

На правах рукописи

Ле Тхи Тху Хуэн

**ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМОИЗОЛИРУЕМОГО ЗДАНИЯ
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЗАМЕНЯЕМЫХ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ
СЕЙСМОИЗОЛЯТОРОВ**

Специальность 05.23.17 - Строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Московском государственном строительном университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Мондрус Владимир Львович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Белостоцкий Александр Михайлович

кандидат физико-математических наук
Сергеев Михаил Владимирович

Ведущая организация: **ООО «ВИБРОСЕЙСМОЗАЩИТА».**

Защита диссертации состоится 16 ноября 2010 г. в 15 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.138.12 при ГОУ ВПО Московском государственном строительном университете по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, ауд. 420 УЛК.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО Московского государственного строительного университета.

Автореферат разослан _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Анохин Н.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Значительная часть Вьетнама располагается в сейсмически активных районах. В настоящее время на этих территориях в больших масштабах ведется строительство. Таким образом, остро встает проблема обеспечения сейсмостойкости сооружений на этих территориях.

Успешное решение этой задачи обеспечивает гарантию безопасности проживания людей на сейсмически активных территориях.

Решение проблемы сейсмостойкости зданий за счет усиления их прочности - первое с чего началась практика сейсмостойкого строительства. Однако с ростом сложности конструкций и расширением объема знаний о сейсмичности ситуация зашла в тупик. Повышение прочности в расчете на максимальное воздействие, с ростом последнего, привело к необходимости возведения мощных сооружений. Нужно было искать другой путь.

Поэтому не случайно, что как во Вьетнаме, так и за рубежом, последние годы отмечены повышенным интересом к изучению сейсмостойкости строительных конструкций, и быстрым развитием наук, служащих основой для развития теории сейсмостойкости (инженерная сейсмология, строительная механика и др.). Обращает на себя внимание повышение интереса к методам сейсмоизоляции зданий, что следует из анализа докладов на международных конференциях.

Одним из наиболее прогрессивных средств, обеспечивающим эффективную работу сейсмоизолирующих устройств, является применение в них резинометаллических сейсмоизоляторов.

Резинометаллические сейсмоизоляторы, содержащие податливые элементы из резиноподобных материалов, могут стать неотъемлемым элементом практически любой сейсмозащищенной конструкции: зданий, сооружений, мостов или другого оборудования, подверженного влиянию сейсмической опасности. Наряду с высокой эластичностью резиновые детали обладают и диссипативными свойствами, т.е. поглощают сейсмическую энергию, что необходимо учитывать при разработке систем сейсмической изоляции. Однако методы расчета конструктивных элементов из резины, испытывающих одновременно большие статические и динамические деформации, еще не стали повседневным инструментом проектировщиков. Изложенное бесспорно говорит об актуальности выбранной темы для диссертационной работы.

Цель и задачи работы. Целью работы является исследование поведения сейсмоизолированного здания с применением заменяемых резинометаллических сейсмоизоляторов в сравнении со зданием без сейсмоизоляции.

Для достижения этой цели постановлены и решены следующие задачи:

- вычислена жесткость упругого слоя, как модели резинового слоя сейсмоизолятора, на растяжение-сжатие, изгиб, сдвиг и кручение;
- выполнено сравнение расчетной жесткости сейсмоизолятора на сдвиг C_G с экспериментальной величиной;
- построена временная зависимость горизонтальных ускорений грунта и сейсмоизолированного здания для случая акселерограммы реального землетрясения 1988 г. в г. Спитак (Армения);
- построены фрагменты временных зависимостей горизонтальных ускорений сейсмоизолированного здания от времени, для различных собственных частот при отсутствии сейсмоизоляторов;
- произведено сравнение расчета обычного и сейсмоизолированного здания в программе Etabs, т. е с применением моделей здания с резинометаллическими сейсмоизоляторами и без резинометаллических сейсмоизоляторов;
- построены временные зависимости продольной силы и изгибающего момента для одного и того же элемента для двух моделей здания;
- проанализированы сейсмические нормативные документы различных стран.

Научная новизна работы. Впервые в отечественной практике выполнен теоретически обоснованный сравнительный расчет здания для двух вариантов моделей: с резинометаллическими сейсмоизоляторами и без таковых. Доказано снижение уровня сейсмической нагрузки на 2-3 балла в сейсмоизолированных зданиях. В качестве математического обеспечения для решения упомянутой выше задачи:

- разработана математическая модель резинометаллических сейсмоизоляторов;
- на основе этой модели определены жесткости упругого слоя резинометаллического сейсмоизолятора на растяжение-сжатие, изгиб, сдвиг и кручение;
- в результате спектрального анализа (на основе спектров реальных землетрясений) определены ускорения здания при воздействии на фундамент реальных акселерограмм для двух случаев: здания с резинометаллическими сейсмоизоляторами и обычного здания.

Достоверность основных результатов и выводов диссертации вытекает из:

- обоснованности теоретических положений, используемых в работе;
- использованием апробированного математического аппарата, в т.ч. алгоритмов для численного анализа;
- использованием апробированного в мировой практике программного комплекса ETABS;
- согласованием полученных результатов с экспериментальными данными.

Практическая значимость работы.

- Разработанная в диссертации методика расчета сейсмоизолированных зданий позволяет выполнять проектирование сейсмоизолированных строительных объектов с целью существенного снижения сейсмической нагрузки в зонах с по-

вышенным уровнем сейсмической активности. В связи с этим в программе Etabs произведен сравнительный расчет здания с резинометаллическими сейсмоизоляторами и без таковых.

- Рассмотрена методика расчета резинометаллического сейсмоизолятора (РМС).

- В работе выполнены анализ и сравнение европейских, российских и японских норм, используемых при расчете зданий и сооружений на сейсмические воздействия.

Апробация работы. Основные научные результаты докладывались на:

- научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры- 2007г.;

- всероссийском смотре научных и творческих работ иностранных студентов и аспирантов- 2007г.;

- Двенадцатой Российской конференции пользователей MSC- 2009г.;

- XIX Польско-словацко-российском семинаре «Теоретические основы строительства»- 2010г.;

- Тринадцатой международной межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, докторантов и аспирантов «Строительство- формирование среды жизнедеятельности»- 14-21 апреля 2010г.;

- традиционной научно-практической конференции преподавательского состава института Строительства и архитектуры- 2010г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 работы в изданиях, включенных ВАК в перечень рекомендуемых для опубликования результатов диссертационных работ.

Объём и структура диссертации. Диссертации состоит из введения, 4 глав, заключение, списка литературы, содержит 135 страницы машинописного текста, включая список литературы из 218 наименований библиографии, 52 рисунков, 13 таблиц и материалов приложения.

На защиту выносятся:

- методика расчета сейсмоизолированных зданий и сооружений, позволяющая выполнять проектирование сейсмоизолированных строительных объектов с целью существенного снижения уровня сейсмической нагрузки, с использованием резинометаллических сейсмоизоляторов (РМС);

- результаты расчета здания на сейсмическое воздействие с использованием резинометаллических сейсмоизоляторов (РМС) и без таковых;

- методика расчета резинометаллических сейсмоизоляторов (РМС).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертации, определена цель работы, ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе рассмотрена сейсмозащита зданий как проблема строительства во Вьетнаме. Инженерно-геологические условия г.Ханоя сложные, обусловленные наличием слабых водонасыщенных слоев большой толщины, достигающие 30-40м. Вероятность возникновения сильных землетрясений в г.Ханое велика, что обусловлено наличием разломов и наблюдаемой периодичностью сильных землетрясений раз в 1100 лет.

