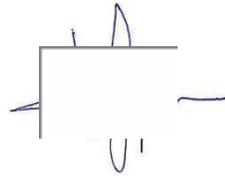


На правах рукописи



БОНДАРЕВ Дмитрий Евгеньевич

**МЕТОД РАСЧЁТА СЕЙСМОИЗОЛИРОВАННЫХ ЗДАНИЙ
НА РОТАЦИОННЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ, ВЫЗВАННЫЕ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ**

Специальность 05.23.17 – Строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Рутман Юрий Лазаревич

Официальные оппоненты: **Уздин Александр Моисеевич**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
ВО «Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I»,
кафедра «Механика и прочность материалов
и конструкций», профессор;

Долгая Анжелика Александровна, кандидат
технических наук, АО «Трансмост», сектор раз-
работки программных средств, инженер-проект-
ировщик I категории, г. Санкт-Петербург;

Ведущая организация: **АО «Научно-исследовательский центр «Строительство».**

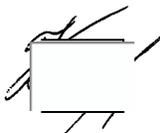
Защита диссертации состоится «23» декабря 2019 г. в 13³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.03 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: dissovetsgasu@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/bondarev-dmitriy-evgenevich>

Автореферат разослан 14 ноября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



Лидия Никитовна Кондратьева

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одними из самых опасных воздействий на здания и сооружения являются сейсмические. Даже при наличии современных методов расчёта и развитых теорий сейсмостойкости, землетрясения по сей день вызывают масштабные разрушения как объектов гражданского и административного назначения, так и объектов повышенной ответственности. Результаты обследований зданий и сооружений свидетельствуют о наличии пространственного характера работы сооружения при землетрясениях – это трещины в торцах здания, разрушенные угловые колонны с оголённой рабочей арматурой, неравномерные разрушения протяжённых зданий, искривления рельсовых путей как в вертикальной, так и горизонтальной плоскостях и многие другие. Также после землетрясений было засвидетельствовано большое количество случаев, когда разрушения как симметричных, так и несимметричных зданий возникло из-за кручения относительно вертикальной оси.

При обследовании зданий и сооружений после землетрясений наблюдаются многочисленные факты, свидетельствующие о пространственной работе сооружений. Пространственная работа вызывается множеством причин, но суммарно их можно свести в следующие две группы:

1. Причины пространственной работы зданий и сооружений, определённые несимметричностью распределения масс и жёсткостей, неоднородностью структуры конструкций и т.п.;
2. Причины пространственного характера сейсмического воздействия. Данный характер воздействия определяется волновой природой землетрясений.

Перечисленные группы эффектов приводят к пространственной работе зданий и сооружений, а именно к их вращениям относительно трёх взаимно перпендикулярных осей, возникающих в дополнение к линейным смещениям.

Данная работа посвящена учёту крутильных колебаний зданий и сооружений, расположенных на различных системах сейсмоизоляции, вызванных сейсмическими ротациями грунта, а также неравномерным распределением жёсткости и массы сооружения в плане, которое вызывает их пространственную работу.

Степень разработанности темы исследования.

Наиболее ранние упоминания об актуальности этих явлений содержатся в работе А. Г. Назарова 1959 года, в которой отмечается: «...выделенная элементарная площадка Земли имеет шесть степеней свободы, характеризуемых тремя поступательными и тремя вращательными перемещениями относительно трёх взаимно перпендикулярных осей. Стало быть, в принципе, при землетрясении элементарная площадка может совершать поступательные и вращательные колебания относительно трёх взаимно перпендикулярных осей». Но первые именно численные результаты оценки ротационных полей

представил Н.М. Ньюмарк в рамках IV всемирной конференции по сейсмостойкому строительству, где показал значительное влияние сейсмического момента на симметричные здания. Таким образом, исследования ротационных полей и пространственной работы конструкций начались с начала 60-х годов. Наибольшие достижения в этой области принадлежат американским, канадским и японским специалистам: N.M. Newmark, V.W. Lee, J.E. Lucio, W.K. Tso, T.I. Hsu, M.D. Trifunac, N.D. Nathan, J.R. MacKenzie, H.T. Shibata, A.M. Chandler, A.K. Chopra, C.L. Kan, A. Tena-Colunga, D. Basu, P. Kumar и многие другие.

В СССР и России оценка ротационных свойств сейсмического движения грунта рассматривалась в работах Э.Е. Хачияна, В.Т. Рассказовского, В.А. Томачёва, С.Х. Негматуллаева, Д.А. Харина, А.Г. Назарова, Н.А. Николаенко, Ю.П. Назарова, Е.В. Позняк и других.

Целью диссертационной работы является разработка метода расчёта зданий и сооружений, расположенных на различных системах сейсмоизоляции, на воздействия, вызывающие их ротации.

Задачи исследования:

1. Разработка математической модели, описывающей динамику сооружения, расположенного на маятниковой системе сейсмоизоляции, учитывающей кручение;

2. Разработка математической модели, описывающей динамику сооружения, расположенного на резинометаллических опорах, учитывающей кручение;

3. Определение критериев, увеличивающих динамическую реакцию сейсмоизолированного сооружения при кручении;

4. Разработка метода, позволяющего провести прочностной расчёт сейсмоизолированного сооружения на ротационное воздействие;

5. Проведение прочностного расчёта сейсмоизолированного объекта с помощью разработанного метода на воздействие, вызывающего его ротацию.

Объект исследования – здания и сооружения, расположенные на маятниковой системе сейсмоизоляции и на резинометаллических опорах.

Предмет исследования – расчет сейсмостойкости сейсмоизолированных зданий и сооружений на воздействия, вызывающие их ротации.

Научная новизна диссертационной работы

1. Разработаны математические модели, учитывающие кручение зданий и сооружений, расположенных на маятниковых и резинометаллических опорах, и проверена адекватность данных моделей;

2. Выявлен и описан эффект увеличения крутильных колебаний сейсмоизолированных сооружений как при наличии сейсмических ротаций, так и при наличии эксцентриситета между центром жёсткости системы сейсмоизоляции и центром масс сооружения;

3. Выявлен параметр, который влияет на уровень кручения сейсмоизолированного сооружения: v_s – скорость поперечной волны под подошвой фундамента;

4. Предложен метод для проведения прочностного расчёта сейсмоизолированного сооружения с учётом кручения по линейно-спектральной методике.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в том, что разработаны математические модели, учитывающие кручение зданий и сооружений, расположенных на различных системах сейсмоизоляции. Данные модели учитывают кручение, вызванное неравномерным расположением опор в плане, а также волновым характером землетрясения.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в возможности использования ротационного спектра, который можно получить из разработанных математических моделей, учитывающих кручение сейсмоизолированной системы, для проведения практических расчётов изолированных систем по линейно-спектральной методике на ротационные воздействия. Выявлена важность типа грунта, влияющего на скорость прохождения поперечной волны под подошвой фундамента, которая является определяющим фактором возникновения сейсмических ротаций.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработана математическая модель для сооружения, расположенного на маятниковой системе сейсмоизоляции, учитывающая кручение. Модель реализована в ПК Matlab;

2. Разработана математическая модель для сооружения, расположенного на резинометаллических опорах, учитывающая кручение. Модель реализована в ПК MathCad;

3. Выявлен и описан эффект увеличения линейных ускорений периферийных точек изолируемой части сооружений, возникающий из-за несовпадения центра жёсткости системы сейсмоизоляции с центром масс сооружения для зданий, опирающихся на резинометаллические опоры;

4. Выявлен и описан эффект увеличения линейных ускорений периферийных точек изолируемой части сооружения, возникающий из-за наличия ротационной компоненты сейсмического воздействия;

5. Для практических расчётов сейсмоизолированных сооружений на воздействие сейсмических ротаций предложен метод учёта крутильных форм сейсмоизолированных сооружений по линейно-спектральной методике с помощью ротационного спектра, который можно получить из разработанных математических моделей, учитывающих кручение.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК: 05.23.17 – Строительная механика, пункт 7 «Теория и методы расчёта сооружений в экстремальных ситуациях (землетрясения, ураганы, взрывы и так далее)».

