 17. – С. 1-10. – EDN WVLDNQ.
2. Шеин, А. И. Три новых способа гашения колебаний зданий и сооружений / А. И. Шеин, А. В. Чуманов, М. Б. Зайцев // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 3(60). – С. 81-89. – DOI 10.54734/20722958_2024_3_81. – EDN PFZZEO.
3. Damping seismic vibrations in high-rise buildings using controlled reactive dampers / A. Shein, M. Zaitsev, A. Tamrazyan, T. Matseevich // Architecture and Engineering. – 2025. – Vol. 10, No. 3. – P. 86-95. – DOI 10.23968/2500-0055-2025-10-3-86-95. – EDN SPIQNO.
4. Воробьева, К. В. Учет демпфирования в задачах оценки сейсмостойкости зданий и сооружений / К. В. Воробьева, Х. Р. Зайнулабидова, М. В. Фрезе // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2016. – Т. 40, № 1. – С. 108-118. – EDN VZSANH.
5. Сидоров, В. Н. Модификация функции диссипации Рэлея для численного моделирования внутреннего демпфирования в стержневых конструкциях / В. Н. Сидоров, Е. С. Бадьина, Д. О. Климушкин // Вестник МГСУ. – 2024. – Т. 19, № 6. – С. 960-970. – DOI 10.22227/1997-0935.2024.6.960-970. – EDN MYGSCN.
6. Шеин, А. И. Анализ спектральных характеристик высотного здания в среде «MATLAB» / А. И. Шеин, М. Б. Зайцев // Моделирование и механика конструкций. – 2024. – № 19. – С. 9-21. – EDN RTTPHO.

7. Шеин, А. И. Частотно-векторный анализ серии однотипных зданий разной этажности / А. И. Шеин, М. Б. Зайцев // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 3(60). – С. 74-80. – DOI 10.54734/20722958_2024_3_74. – EDN OSGABC.