Согласно данным института Физики Земли республики Вьетнам (2003г.) имеются 30 областей с высокой вероятностью возникновения землетрясения интенсивностью от 6 до 7 баллов по шкале Рихтера. Учитывая неблагоприятные инженерно-геологические условия территории Вьетнама с наличием большой толщи слабых водонасыщенных грунтов, следует предположить, что интенсивность землетрясения в таких условиях повысится до 7, 8 и 9 баллов. Поэтому при строительстве зданий увеличение их сейсмостойкости только за счет увеличения прочности конструкции экономически нецелесообразно и необходимо применить системы сейсмической защиты.

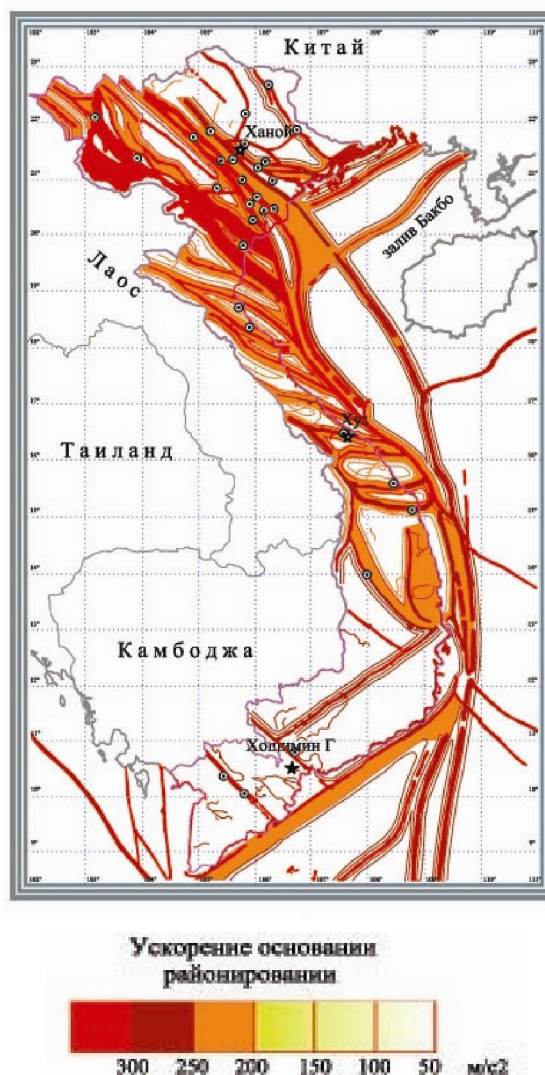


Рис.1. Карта сейсмического районирования Вьетнама по шкале максимального ускорения оснований. (По данным институт Физики Земли республики Вьетнам - 2003)

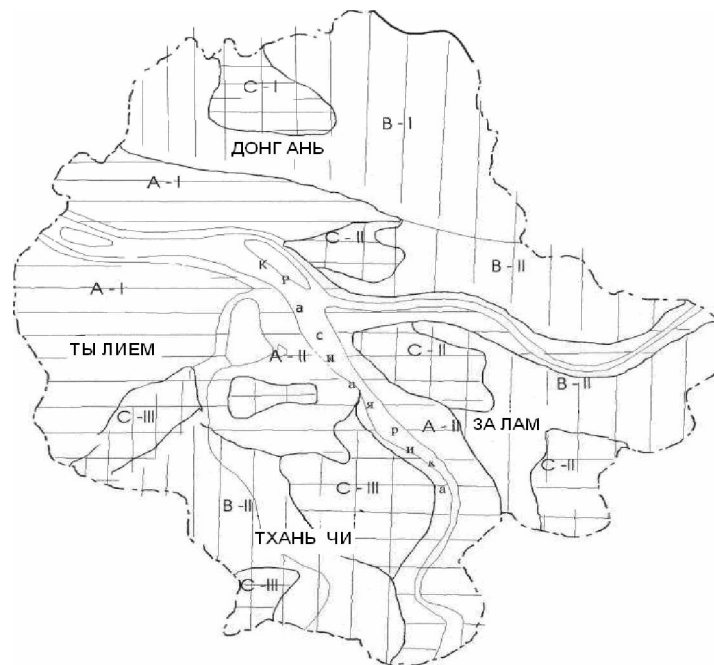


Рис.2. Схематическая карта распространения различных видов грунтов на территории Вьетнама

Для условий Ханоя наиболее подходящим представляется способ защиты строительных конструкций с применением резинOMETаллических сейсмоизоляторов.

Далее приведен обзор и анализ европейских, российских и японских документов, регламентирующих расчёты и проектирование сооружений в активных сейсмических районах. Представлено сравнение этих документов.

Основной целью всех рассмотренных норм является предотвращение разрушений конструкций при воздействии **расчётного землетрясения**. Строительные Нормы и Правила определяют базисные принципы и концепции, устанавливают некоторый минимум требований при проектировании и рекомендуют возможные методы расчёта конструкций (в данном случае - расчёта на сейсмические воздействия).

Задание исходной сейсмологической информации. Практически во всех Нормативах сейсмические воздействия задаются сглаженными спектрами ответов достаточно консервативными для учёта неопределённостей возможных будущих сейсмических воздействий. Эти спектры могут быть как специальными, (заданными для данной площадки строительства), так и стандартными. Кроме спектров ответов задаются уравнения движений грунта с использованием таких параметров, как пиковое значение ускорения грунта (PGA) и пиковое значение скорости грунта (PGV). Сейсмические воздействия могут быть представлены в виде одной или набора акселерограмм, совместимых с расчётным спектром ответов. Как правило, в расчётах используются две ортогональные горизонтальные и вертикальные компоненты движения.

При необходимости в исходную сейсмическую информацию должны включаться и другие представляющие интерес параметры движения грунта, такие как пиковые значения перемещений грунта (PGD) и продолжительность сейсмического грунта. Эти дополнительные параметры необходимы для анализа нелинейных эффектов в грунтовых основаниях (например, при учёте эффекта разжижения грунта). Исходная сейсмическая информация должна соответствовать геологическим и сейсмологическим условиям места строительства.

Типы грунтов. Европейские сейсмические нормы классифицируют грунты в зависимости от средней скорости волн сдвига. Японские сейсмические стандарты классифицируют грунты в зависимости от периода собственных колебаний слоёв грунта, расположенных над скальной породой, при этом учитывается и глубина, и мощность слоёв.

Спектры ответов. Спектры ответов (максимальных реакций) – одна из наиболее важных, полезных и широко используемых концепций в теории и практике расчётов сооружений на сейсмостойкость. Предложенная более 80-ти лет назад, в настоящее время эта концепция используется практически во всех зарубежных нормативных документах и руководствах по расчёту сооружений на сейсмостойкость.

В российских Нормах для оценки сейсмических воздействий используется понятие «спектральный коэффициент динамичности» - β . Кривые коэффициента динамичности β в российских нормах строятся как функции периода свободных колебаний осциллятора. В зарубежных нормах этот же коэффициент называется спектром реакций (отклика или ответа), что более правильно соответствует физической сущности этого параметра. В настоящее время в России понятие спектр ответа используется только при расчётах на сейсмостойкость строительных конструкций и оборудования АЭС.

Сравнение спектров ответов (ускорений), представленных в Нормах ЕС 8, Японии показало, что величины ускорений в европейских Нормах ЕС 8 выше величины ускорений в Японских Нормах.