Методология и методы исследования. В работе использовались современные вычислительные программные комплексы для проверки адекватности разработанных моделей, теория сейсмостойкости, уравнения строительной механики и теоретической механики. Для решения системы дифференциальных уравнений использовались численные методы (Рунге-Кутта 4-го порядка).

Достоверность результатов работы

Достоверность результатов исследований диссертационной работы подтверждается использованием общепринятых математических моделей сооружений и воздействий в области сейсмостойкого строительства, а также хорошей согласованностью полученных результатов с результатами других исследователей, а также сходимостью результатов с сертифицированными конечно-элементными комплексами.

Апробация работы

Основные теоретические положения и численные результаты диссертационной работы подтверждены апробацией на следующих конференциях и семинарах:

- XXVII Международная конференция «Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций» - МКМ 2017. Основы статического и динамического разрушения. Дом ученых, г. Санкт-Петербург, 2017;
- 74-я научная конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета, СПбГАСУ, 2018;
- XIII Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (13РНКСС), г. Санкт-Петербург, 2019.

Публикации

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 4 научных работах, в том числе 3 в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК и 1 статье в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы

Диссертация изложена на 202 страницах печатного текста, состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 173 источника. В работе представлено 124 рисунка, 6 таблиц и 120 формул.

Первая глава посвящена литературному обзору и сбору информации об актуальности темы исследования.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей, учитывающих кручение сейсмоизолированных объектов. Рассмотрены особенности работы резинометаллических опор и систем маятниковой сейсмозащиты зданий и их конструктивные воплощения. Произведён динамический анализ пространственной работы несимметричных сооружений при нали-

чий эксцентриситета между центром масс здания и центром жёсткостей системы сейсмоизоляции.

Третья глава посвящена анализу пространственной работы симметричных сооружений при учёте в динамическом анализе ротационных компонент сейсмического воздействия.

Четвёртая глава посвящена оценке прочности симметричного сооружения при расчёте на сейсмостойкость с учётом ротационных компонент сейсмического воздействия.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Разработана математическая модель для сооружения, расположенного на маятниковой системе сейсмоизоляции, учитывающая кручение. Модель реализована в ПК Matlab.

В инженерной практике, как правило, решаются плоские задачи для анализа динамики сейсмоизолированного сооружения. То есть учитываются только поступательные колебания. Но сооружение может испытывать также и крутильные колебания, причинами которых может служить ротационная компонента сейсмического воздействия или несовпадение центра жёсткости и центра масс сооружения. У объектов, изолированных маятниковыми опорами, за счёт асинхронного движения маятниковых тяг и их различной продольной деформации, возникает вращение, угловые наклоны и вертикальное перемещение сейсмоизолированного сооружения. Поэтому возникает необходимость разработки математической модели, учитывающей кручение (Рисунок 1).

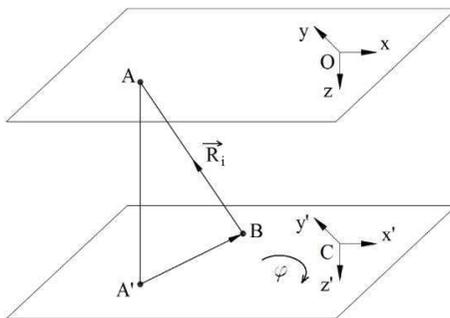


Рисунок 1. Принципиальная схема, описывающая движение маятниковой тяги

Математическая модель системы на рисунке 1 состоит из нескольких групп уравнений.

1-я группа уравнений описывает динамику защищаемого объекта (ЗО) под действием вышеуказанных сил и внешних кинематических воздействий. Для маятниковой системы сейсмоизоляции (ССИ) при отсутствии ротационных возмущений и абсолютно жестких тросах указанные уравнения перманентно переходят в известные уравнения колебаний физического маятника.

2-я группа уравнений описывает связь между обобщенными координатами ЗО и перемещениями точек крепления маятниковых тяг к ЗО.

3-я группа уравнений описывает связь между усилиями в тросах и перемещениями точек крепления.

Рассмотрим движение центра масс ЗО как движение точки C относительно подвижной системы координат XYZ . В соответствии с формулами относительного движения имеем:

$$\vec{\xi}_a = \vec{\xi}_r + \vec{\xi}_e + \vec{\xi}_c \quad (1)$$

где $\vec{\xi}_a$ – абсолютное ускорение точки C ; $\vec{\xi}_r$ – относительное ускорение; $\vec{\xi}_e$ – переносное ускорение; $\vec{\xi}_c$ – ускорение Кориолиса.

а) Относительное ускорение определяется ускорениями относительных координат точки C :

$$\vec{\xi}_r = (\ddot{u}, \ddot{v}, \ddot{w}) \quad (2)$$

б) Переносное ускорение определяется формулой

$$\vec{\xi}_e = \vec{\xi}_o + \vec{\varepsilon} \times \vec{r}_{oc} + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}_{oc}) \quad (3)$$

где $\vec{\varepsilon}$ – вектор, описывающий угловое ускорение ротационного движения грунта; $\vec{\omega}$ – вектор, описывающий угловую скорость ротационного движения грунта; $\vec{\xi}_o = (a_x, a_y, a_z)$ – вектор, описывающий линейные ускорения подвижной системы координат (грунта). Компоненты этого вектора задаются акселерограммами.

в) Ускорение Кориолиса определяется формулой

$$\vec{\xi}_c = 2\vec{\omega} \times \vec{V}_r \quad (4)$$

где $\vec{V}_r = (\dot{u}, \dot{v}, \dot{w})$ – относительная скорость точки C .

Вектор абсолютного углового ускорения ЗО:

$$\vec{\varphi}_a = \vec{\varphi} + \vec{\omega} \quad (5)$$

где $\vec{\varphi}$ – вектор ускорений относительных углов поворота ЗО относительно осей X, Y, Z .

В формуле (5) углы считаются малыми. При этом предположении уравнения движения ЗО имеют вид:

$$m\vec{\xi}_a = \vec{R} + \vec{P} + \psi_1(\vec{V}) \quad (6)$$

$$m\vec{\phi}_a = \vec{M}_{Rl} + \vec{M}_p + \psi_2(\vec{\phi}) \quad (7)$$

где \vec{R} – вектор, описывающий суммарное усилие от всех тяг \vec{M}_{Rl} ; – вектор суммарного момента от усилий в тросах относительно центра масс C ; \vec{P} , \vec{M}_p – суммарные усилие и момент от пластических демпферов (гистерезисных устройств); $\psi_1(\vec{V})$, $\psi_2(\vec{\phi})$ – суммарные усилия и момент, возникающие вследствие вязкого демпфирования.

В формуле (3) вследствие малости \vec{r}_{oc} двумя последними слагаемыми можно пренебречь. Тогда, после некоторых преобразований получим:

$$\begin{cases} m\ddot{u}_c = R_x + 2m\dot{v}\omega - P_x - \psi_{1x} - ma_x(t) \\ m\ddot{v}_c = R_y - 2m\dot{u}\omega - P_y - \psi_{1y} - ma_y(t) \\ m\ddot{w}_c = R_z + mg - P_z - \psi_{1z} - ma_z(t) \\ I_z\ddot{\phi}_z = M_{cz} - M_{pz} - \psi_{2z} - I_z\dot{\omega}_z(t) \\ I_x\ddot{\phi}_x = M_{cx} - M_{px} - \psi_{2x} - I_x\dot{\omega}_x(t) \\ I_y\ddot{\phi}_y = M_{cy} - M_{py} - \psi_{2y} - I_y\dot{\omega}_y(t) \end{cases} \quad (8)$$

$$R_x = \sum_{i=1}^n R_{ix}; R_y = \sum_{i=1}^n R_{iy}; R_z = \sum_{i=1}^n R_{iz} \quad (9)$$

$$\vec{M}_C = \sum_{i=1}^n \vec{M}_{iC} = \{M_{Cx}, M_{Cy}, M_{Cz}\} \quad (10)$$

$$\vec{M}_{iC} = \vec{r}_{BC} \times \vec{R}_i \quad (11)$$

где \vec{r}_{BC} – радиус-вектор, соединяющий точки C и B .

Начальные условия:

$$u_c(0) = 0; v_c(0) = 0; w_c(0) = 0; \quad (12)$$

$$u_c(0) = 0; v_c(0) = 0; w_c = \frac{mg}{nk}$$

$$\phi_x(0) = 0; \phi_y(0) = 0; \phi_z(0) = 0; \quad (13)$$

$$\varphi_x(0) = 0; \varphi_y(0) = 0; \varphi_z(0) = 0;$$

где n – количество маятниковых опор ЗО.

Данная модель имеет следующие допущения:

1. В силу большой жёсткости на кручение относительно горизонтальных осей соответствующими углами поворота можно пренебречь;
2. Пренебрегаем вертикальной компонентой реакции пластического демпфера;
3. Ускорениями Кориолиса в силу малости величин угловых скоростей земной коры при землетрясении можно пренебречь;
4. При нагружении опоры одновременно по двум направлениям, на силовой диаграмме точка усилия должна двигаться по эллипсу (из-за наличия в опоре пластических демпферов) и описывать поверхность текучести. Дан-

ным эффектом можно пренебречь, т. к. можно использовать поправочный коэффициент для учёта взаимодействия компонент пластических реакций.

Принимая данные допущения в модели, система дифференциальных уравнений, описывающая поведение изолированного сооружения маятниковыми опорами, будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} + 2\xi\omega\dot{x} + \frac{P_x(x,\dot{x})}{m} - \frac{R_x}{m} = -\ddot{x}_0(t) \\ \ddot{y} + 2\xi\omega\dot{y} + \frac{P_y(y,\dot{y})}{m} - \frac{R_y}{m} = -\ddot{y}_0(t) \\ \ddot{z} + 2\xi\omega\dot{z} - g - R_z/m = -\ddot{z}_0(t) \\ \ddot{\varphi} + 2\xi\omega_\varphi\dot{\varphi} + \frac{M}{I_z} = -\ddot{\varphi}_0(t) \end{cases} \quad (14)$$

Начальные условия:

$$\dot{x}(0) = 0; \dot{y}(0) = 0; \dot{z}(0) = 0; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} x(0) = 0; y(0) = 0; z = \frac{mg}{nk} \\ \dot{\varphi}_z(0) = 0; \varphi_z(0) = 0; \end{aligned} \quad (16)$$

Таким образом, мы получили модель, которая позволяет провести динамический анализ здания, расположенного на произвольном количестве маятниковых опор с произвольными координатами в плане и учесть кручение. Данная математическая модель, учитывающая, наряду с восстанавливающей силой маятниковой тяги, восстанавливающие силы от гистерезисных устройств, работающих по билинейной силовой диаграмме, реализована в программе, созданной в ПК Matlab.

2. Разработана математическая модель для сооружения, расположенного на резинометаллических опорах, учитывающая кручение. Модель реализована в ПК MathCad.

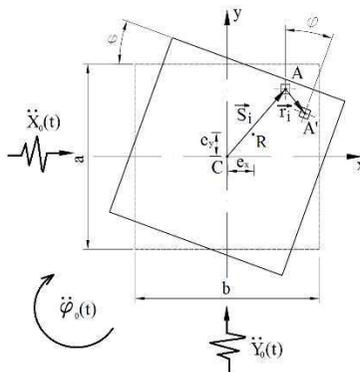


Рисунок 2. Математическая модель для массы, расположенной на резинометаллических опорах, работающих по билинейной силовой диаграмме

С целью совершенствования модели с одной степенью свободы для учёта кручения изолированной массы была разработана математическая модель, описывающая поведение изолированной части здания, расположенной на n резинометаллических опорах с заданными координатами (Рисунок 2). Следует отметить, что модель, учитывающую кручение здания на резинометаллических опорах (РМО) легко получить из модели, учитывающей кручение здания, расположенного на маятниковых опорах. Отличием будет то, что в данном типе сейсмоизоляции будет присутствовать только сила сопротивления гистерезисных устройств. Вертикальную степень свободы можно не принимать во внимание, так как данные опоры перемещаются по вертикали только за счёт упругих деформаций, которыми можно пренебречь, в отличие от маятниковых опор, перемещения которых по вертикали являются кинематическими.

Таким образом, данная модель имеет три степени свободы: перемещение по осям X , Y и угол поворота φ . Уравнения движения будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} m\ddot{u}_c = 2m\dot{v}\omega - R_x - \psi_{1x} - ma_x(t) \\ m\ddot{v}_c = -2m\dot{u}\omega - R_y - \psi_{1y} - ma_y(t) \\ I_z\ddot{\varphi}_z = -M_z - M_t - \psi_{2z} - I_z\dot{\omega}_z(t) \end{cases} \quad (17)$$

где R_x и R_y – суммарные усилия в резинометаллических опорах, M_z – суммарный момент от усилий в опорах, $\psi_{1x(y)}$, ψ_{2z} – суммарные усилия и момент, возникающие вследствие вязкого демпфирования, M_t – сумма крутящих моментов каждой опоры.

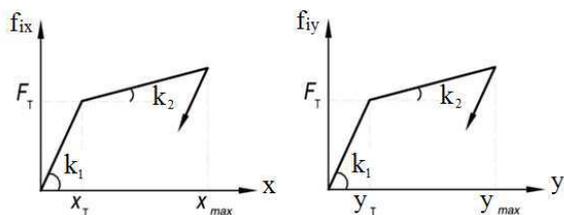


Рисунок 3. Билинейная силовая диаграмма i -ого изолятора по направлению x и y

Сумма реакций во всех n опорах:

$$R_x = \sum_{i=1}^n f_{ix}; \quad R_y = \sum_{i=1}^n f_{iy} \quad (18)$$

Сумма моментов всех усилий в каждом i -ом изоляторе, относительно центра масс C :

$$M = \sum_{i=1}^n M_{iC} \quad (19)$$

I_z – момент инерции изолированной части здания относительно вертикальной оси z ;

$$I_z = \frac{m(a^2+b^2)}{12} \quad (20)$$

где m – масса изолированной части здания; a, b – ширина и длина ЗО.