Методы анализа. Во многих Нормах зарубежных стран для расчётов сооружений на сейсмостойкость рекомендуется использовать следующие методы:

- линейный спектральный анализ с использованием спектров ускорений;
- метод фундаментальной преобладающей формы колебаний;
- линейный стохастический анализ конструкции;
- нелинейный динамический анализ во времени;
- статический нелинейный анализ.

В заключение отметим, что современные зарубежные Нормы расчётов на сейсмостойкость отличаются большой детализацией при задании исходной сейсмической информации и подробными рекомендациями по выбору моделей конструкций в целом и отдельных ее частей и методов расчёта.

В рамках этих рекомендаций существующие системы сейсмической защиты характеризуются большим разнообразием применяемых конструктивных решений, каждое из которых обладает своими достоинствами и недостатками. Необходимо отметить, что практически используются комбинации различных конструктивных решений. Комбинированные системы сейсмической защиты являются наиболее эффективными потому, что за счет разнообразия применяемых в них элементов надежнее защищают сооружения от различных негативных последствий землетрясений. С этой точки зрения, особенно перспективными являются такие системы, в которых различные принципы сейсмозащиты реализуются с помощью одного простого технического решения. К таким системам, в первую очередь, относятся системы защиты, использующие резинометаллические сейсмоизоляторы. Применение этого метода защиты не противоречит ни одному из существующих методов расчета. Поскольку модель сейсмоизолятора встраивается в общую расчетную модель здания.

Во второй главе описывается построение модели здания, которое предстоит рассчитать на сейсмическое воздействие, без резинометаллических сейсмоизоляторов в программе Etabs.

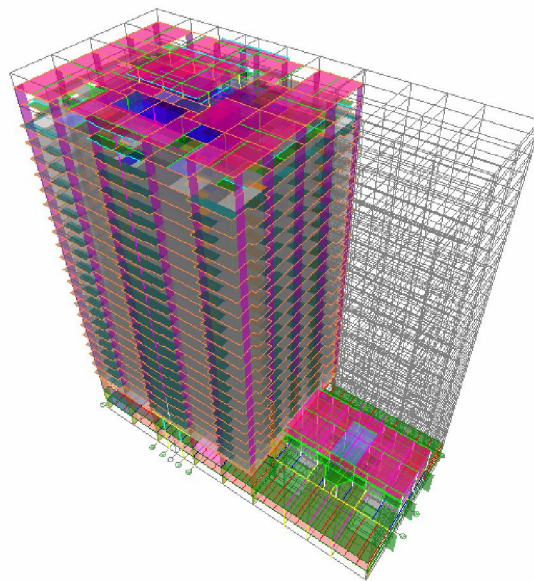


Рис.3. Общий вид модели здания

Программа Etabs рассчитывает напряжения, возникающие в элементах конструкции здания. Наиболее нагруженные элементы в статическом случае, испытывают наибольшие нагрузки и при землетрясениях.

Полученные результаты расчета здания под воздействием сейсмической нагрузки по СНиП II-7-81* неплохо корреспондируются с расчетами по Европейским нормам.

Таблица 1. Сравнение максимальных перемещений верха здания по разным нормам

Норма	Европейская	СНиП
Перемещение верха		
Минимальное		
U_x (м)	-0,1395	-0,1452
U_y (м)	-0,0281	-0,0338
U_z (м)	-0,0165	-0,0173
Максимальное		
U_x (м)	0,1391	0,1423
U_y (м)	0,0551	0,0601
U_z (м)	0	0

В третьей главе описывается конструкция резинометаллических сейсмоизоляторов. Сутью сейсмоизоляции является использование диссипативных, демпфирующих элементов в конструкции здания. В частности, применяются резинометаллические сейсмоизоляторы, которые обычно расположены между фундаментом здания и первым этажом. Конструктивно сейсмоизолятор представляет собой резинометаллическое тело, состоящее из чередующихся слоев резины и металла.

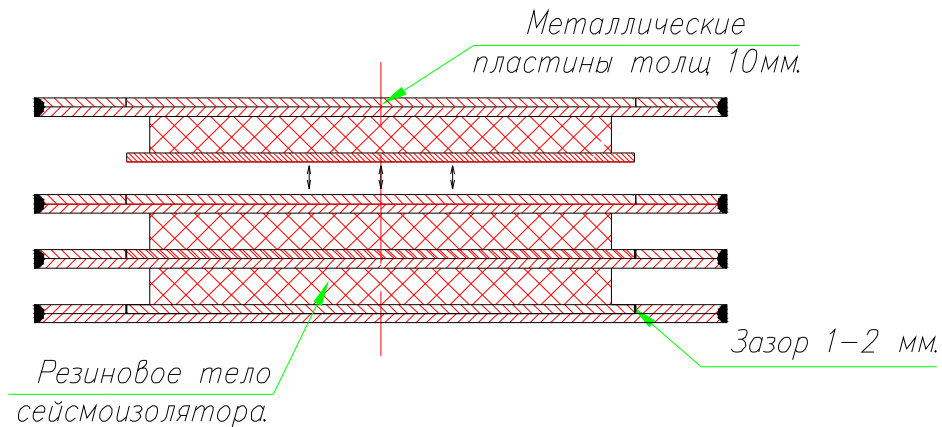


Рис.4. Конструкция резинометаллических сейсмоизоляторов

Следуя модели предложенной Мальковым В.М. резинометаллический сейсмоизолятор будем рассматривать в качестве упругой резинометаллической колон-

ны, считая что в процессе работы деформируются только резиновые слои, а армирующие слои металла абсолютно жесткими.

Используя асимптотический подход и учитывая, что уравнения теории упругости в случае тонкого слоя содержат два малых параметра h/R , G/K , получим следующие формулы для осреднения жесткости всей многослойной опоры:

$$C_p = \frac{\pi R^2 G}{N \cdot h} \left[1 - \frac{2I_1(\lambda)}{\lambda I_0(\lambda)} \right] \quad \text{- жесткость на сжатие} \quad (1)$$

$$C_G = \frac{\pi R^2 G}{N \cdot h} \quad \text{- жесткость на сдвиг} \quad (2)$$

$$C_B = \frac{\pi R^4 K}{N \cdot h} \left[\frac{1}{4} - \frac{I_2(\lambda)}{\lambda I_1(\lambda)} \right] \quad \text{- жесткость на изгиб} \quad (3)$$

$$C_z = \frac{\pi R^4 G}{2 \cdot N \cdot h} \quad \text{- жесткость на кручение} \quad (4)$$

Здесь: h - толщина слоя, R - радиус круглого сечения слоя резины, N - число слоев резины, G - модуль сдвига, K - модуль объемного сжатия, а I_0, I_1, I_2 - модифицированные функции Бесселя.

Для определения динамического сдвигового модуля упругости элемента сейсмоизолятора отечественного производства в лаборатории ЦНИИСК им. Кучеренко 09.04.09. (при участии Дашевского М.А, Хасанова Т.М., Сизова Д.К, Л.Т.Т.Хуэн) была проведена серия оригинальных натуральных испытаний экспериментального образца элемента сейсмоизолятора, представляющего из себя армированное металлом слои резины специальной марки, используемой при сейсмозащите зданий. Общий вид и схема установки, предназначенной для определения жесткости сейсмоизолятора на сдвиг, показан на рис. 5.

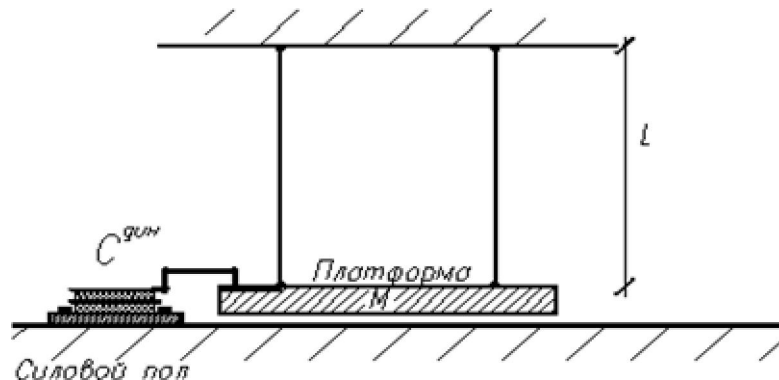


Рис.5. Внешний вид экспериментальной установки. Схема испытаний.

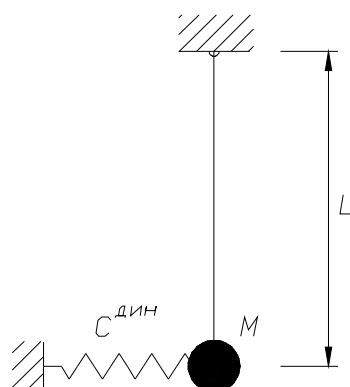


Рис.6. Система измерения вибрации



Рис.7. Экспериментальная установка

Как показано на рис.7. испытательная установка представляет собой массивную металлическую платформу общим весом 1516 кг, подвешенную к жесткой металлической раме с использованием гибких подвесов. С одной стороны металлическая платформа жестко соединена с сейсмоизолятором, закрепленным в основании. С целью предотвращения возможных крутильных колебаний платформы относительно центра масс в конструкцию экспериментальной установки введена система фиксирующих рессор, позволяющая колебаться маятнику только в одной плоскости. Далее в процессе эксперимента производилось отклонение платформы от первоначального положения устойчивого равновесия и свободное отпущение платформы. Определялась частота колебаний экспериментальной установки с использованием виброизмерительной аппаратуры и принималась за частоту собственных колебаний системы. Как видно из представленной на рис.7. принципиальной схемы, в первом приближении установка может рассматриваться как система с одной степенью свободы - груз на подвесе с введенной дополнительной жесткостью виброизолятора рис.8, т.е. так называемый подпружиненный маятник.



**Рис.8. Упрощенная схема испытаний
(математическая расчетная модель)**

Принятая упрощенная схема эксперимента, позволяющая определить важнейшую физическую характеристику резины - динамический модуль сдвига, не полностью учитывает реальную работу резины в конструкциях сейсмоизолятора. В условиях действительной работы сейсмоизолятора в конструкциях здания элемент - слой находится в условиях предварительного сжатия, и, кроме того, нелинейно деформируется при сейсмическом воздействии. С другой стороны рассматриваемая упрощенная модель сейсмоизолятора, как упругого элемента, делает возможным проведение достоверных расчетов с применением современных программных комплексов.

Для расчетной модели в виде подпружиненного математического маятника жесткость упругого элемента C определяется по формуле:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_{дин}}{M} + \frac{g}{L}} \quad (5)$$

С целью проверки полученного результата расчета производилось моделирование экспериментальной установки в программном комплексе, использующем метод конечного элемента (МКЭ). Сейсмоплатформа моделировалась с использованием оболочечных конечных элементов, а сами подвесы с использованием балочных конечных элементов. Конечно-элементная модель сейсмоплатформы представлена на рис.9.

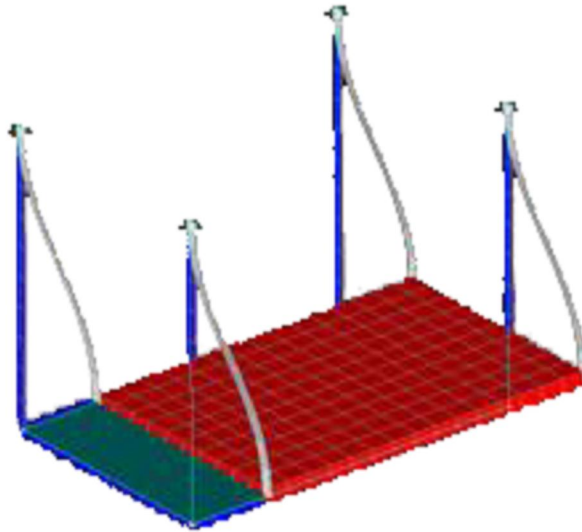


Рис.9. Конечно-элементная модель сейсмоплатформы (1 форма колебаний).

В модели принималось жесткое закрепление верхних точек гибких подвесов. Жесткость сейсмоизолятора вводилась в расчетной модели с использованием двух-узлового конечного элемента заданной жесткости, величина которой определялась на основе предшествующего приближенного расчета по одномерной расчетной формуле. Далее производился модальный анализ конструкции сейсмоплатформы и определялась первая собственная частота колебаний. В таблице 2. приводится определенная экспериментально собственная частота сейсмоизолятора и вычисленная на её основе величина жесткости сейсмоизолятора. Далее в этой же таблице приводятся результаты выполненного расчета (МКЭ) сейсмоплатформы с использованием полученной экспериментально жесткости. Как следует из результатов расчета, полученная методом МКЭ частота собственных колебаний отличается менее, чем на 0,4% от наблюдаемой экспериментально. То есть использование при определении жесткости сейсмоизолятора на сдвиг формулы (5), равносильное замене сейсмоплатформы одномерной моделью, соответствующей рис.8., вносит весьма малую погрешность в определение жесткости сейсмоопор при горизонтальном воздействии.

Таблица 2. Сравнение частоты собственных колебаний и жесткости сейсмоизолятора

№ п.п.	Эксперимент		Метод конечного элемента (МКЭ)	
	1	Частота собственных колебаний, Гц	Найденная на основе формулы (5) величина динамической жесткости, Н/м	Частота собственных колебаний, Гц (результаты расчета)
2	5,0	$1,4907 \times 10^6$	4,98	$1,4907 \times 10^6$

Для резинометаллических сейсмоизоляторов статическая сдвиговая жесткость определялась по формуле:

$$C_G = \frac{\pi R^2 G}{N \cdot h}, \quad (6)$$

а при динамических испытаниях при определении жесткости в этой формуле используется динамический модуль сдвига равный:

$$G_{дин} = G_{ст} \cdot 1,8 \quad (7)$$

В формуле (6): R - радиус резиновых слоев; G - модуль сдвига; N - число слоев; h - толщина слоя.

Используя формулу (6), получим жесткость испытуемого сейсмоизолятора:

$$C_G = 1,4912 \times 10^6 \text{ н/м},$$

здесь: $R=0,25 \text{ м}$, $G=0,3367 \times 10^6 \text{ н/м}^2$ (статический модуль),

$G_{дин}=0,606 \times 10^6 \text{ н/м}^2$ (динамический модуль), $N=2$, $h=0,04 \text{ м}$,

C_G отличается от экспериментальной величины менее чем на 0,03%.

При проведении ориентированных расчетов, пренебрегая линейными размерами здания, заменим его точечной массой M , расположенной на поверхности опоры (рис.10). В этом случае, мы пренебрегаем напряженным состоянием каркаса здания и оцениваем влияние системы сейсмозащиты на движение здания как целого, такая модель называется моделью с одной степенью свободы (1-DOF model).