Сумма жёсткостей всех n опор по направлению x, y и на кручение относительно оси z :

$$K_x = \sum_{i=1}^n k_{1ix}; K_y = \sum_{i=1}^n k_{1iy} \quad (21)$$

$$K_\varphi = \sum_{i=1}^n k_{1ix} \cdot X_i^2 + \sum_{i=1}^n k_{1iy} \cdot Y_i^2 \quad (22)$$

ω_x, ω_y – частоты поступательных колебаний первого тона системы, которые находятся из решения линейно-упругой задачи; X_i, Y_i – координаты опор;

$$\omega_x = \sqrt{\frac{K_x}{m}}; \omega_y = \sqrt{\frac{K_y}{m}} \quad (23)$$

ω_φ – частота крутильных колебаний системы;

$$\omega_\varphi = \sqrt{\frac{K_\varphi}{I_z}} \quad (24)$$

Таким образом, расставляя опоры по произвольным координатам, можно вычислить эксцентриситеты жёсткости сейсмоизоляции относительно осей x и y :

$$e_x = \frac{\sum_{i=1}^n k_{1iy} \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n k_{1iy}} \quad (25)$$

$$e_y = \frac{\sum_{i=1}^n k_{1ix} \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n k_{1ix}} \quad (26)$$

Данная модель имеет следующие допущения:

1. В силу большой жёсткости опор в вертикальном направлении, вертикальной компонентой сейсмического воздействия можно пренебречь;
2. В силу большой жёсткости на кручение относительно горизонтальных осей соответствующими углами поворота также можно пренебречь;
3. Жёсткостью опор на кручение в силу их малости и малого вклада в конечный результат можно пренебречь;
4. Ускорениями Кориолиса в силу малости величин угловых скоростей земной коры при землетрясении можно пренебречь;
5. При нагружении РМО одновременно по двум направлениям, на силовой диаграмме точка усилия должна двигаться по эллипсу и описывать

поверхность текучести. Данным эффектом можно пренебречь, т. к. можно использовать поправочный коэффициент для учёта взаимодействия компонент пластических реакций.

Принимая данные допущения в модели, система дифференциальных уравнений, описывающая динамику изолированного сооружения резинометаллическими опорами с учётом кручения, будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} \ddot{x} + 2\xi\omega_x\dot{x} + R_x(x, \dot{x})/m = -\ddot{x}_0(t) \\ \ddot{y} + 2\xi\omega_y\dot{y} + R_y(y, \dot{y})/m = -\ddot{y}_0(t) \\ \ddot{\phi} + 2\xi\omega_\phi\dot{\phi} + \frac{M}{I_z} = -\ddot{\phi}_0(t) \end{cases} \quad (27)$$

Начальные условия:

$$\dot{x}(0) = 0; \dot{y}(0) = 0; x(0) = 0; y(0) = 0; \dot{\phi}_z(0) = 0; \phi_z(0) = 0;$$

Таким образом, мы получили модель, которая позволяет провести анализ здания, расположенного на произвольном количестве резинометаллических опор с произвольными координатами в плане, вычислить эксцентриситет или задать его самостоятельно в качестве исходных данных. Данная математическая модель реализована в ПК MathCad.

3. Выявлен и описан эффект увеличения линейных ускорений периферийных точек изолируемой части сооружений, возникающий из-за несовпадения центра жёсткости системы сейсмоизоляции с центром масс сооружения для зданий, опирающихся на резинометаллические опоры.

Кручение в зданиях, опирающихся на резинометаллические опоры (РМО), может быть вызвано несовпадением центра жёсткостей (ЦЖ) системы сейсмоизоляции с центром масс (ЦМ) здания, так как при поступательном сейсмическом воздействии будет возникать сейсмический момент, равный произведению сейсмической силы на эксцентриситет, и приводящий к закручиванию. Данным эффектом можно пренебречь для маятниковой системы сейсмоизоляции, так как центр жёсткости маятниковой системы сейсмоизоляции всегда совпадает с центром масс здания. Влияние данного типа кручения для здания, опирающегося на РМО исследовано, варьируя эксцентриситетом от 0 до 20% от длины сооружения, путём смещения всех опор относительно изолированной части здания. Было исследовано три типа здания, которые сортировались по параметру Ω : 1) $\Omega = 0,7$, $n = 56$; 2) $\Omega = 1,0$, $n = 100$; 3) $\Omega = 1,25$, $n = 116$ (Рисунок 4). Данный параметр равен отношению собственной крутильной частоты здания к собственной частоте поступательных колебаний. На рисунках 5–7 отображено, как увеличивается ускорение угловой точки здания при наличии эксцентриситета в двух направлениях: e_x и e_y при решении системы дифференциальных уравнений (27) на различные акселерограммы сейсмического воздействия численным интегрированием методом Рунге-Кутты 4-го порядка в ПК Mathcad. Ротационная компонента воздействия не учитывалась.

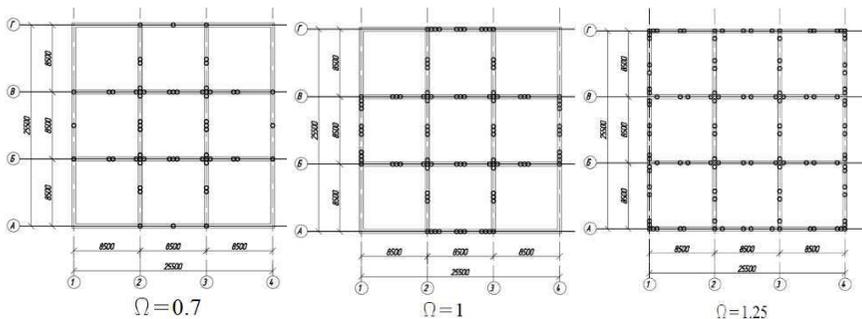


Рисунок 4. Схема расположения опор в плане для трёх типов зданий

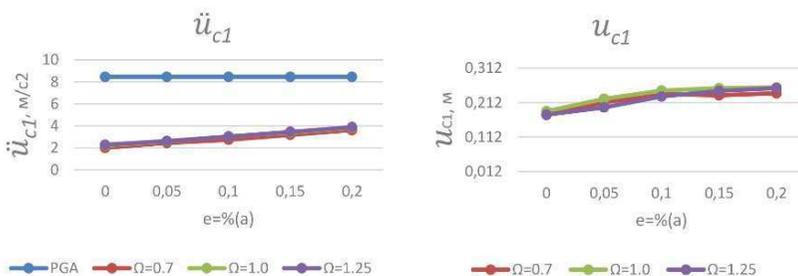


Рисунок 5. Ускорение и перемещение угловой точки здания в зависимости от эксцентриситета для трёх типов здания (Воздействие 1)

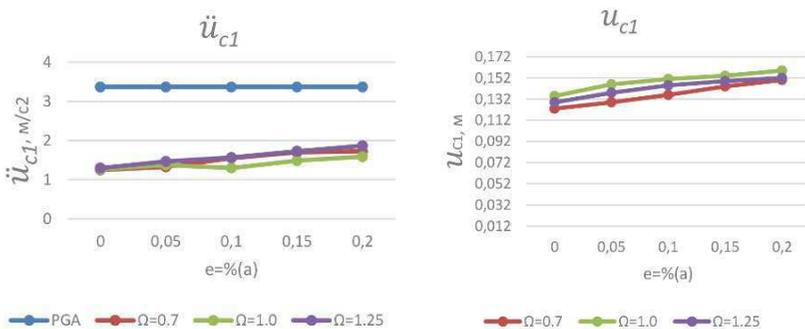


Рисунок 6. Ускорение и перемещение угловой точки здания в зависимости от эксцентриситета для трёх типов здания (Воздействие 2)

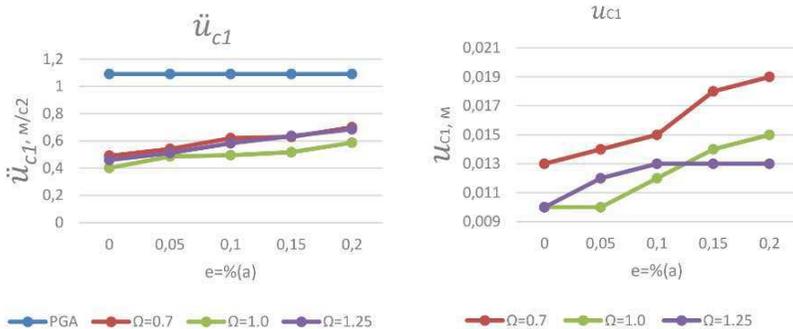


Рисунок 7. Ускорение угловой точки здания в зависимости от эксцентриситета для трёх типов здания (Воздействие 3)

Приведённые результаты наглядно демонстрируют эффект увеличения линейных ускорений и перемещений периферийных точек изолируемого объекта в несимметричных системах. Наблюдаются увеличения ускорений на 80 % по сравнению с ускорениями центра масс изолированной части здания. Также значительно увеличиваются перемещения в изоляторах, которые расположены по углам. Наблюдаются увеличения перемещений до 50 % в сравнении с перемещением ЦМ изолированной части здания. Таким образом, на начальной стадии проектирования системы сейсмозащиты необходимо стремиться к симметричным системам. Располагая резинометаллические опоры произвольно в плане, с помощью формул (25–26) можно определить возможный эксцентриситет. Далее необходимо добиться симметричности системы и стремиться к нулевым значениям эксцентриситетов.

4. Выявлен и описан эффект увеличения линейных ускорений периферийных точек изолируемой части сооружения, возникающий из-за наличия ротационной компоненты сейсмического воздействия.

В сейсмическом воздействии наряду с поступательными компонентами присутствуют также и ротационные. Наличие ротационных компонент обусловлено волновой природой сейсмического воздействия.

Исследовался отклик также трёх типов зданий в зависимости от параметра Ω . Отличием является то, что система является здесь симметричной и сбалансированной, то есть эксцентриситет между ЦМ и ЦЖ равняется нулю, и кручение в данной системе вызвано ротационным движением грунта относительно вертикальной оси. Используются для анализа уравнения, описывающие динамику сейсмоизолированного сооружения, расположенного как на резинометаллических опорах (РМО), так и на маятниковых опорах. Ротационная компонента $\dot{\varphi}_0(t)$ была сгенерирована по следующей формуле (модель Ньюмарка) в предположении упругой деформации грунта:

$$\ddot{\varphi}_z = \frac{1}{2v_s} \left(\frac{d\dot{Y}_0(t)}{dt} - \frac{d\dot{X}_0(t)}{dt} \right) \quad (28)$$

где $\dot{X}_0(t)$, $\dot{Y}_0(t)$ – акселерограммы поступательных компонент сейсмического воздействия, записанных в одной точке регистрации, v_s – скорость поперечной волны под подошвой фундамента.

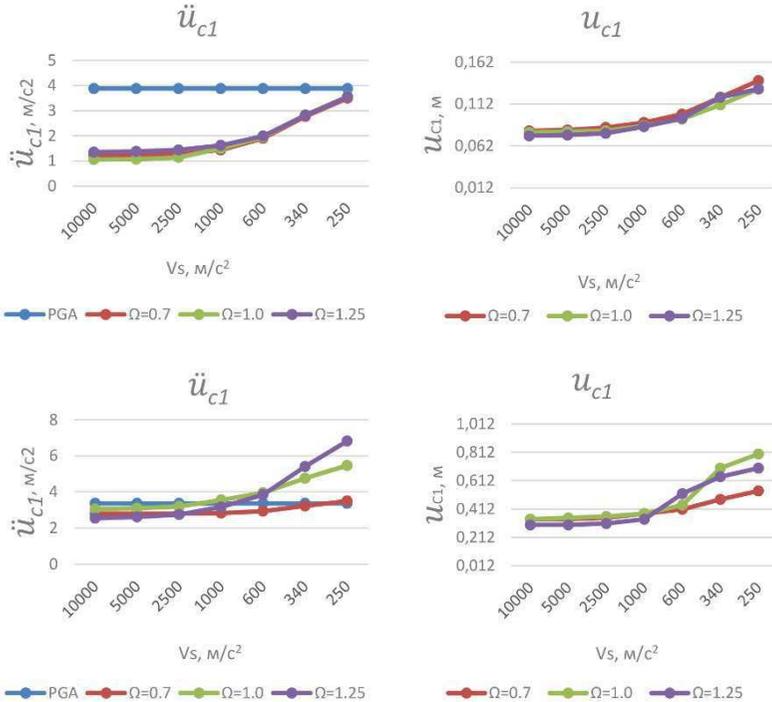


Рисунок 8. Ускорение и перемещение угловой точки здания в зависимости от скорости поперечной волны под подошвой фундамента для трёх типов здания, расположенного на маятниковых опорах (Воздействие 1, 2)

Данная компонента является результатом упругой деформации массива грунта при прохождении сейсмической волны и, следовательно, чем мягче грунт, тем больше будут ротации. Данная компонента зависит от скорости поперечной волны под подошвой фундамента, поэтому при различных скоростях был получен ряд акселерограмм. Так как использовались записи наиболее сильных и разрушительных землетрясений то установить, на каких грунтах была получена та или иная акселерограмма воздействия, не всегда представляется возможным. Поэтому по данным акселерограммам

поступательного воздействия по осям X и Y в зависимости от различного типа грунта акселерограмма ротаций генерировалась каждый раз. Исследовался диапазон ротационных акселерограмм от $v_s=10000$ м/с как грунта гипотетически очень жёсткого (скального) и до $v_s=250$ м/с как грунта мягкого (суглинок, глина).

На рисунках 8–10 отображено, как увеличивается ускорение угловой точки здания при наличии ротационной акселерограммы воздействия относительно оси Z , полученной при разных типах грунта при расчёте системы дифференциальных уравнений численным интегрированием методом Рунге-Кутты 4-го порядка в ПК MathCad и MathLab.

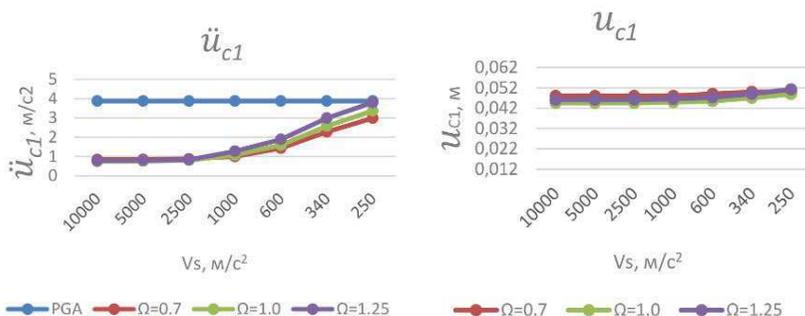


Рисунок 9. Ускорение и перемещение угловой точки здания в зависимости от скорости поперечной волны под подошвой фундамента для трёх типов здания, расположенного на РМО (Воздействие 1)

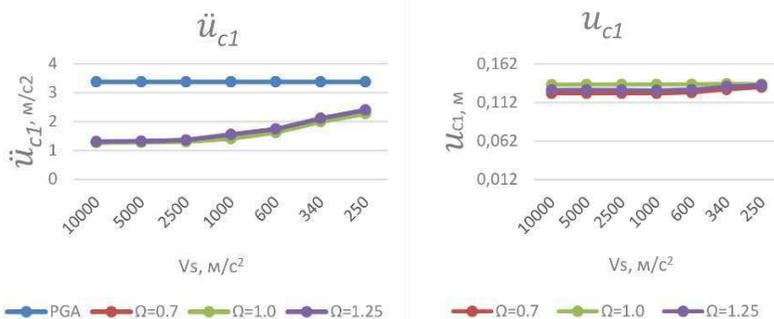


Рисунок 10. Ускорение и перемещение угловой точки здания в зависимости от скорости поперечной волны под подошвой фундамента для трёх типов здания, расположенного на РМО (Воздействие 2)

Приведённые результаты наглядно демонстрируют эффект увеличения линейных ускорений по углам изолируемого объекта в симметричных системах при воздействии сейсмических ротаций. Наибольший крутильный отклик имеют системы, опирающиеся на мягкие грунты. При отдельных воздействиях ускорения увеличиваются в 3,5 раза по отношению к ускорению центра масс (ЦМ) изолированной части здания. Таким образом, на начальной стадии проектировании сначала необходимо стремиться к симметричным системам, редуцируя эксцентриситет между центром жёсткости системы сейсмоизоляции и центром масс сооружения, а затем в зависимости от типа грунта учесть волновой эффект воздействия, путём учёта в анализе ротационной компоненты сейсмического воздействия вместе с поступательными компонентами.