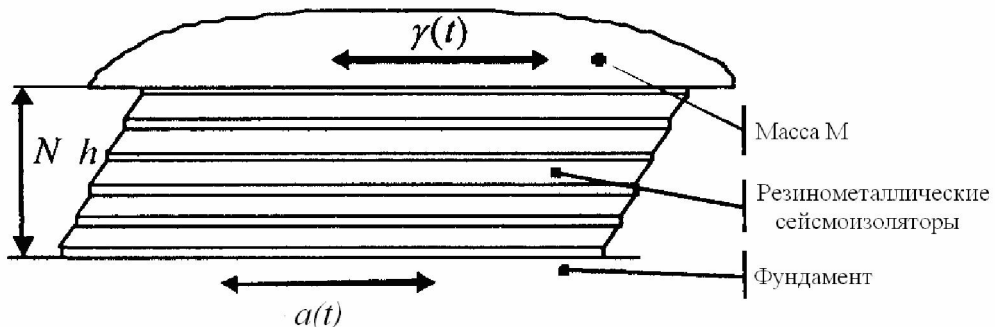


Рис.10. Модель с одной степенью свободы:

$a(t)$ - временная зависимость сдвига фундамента в горизонтальной плоскости, $\gamma(t)$ - соответствующее смещение здания под воздействием сейсмической нагрузки, N - число слоев резины резинометаллических сейсмоизоляторов, h - толщина одного резинового слоя

В предложенной модели сила, приложенная к массе M со стороны опоры, равна:

$$F = -S \cdot \sigma(t), \quad (8)$$

где S - площадь верхней грани резинометаллических сейсмоизоляторов, $\sigma(t)$ - оп-

ределяется соотношением: $\sigma(t) = G_0 \left(\varepsilon(t) - \int_{-\infty}^t R(t-\tau) \varepsilon(\tau) d\tau \right)$, (9)

где: G_0 - мгновенный модуль сдвига, $\sigma(t)$ - одна из компонент тензора напряжений σ_{zx} или σ_{zy} , $\varepsilon(t)$ - соответствующая компонента тензора деформаций ε_{zx} или ε_{zy} , $R(t-\tau)$ - ядро релаксации Ю.Н. Рабонова, описывающее вязкоупругие свойства резины.

Заметим, что зависимости $a(t)$ и $\gamma(t)$ задаются относительно инерциальной системы отсчета, тогда деформация сдвига в слое резины $\varepsilon(t)$ составит

$\varepsilon(t) = \frac{\gamma(t) - a(t)}{N \cdot h}$. Отсюда уравнение движения для массы M имеет следующий вид:

$$M \cdot \ddot{\gamma}(t) = -SG_0 \left(\varepsilon(t) - \int_{-\infty}^t R(t-\tau) \cdot \varepsilon(\tau) d\tau \right), \quad \varepsilon(t) = \frac{\gamma(t) - a(t)}{N \cdot h}, \quad (10)$$

где G_0 - мгновенный модуль сдвига резины. Полагаем, что задана зависимость смещений земной поверхности во времени $a(t)$ и требуется найти смещение $\gamma(t)$ массы M с учетом вязкоупругих свойств резины.

В этом случае зависимость $\gamma(t)$ определяется следующим уравнением:

$$\ddot{\gamma}(t) + \omega_0^2 \left((\gamma(t) - a(t)) - \int_{-\infty}^t R(t-\tau) \cdot \varepsilon(\tau) d\tau \right) = 0, \quad (11)$$

где $\omega_0 = \sqrt{\frac{SG_0}{N \cdot h \cdot M}}$ - характерная частота системы, $a(t)$ – заданная временная зависимость смещений грунта.

Решая уравнения (11), получаем:

$$\gamma(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega \cdot \exp(i\omega t) \cdot a(\omega) \cdot \frac{(1 - R(\omega))}{(1 - R(\omega)) - (\omega/\omega_0)^2} \quad (12)$$

Данное выражение позволяет вычислить в квадратурах зависимость $\gamma(\omega)$, если известен спектр временной записи смещений грунта $a(\omega)$.

Для реальных землетрясений смещение $a(t)$ представляет собой достаточно сложную, сильно хаотизированную функцию времени со столь же сложным частотным спектром. В качестве примера приведем расчет колебаний здания для сильного землетрясения в районе г.Спитак (Республика Армения). Временная зависи-

мость ускорений почвы и здания в направлении Восток-Запад представлена на рис.11 (относительные единицы). Запись сделана на станции И0027 “Гукасян” ИГИС АН Арм. ССР 07.12.1988г. в 07ч.41мин. Параметры сейсмозащиты соответствуют собственной частоте $\omega_0 - 3 \text{ сек}^{-1}$ и $\beta = 0,5$. Приведенная зависимость $\gamma(t)$ была определена с помощью численного преобразования Фурье соотношения (12).

Для сравнения на рисунке 12 приведены фрагменты зависимостей ускорений здания $\gamma(t)$ от времени для землетрясения в Армении при различных собственных частотах колебаний $\omega_0 = 1, 2, 3 \text{ сек}^{-1}$ и $\alpha = -0,6, \beta = 0,5$ (параметры аппроксимации).

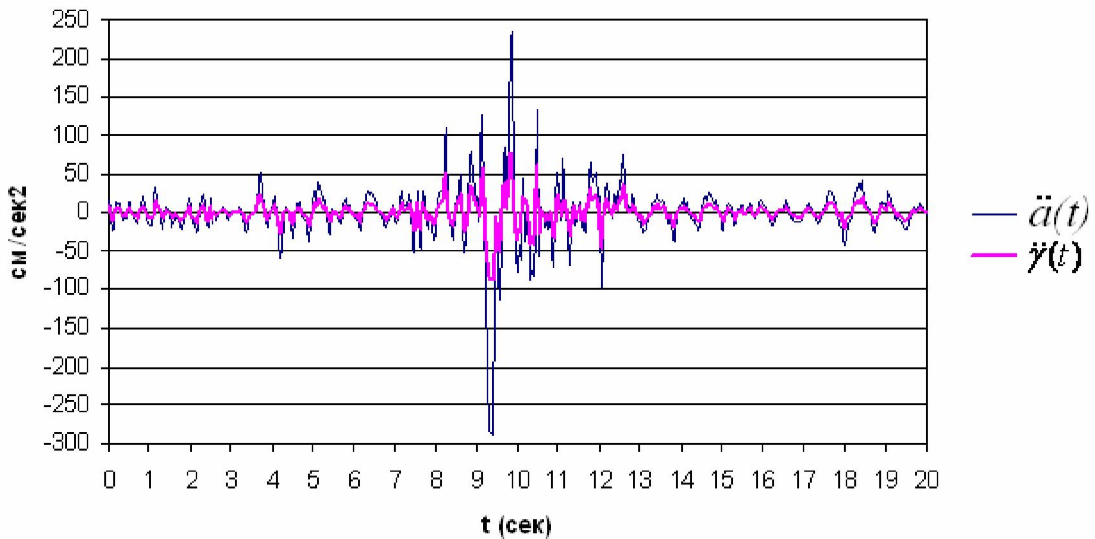


Рис.11. Временная зависимость горизонтальных ускорений грунта $\ddot{a}(t)$ и сейсмоизолированного здания $\gamma(t)$ для землетрясения в Армении, при использовании трехслойных сейсмоизоляторов.

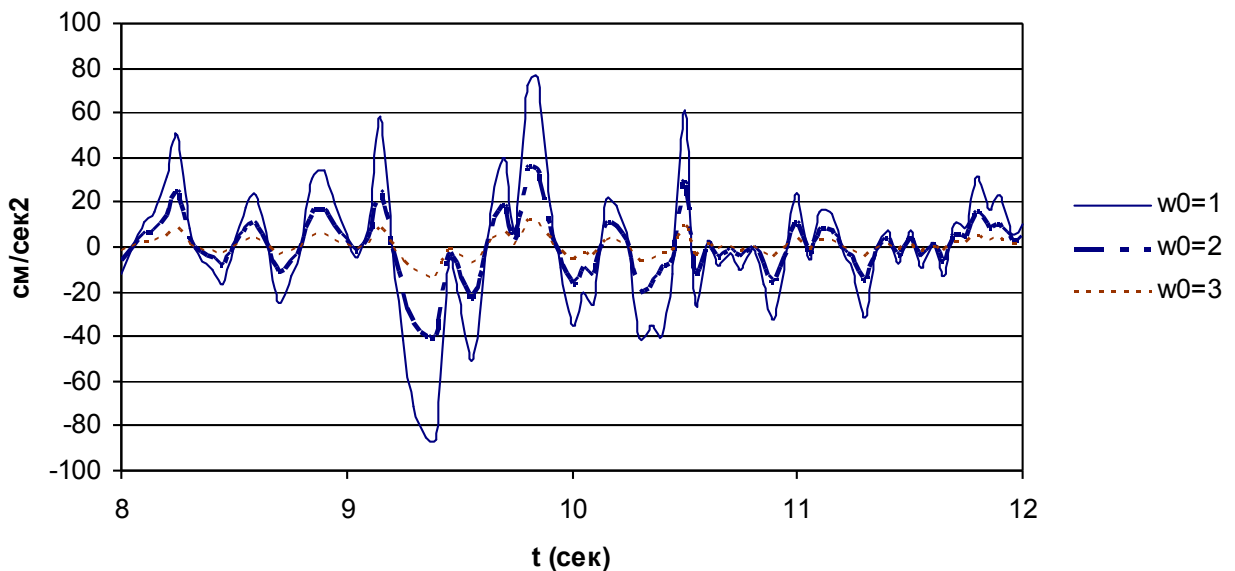


Рис.12. Фрагменты временных зависимостей горизонтальных ускорений сейсмоизолированного здания $\gamma(t)$ от времени, для различных собственных частот ω_0

Несмотря на то, что величины ω_0 лежат в критической области, действие сейсмозащиты является существенным. Ускорения, действующие на здание, ослаблены по сравнению с ускорениями грунта. При этом зависимость этих ускорений от времени является более плавной функцией, это значит, что влияние высокочастотных составляющих отрезается защитой.

Движение грунта в значительной степени хаотично, поэтому за конечный интервал времени амплитуда колебаний здания не успевает сильно вырасти. Это явления хорошо видно на примере Армянского землетрясения: длительность Армянского землетрясения в несколько раз меньше, что сильно повышает эффект вносимый сейсмозащитой.

Полученные в рамках одномерной модели результаты позволяют сформулировать ряд простых и обоснованных критериев оценки параметров резинометаллических сейсмоизоляторов в задачах сейсмической защиты зданий:

Малая горизонтальная жесткость резинометаллических сейсмоизоляторов позволяет эффективно защитить здание от горизонтальных колебаний грунта при условии, что основная часть частотного спектра смещений грунта $a(\omega)$ при землетрясениях в данном регионе содержит частоты в 3 раза большие, чем частота собственных колебаний ω_0 . Это условие может быть выполнено за счет выбора резины с меньшим мгновенным модулем сдвига G_0 (или за счет большей высоты сейсмоизоляторов). Но чрезмерно малый модуль сдвига сделает защиту малоустойчивой к любым землетрясениям, в том числе и малой интенсивности.

В качестве материала резинометаллических сейсмоизоляторов следует использовать резины, для которых реологический параметр β не слишком велик, $\beta < 1$. Параметр β имеет смысл обратного времени релаксации эластомера. Меньшие времена релаксации увеличивают эффективную жесткость конструкции. Поэтому, при прочих равных условиях, следует выбирать резины с меньшей величиной β .

В четвертой главе с помощью программы Etabs проведен сравнительный расчет здания с резинометаллическими сейсмоизоляторами и без таковых на сейсмическое воздействие. С этой целью предложена модель резино-металлического сейсмоизолятора (РМС). Для демонстрации действия системы сейсмической защиты были проведены расчеты воздействия, типичного сильного землетрясения в районе г.Спитак (Республика Армения) (рис.13).

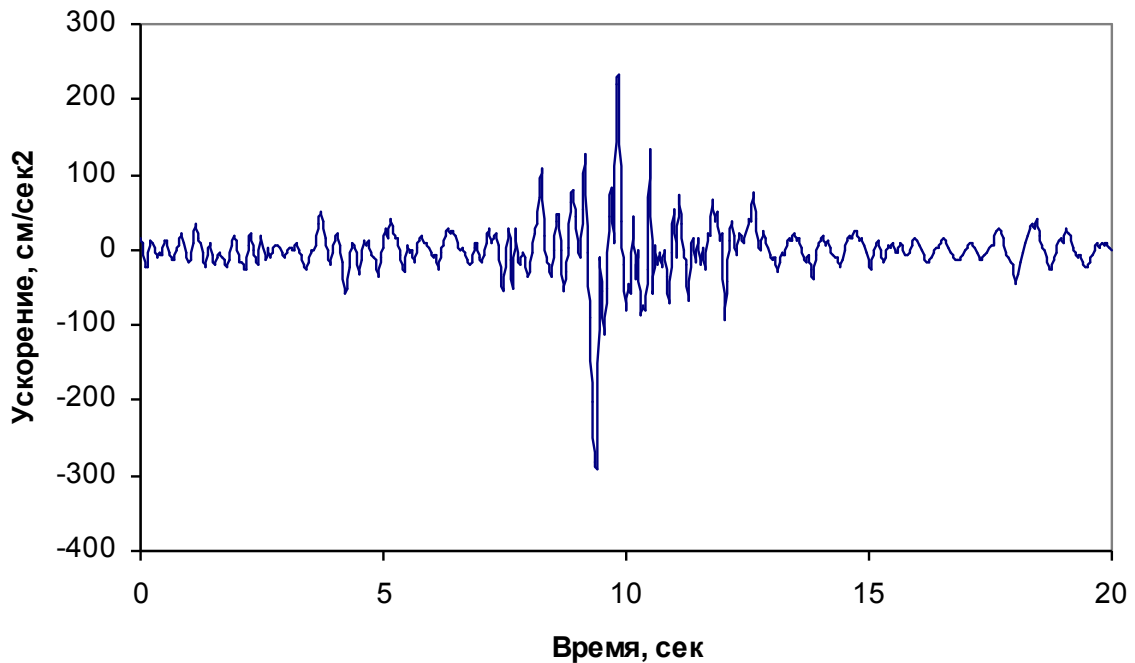


Рис.13. Ускорения грунта для землетрясения в районе г.Спитак (Республика Армения)

Для этого было выполнено моделирование системы сейсмической защиты, состоящей из 87 РМС. В соответствии с конструкцией здания сейсмоизоляторы располагались между фундаментом и основными несущими колоннами. В качестве элементов системы сейсмической защиты здания были выбраны РМС круглого сечения.

Периоды собственных колебаний модели с элементами сейсмической защиты, рассчитанные по программе ETABS, приведены в таблице 3 (первой строка).

Таблица 3. Периоды собственных колебаний для здания с РМС

№ моды	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T(сек.)	2,420	2,358	2,318	0,893	0,881	0,780	0,754	0,668	0,591	0,415	0,328	0,276
T1(сек.)	0,924	0,902	0,856	0,421	0,405	0,320	0,303	0,280	0,265	0,211	0,150	0,125

Они существенно отличаются от периодов собственных колебаний модели без РМС (вторая строка). Первые несколько форм собственных колебаний приведены на рис.14- 15. Нетрудно видеть, что моды собственных колебаний модели с РМС соответствуют движениям здания, почти изолированного от движений фундамента.