5. Для практических расчётов сейсмоизолированных сооружений на воздействие сейсмических ротаций предложен метод учёта крутильных форм сейсмоизолированных сооружений по линейно-спектральной методике с помощью ротационного спектра, который можно получить из разработанных математических моделей, учитывающих кручение.

В настоящее время анализ прочности сооружений при сейсмическом воздействии проводится линейно-спектральным методом сейсмостойкости. Главным недостатком данного метода является то, что все элементы рассчитываемого здания должны работать линейно. Таким образом, расчёт здания с элементами сейсмоизоляции, которые имеют нелинейную силовую характеристику, неприемлем. Альтернативой этому методу служит прямой динамический метод, то есть пошаговое интегрирование уравнений движения изолируемого объекта, но в случае большого количества элементов (а в конечно-элементных моделях их тысячи) инженер имеет дело с огромным набором данных: набор усилий для каждого элемента и в каждый момент времени. Безусловно, данный метод будет более точным, чем линейно-спектральный, но в проектном анализе такой подход малопригоден в силу большого количества выходных данных.

Распространённым методом для расчёта сейсмоизолированных зданий по линейно-спектральной методике является идея поэтажных спектров, где используются параметры, полученные при обработке законов движения кинематического фундамента (КФ). Иными словами, сначала решается дифференциальное уравнение колебаний нелинейного осциллятора с билинейной силовой диаграммой (нелинейная модель с одной степенью свободы), затем определяются абсолютные ускорения массы осциллятора и по данному ускорению (ускорению КФ) строится расчётный спектр и проводится расчёт здания уже без сейсмоопор на данный расчётный пониженный спектр. Таким образом, если считать, что внешними воздействиями на здание являются движения КФ, то для расчёта сейсмостойкости нужно определить частоты здания, считая его жёстко защемлённым. Данный метод поэтажных спектров следует считать несовершенным в том смысле, что он

учитывает только поступательные колебания вдоль одной из горизонтальных осей. Данную методику следует усовершенствовать таким образом, чтобы можно было учесть также и крутильные формы в расчёте сейсмоизолированных зданий по линейно-спектральной методике.

Таким образом, для учёта крутильных частот мы можем использовать разработанные математические модели, учитывающие кручение. И теперь наряду с абсолютными поступательными ускорениями нам необходимо получить абсолютные вращательные ускорения КФ относительно оси Z (Рисунок 11), затем построить ротационный спектр и с его помощью учесть крутильные частоты здания по линейно-спектральной теории, считая здание жёстко защемлённым.

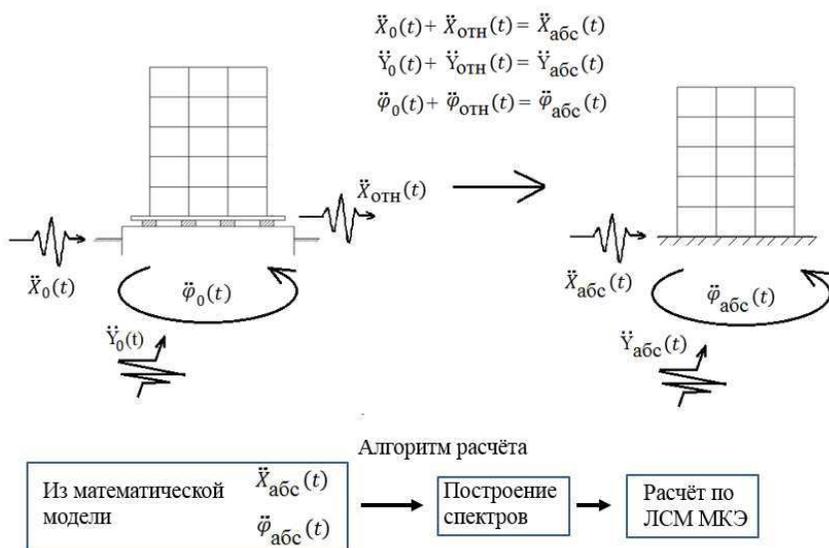


Рисунок 11. Схема и алгоритм выполнения прочностного расчёта сейсмоизолированного сооружения на основе данных, полученных из разработанных математических моделей, учитывающих кручение

На рисунках 12–14 представлены абсолютные поступательные ускорения центра масс здания и абсолютное угловое ускорение относительно оси Z , полученные из математической модели, учитывающей кручение объекта, опирающегося на резинометаллические опоры (РМО). Объект расположен на 116 РМО с $\Omega = 1,25$. Периоды собственных колебаний: $T_x = T_y = 0,816$ с, $T_\varphi = 0,666$ с. По данным абсолютным ускорениям построены графики коэффициентов динамичности для последующего расчёта по линейно-спектральной методике.

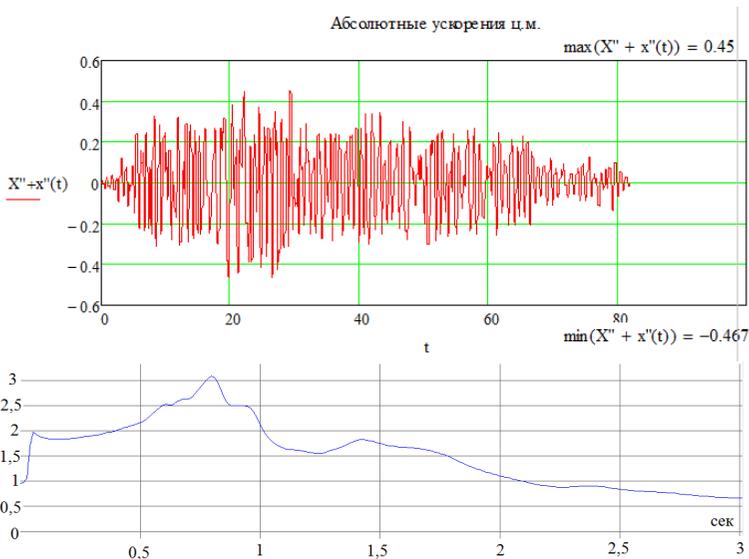


Рисунок 12. Абсолютное линейное ускорение центра масс изолируемой части здания вдоль оси X (сверху) и график коэффициентов динамичности (снизу)

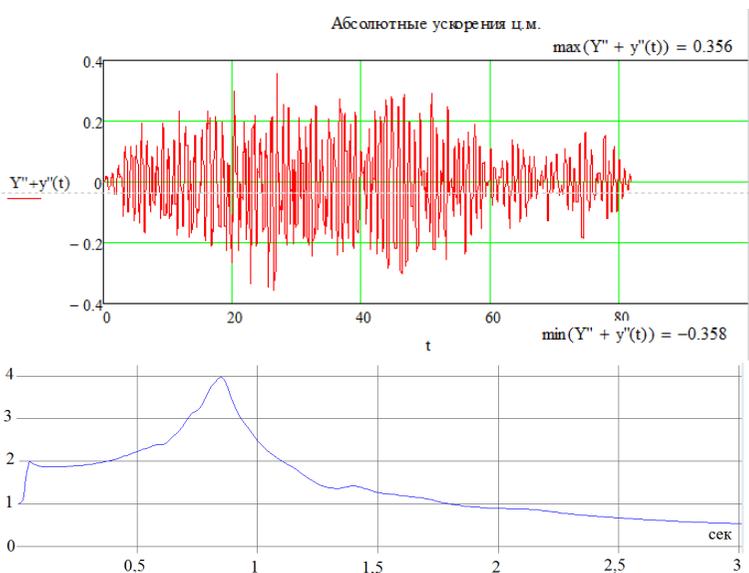


Рисунок 13. Абсолютное линейное ускорение центра масс изолируемой части здания вдоль оси Y (сверху) и график коэффициентов динамичности (снизу)

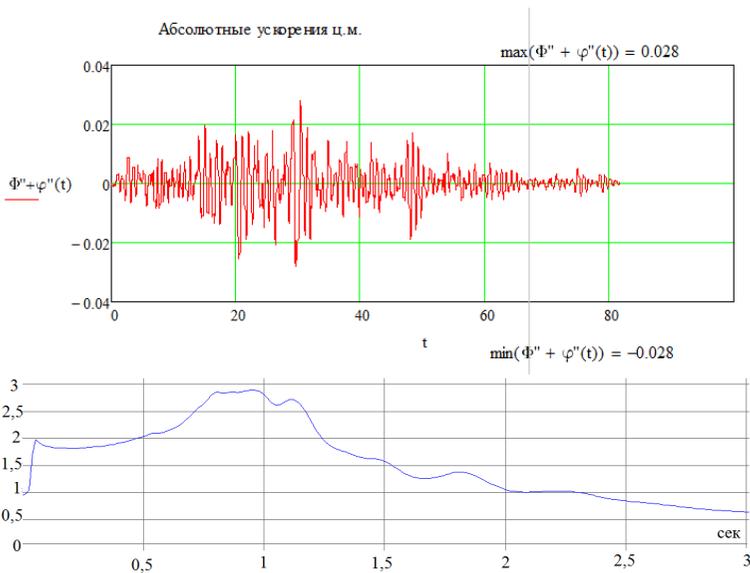


Рисунок 14. Абсолютное угловое ускорение относительно оси Z изолируемой части здания (сверху) и график коэффициентов динамичности (снизу)

Для иллюстрации влияния ротационной компоненты на динамику сейсмоизолированного сооружения, был проведён прочностной расчёт в ПК STARK, реализующий метод конечных элементов.

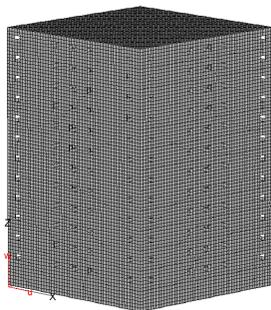


Рисунок 15. Конечно-элементная модель, созданная в ПК STARK для прочностного расчёта

Модель на рисунке 15 полностью состоит из конечных элементов типа «оболочка». Моделируемое здание состоит из 12 этажей. Конструк-

тивно-планировочная система – жёсткая. После расчёта на собственные колебания были определены формы и частоты колебаний. Учитывались сейсмические силы только от горизонтальных и крутильных форм колебаний. Вертикальная форма колебаний не учитывалась. Для данного здания наибольший вклад в суммарную реакцию имеют первая, вторая и третья (крутильная) форма (таблица 1).

Расчёт выполнялся по линейно-спектральной методике. Здание считалось жёстко защемлённым. Для иллюстрации необходимого армирования наружных стен здания представлены результаты с учётом вклада крутильной формы и без учёта. Для проведения конструктивного расчёта в ПК STARK (подбора арматуры в стенах) были сформированы расчётные сочетания усилий (PCY), сформированные согласно действующим нормативным документам, где расчётные значения усилий и напряжений суммируются по формуле Розенблюма, которая означает, что модальные максимумы исследуемых факторов статистически независимы:

$$N_p = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n N_i^2} \quad (29)$$

где N_p - расчетные значения какого-либо фактора (напряжения, усилия, перемещения) в конструкциях от сейсмической нагрузки при условии статического действия ее на сооружение. N_i – значения какого-либо фактора (напряжения, усилия, перемещения), вызываемого сейсмическими нагрузками, соответствующими i -й форме колебаний.

В таблице 2 представлены результаты армирования наружных стен здания с помощью цветовых изополей. Цветовым индикатором показаны зоны, которые необходимо армировать указанной арматурой с соответствующим шагом для удовлетворения условий прочности железобетонных конструкций согласно действующим нормативным документам.

Таблица 1

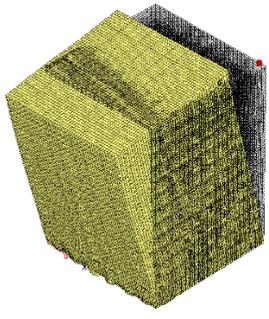
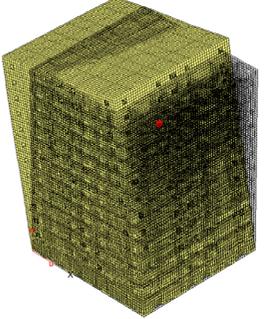
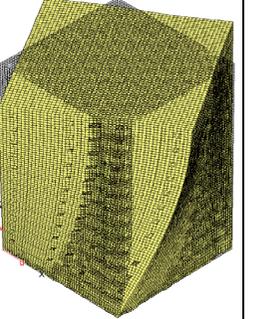
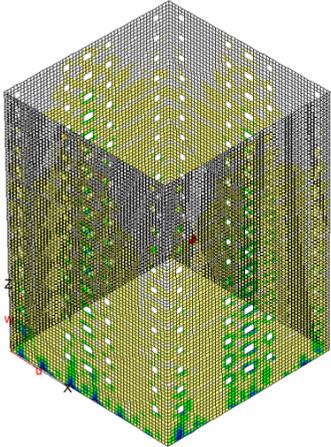
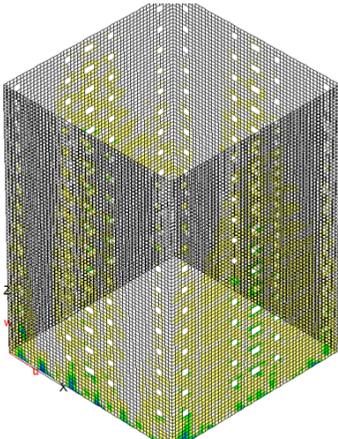
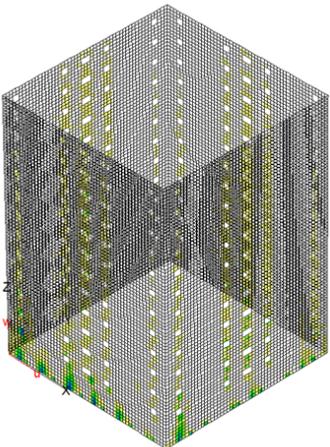
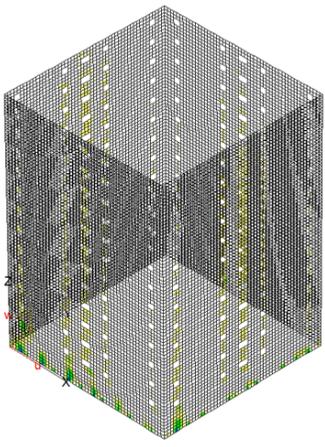
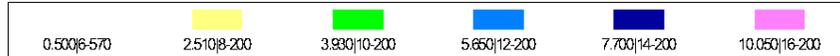
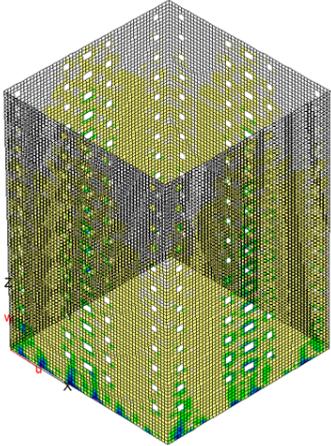
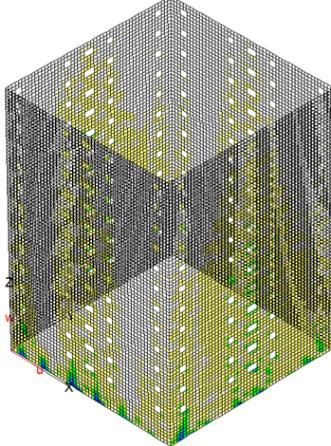
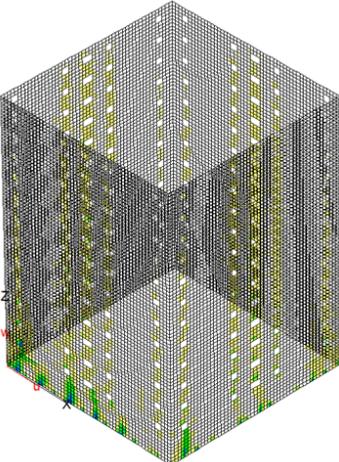
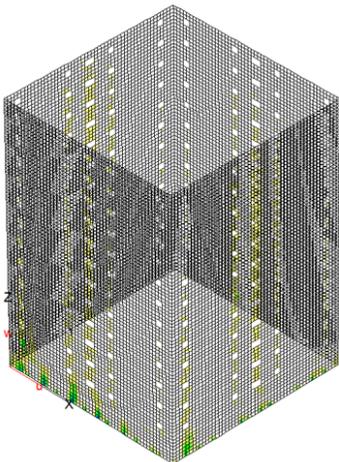
Формы колебаний		
		