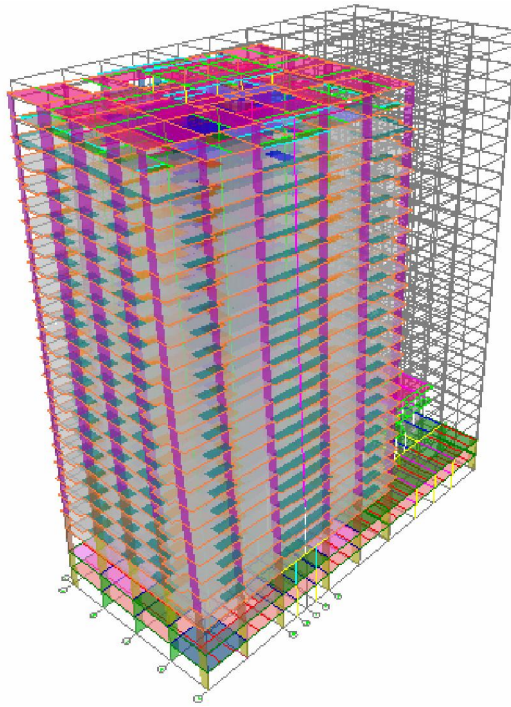


Рис.14. Модель с РМС, первая мода собственных колебаний, $T=2,42$ сек

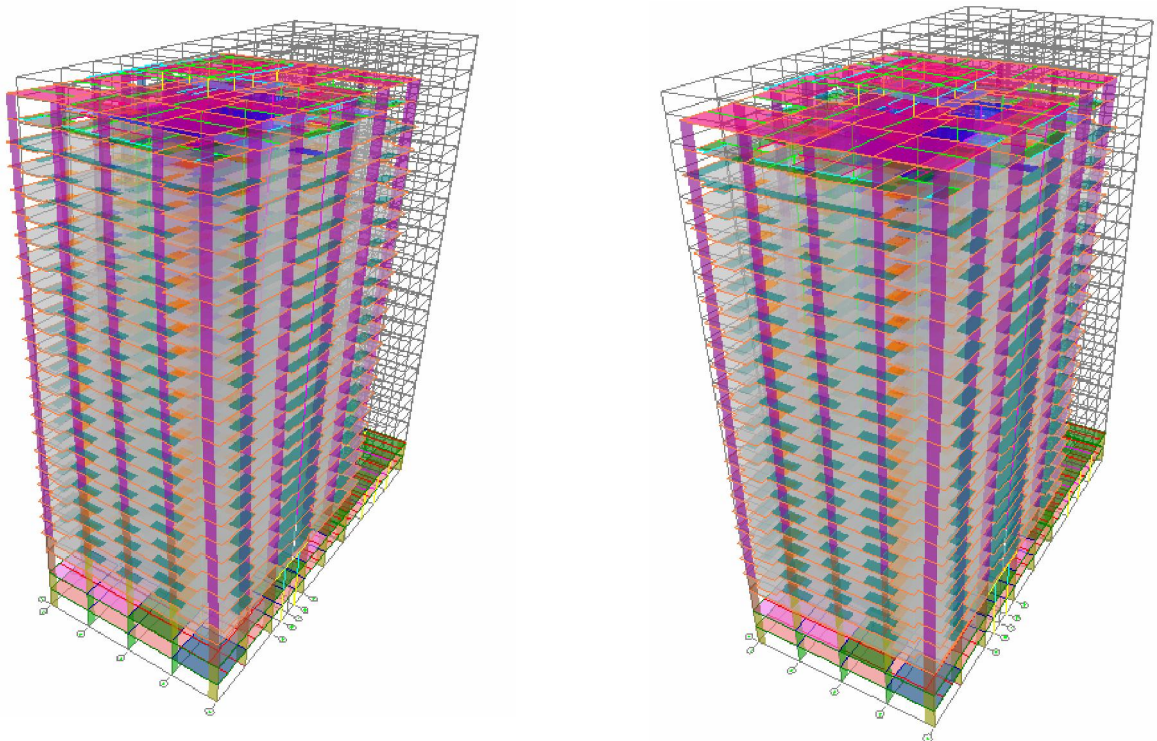


Рис.15. Модель с РМС, вторая (а) и третья (а) моды собственных колебаний (соответственно $T=2,358$ с и $2,318$ с)

На рисунках 16 приведены временные зависимости для амплитуд ускорений, расположенного на крыше здания одного и того же узла обеих моделей по сравнению с ускорениями грунта.

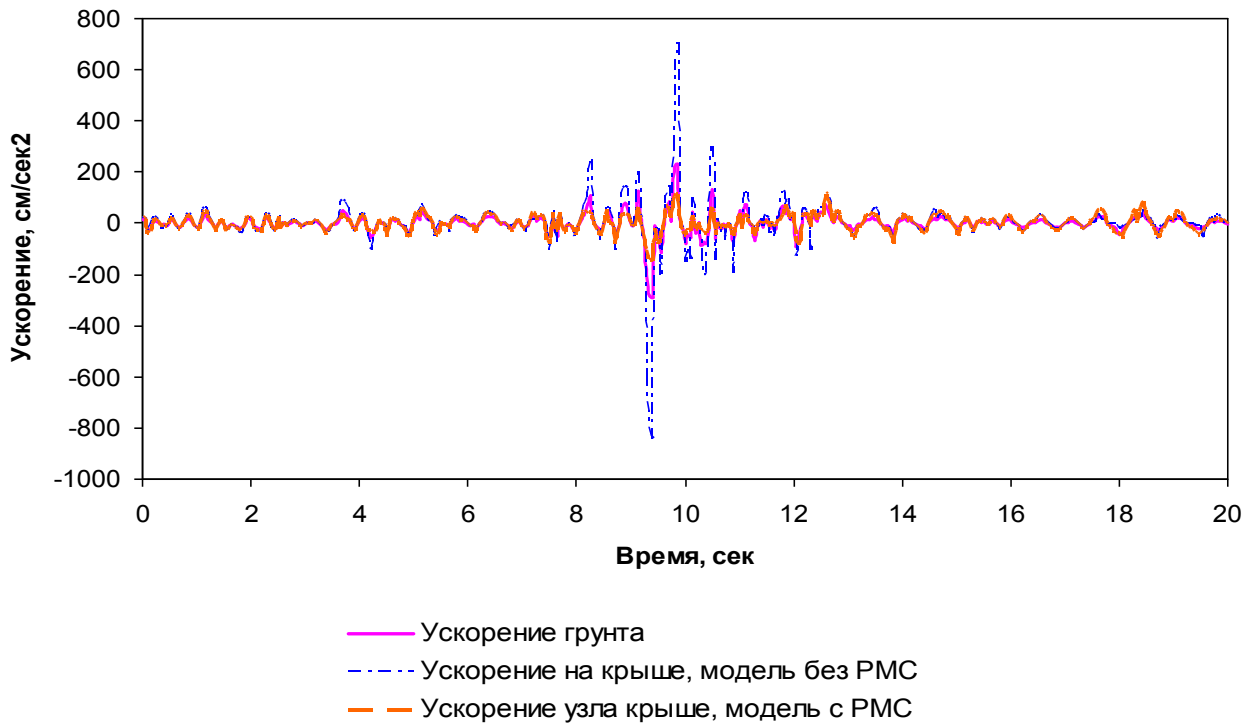


Рис.16. Временные зависимости ускорений узла на крыше здания

В случае воздействия колебаний грунта на здание без сейсмической защиты, заметно значительное увеличение амплитуды виброускорения на крыше - в 3 раза, по сравнению с колебаниями основания. При воздействии со стороны землетрясения на сейсмоизолированное здание, наоборот, происходит значительное снижение амплитуды виброускорения точки на крыше – в 2 раза по сравнению с колебаниями основания. Так, если максимальная величина ускорения грунта составляет 290 см/сек², то для здания без PMC максимальная величина ускорения на крыше здания составляет 840 см/сек², а для здания с PMC 144,6 см/сек².