1 форма. $T_x=0.195$ с	2 форма. $T_y=0.194$ с	3 форма. $T_\varphi=0.125$ с

Таблица 2

С учётом кручения	Без учёта кручения
Горизонтальная арматура наружной грани стены	
 <p data-bbox="202 762 437 794">$\max A_{Sro} = 9.06 \text{ см}^2/\text{м}$</p>	 <p data-bbox="633 762 869 794">$\max A_{Sro} = 7.81 \text{ см}^2/\text{м}$</p>
Вертикальная арматура наружной грани стены	
 <p data-bbox="202 1332 437 1364">$\max A_{Sru} = 8.43 \text{ см}^2/\text{м}$</p>	 <p data-bbox="633 1332 869 1364">$\max A_{Sru} = 8.11 \text{ см}^2/\text{м}$</p>
 <p data-bbox="151 1401 224 1423">0.500 8-570</p> <p data-bbox="291 1401 364 1423">2.510 8-200</p> <p data-bbox="431 1401 504 1423">3.930 10-200</p> <p data-bbox="571 1401 644 1423">5.650 12-200</p> <p data-bbox="711 1401 784 1423">7.700 14-200</p> <p data-bbox="851 1401 924 1423">10.050 16-200</p>	

С учётом кручения	Без учёта кручения						
Горизонтальная арматура внутренней грани стены							
 <p data-bbox="255 743 477 770">$\max AS_{ru} = 9.9 \text{ см}^2/\text{м}$</p>	 <p data-bbox="685 743 907 770">$\max AS_{ru} = 8.9 \text{ см}^2/\text{м}$</p>						
Вертикальная арматура внутренней грани стены							
 <p data-bbox="247 1313 484 1340">$\max AS_{su} = 8.65 \text{ см}^2/\text{м}$</p>	 <p data-bbox="678 1313 916 1340">$\max AS_{su} = 8.29 \text{ см}^2/\text{м}$</p>						
<table border="0" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 16.6%;"> 0.500 6-570</td> <td style="width: 16.6%;"> 2.510 8-200</td> <td style="width: 16.6%;"> 3.930 10-200</td> <td style="width: 16.6%;"> 5.660 12-200</td> <td style="width: 16.6%;"> 7.700 14-200</td> <td style="width: 16.6%;"> 10.050 16-200</td> </tr> </table>		 0.500 6-570	 2.510 8-200	 3.930 10-200	 5.660 12-200	 7.700 14-200	 10.050 16-200
 0.500 6-570	 2.510 8-200	 3.930 10-200	 5.660 12-200	 7.700 14-200	 10.050 16-200		

III. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Разработана математическая модель с четырьмя степенями свободы, учитывающая кручение сейсмоизолированного сооружения, расположенного на маятниковых опорах и имеющих пластические демпферы, работающих по билинейной силовой диаграмме;

2. Разработана математическая модель с тремя степенями свободы, учитывающая кручение сейсмоизолированного сооружения, расположенного на резинометаллических опорах, работающих по билинейной силовой диаграмме;

3. Сделан принципиальный вывод о важности и значительности кручения, возникающего при несовпадении центра жёсткости системы сейсмоизоляции с центром масс сооружения для зданий, опирающихся на резинометаллические опоры. Наблюдаются увеличения ускорений на 80 % по сравнению с ускорениями центра масс изолированной части здания. С помощью предложенных моделей возможна оценка эксцентриситета для произвольного расположения и произвольного количества сейсмоопор в плане для последующего его редуцирования;

4. Результаты анализа разработанных моделей позволили выявить эффект кручения изолированной части здания при участии ротационных компонент сейсмического воздействия. Сейсмические ротации значительно влияют на динамику симметричного сейсмоизолированного сооружения, расположенного на мягких грунтах. При отдельных воздействиях ускорения увеличиваются в 3,5 раза по отношению к ускорению центра масс изолированной части здания;

5. Для практических расчётов сейсмоизолированных сооружений на сейсмическое воздействие с учётом сейсмических ротаций предложен метод учёта крутильных форм сейсмоизолированных сооружений по линейно-спектральной методике с помощью ротационного спектра, который можно получить из разработанных математических моделей, учитывающих кручение.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, размещенные на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии и приравненные к ним:

1. Рутман Ю. Л., Симборг Э., Бондарев Д. Е. Анализ динамики сейсмоизолированного сооружения с учётом его крутильных колебаний // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 2(61). – С. 112–118.

2. Бондарев Д. Е. Влияние эксцентриситета между центром жесткости и центром масс сейсмоизолированного сооружения на его крутильные колебания при сейсмическом воздействии // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 6 (65). С. 90–94.

3. Бондарев Д.Е. Оценка влияния сейсмических ротаций на динамику сейсмоизолированного сооружения// Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 3(68). С. 62-65

**Публикации в изданиях, входящих в международные
базы цитирования Scopus и Web of Science:**

4. Yu. L. Rutman, E. Simbort, D. E. Bondarev. An analysis of the dynamics of seismically isolated structures taking into account its torsional vibrations // Procedia Structural Integrity. Volume 6, 2017, Pages 208–215.