Важной характеристикой эффективности системы сейсмозащиты является степень ослабления напряжений в элементах конструкции здания, возникающих при землетрясениях. На рисунках 17, 18 приведены зависимости продольной силы и изгибающего момента в наиболее нагруженных элементах конструкции для двух моделей здания.

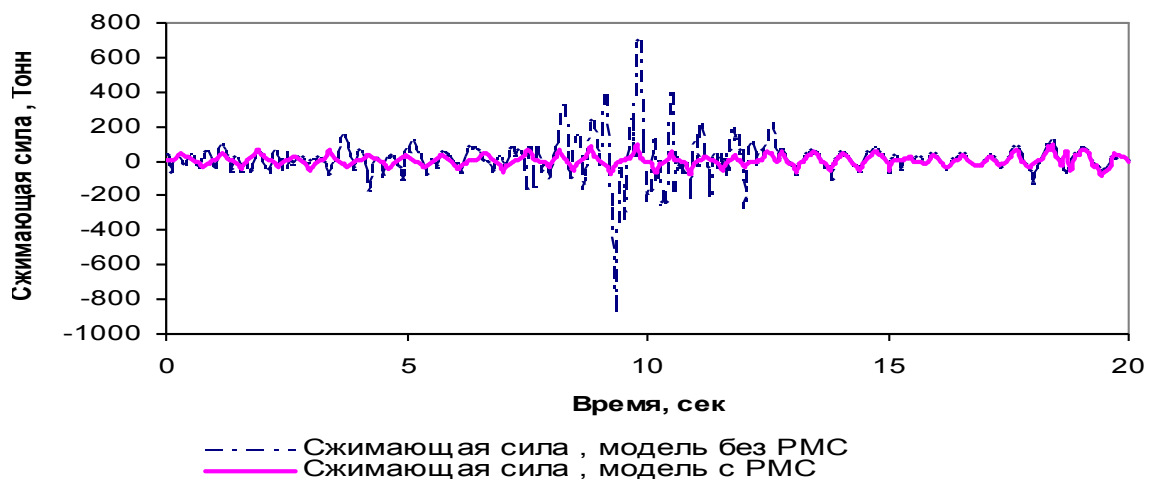


Рис.17. Временные зависимости продольной силы для элемента (Frame) 139

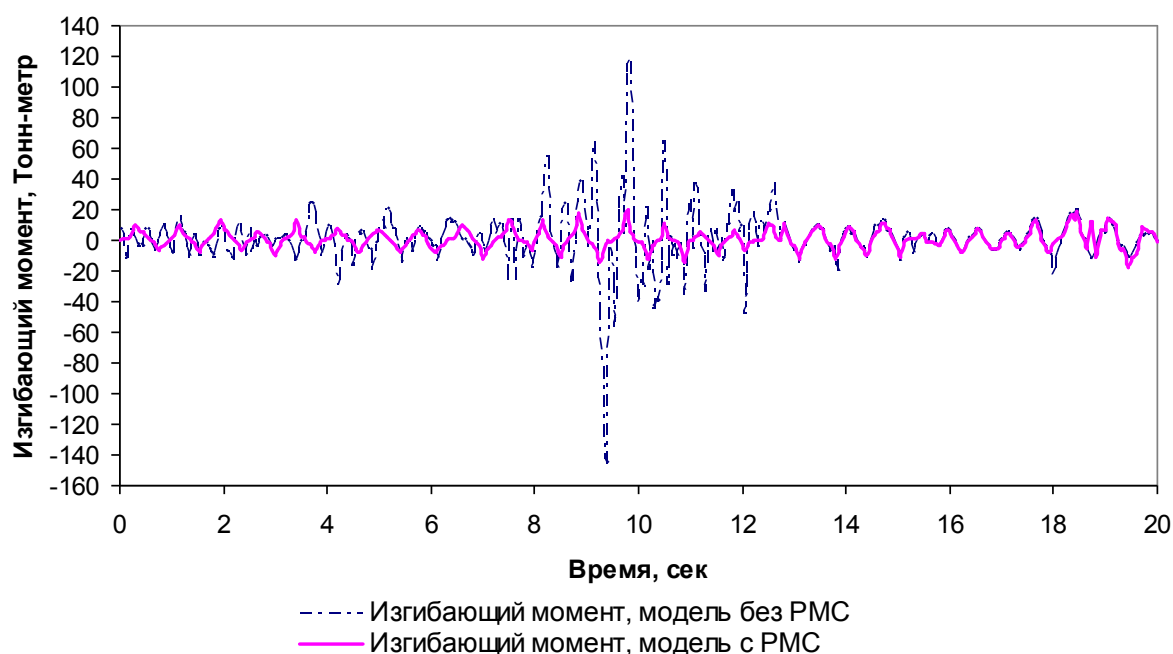


Рис.18. Временные зависимости изгибающего момента для элемента (Frame) 139

Как видно из приведенных результатов, система защиты обеспечивает значительное ослабление напряжений. Величина продольной силы для одного из элементов сейсмоизолированного здания (рис.18) уменьшается более чем в 5 раз (по сравнению с продольной силой в том же элементе здания без сейсмической защиты), а величина изгибающего момента - в 4 раза, что эквивалентно снижению балльности района на 2-3 балла. Отметим, что напряжения, возникающие в здании без защиты, являются большими. Для защищенного здания нагрузки также достаточно велики, но не превышают допустимых величин.

Анализ приведенных результатов для ускорений и напряжений свидетельствует об эффективности сейсмозащиты в приведенном примере. Однако из приведенных рисунков видно, что здание продолжает совершать колебания с заметной амплитудой и после действия наиболее интенсивных толчков грунта. Поэтому открытым остается вопрос о выборе оптимальных параметров демпфирования в РМС.

В заключении приведены основные выводы, полученные в диссертационной работе:

1. В 30 областях Вьетнама имеется высокая вероятность возникновения землетрясений интенсивностью 6, 7 баллов по шкале Рихтера. Учитывая неблагоприятные условия территории Вьетнама следует повысить интенсивность ожидаемых землетрясений до 7-9 баллов. Вероятность возникновения сильных землетрясений в г. Ханое также велика, что обусловлено наличием разломов и периодичностью сильных землетрясений раз в 1100 лет.

2. Из анализа европейских, японских и российских документов, регламентирующих расчёты и проектирование сооружений в сейсмических активных районах, следует, что одной из наиболее важных, полезных и широко используемых концеп-

ций в теории и практике расчётов сооружений на сейсмостойкость является концепция спектров ответов.

3. Для разработки эффективных сейсмостойких конструкций в сложных инженерно-геологических условиях Вьетнама необходимо совершенствовать существующие методы защиты конструкции при сейсмических воздействиях. Для условий Ханоя наиболее подходит способ защиты строительных конструкций с применением резинометаллических сейсмоизоляторов.

4. Наибольший вклад в поведение подверженного сейсмическому воздействию здания вносят собственные формы с максимальной энергией. Наиболее нагруженные элементы в статическом случае, испытывают наибольшие нагрузки и при землетрясениях.

5. Сравнение величины жесткости сейсмоизолятора, полученное в работе на основе аналитических зависимостей с результатами выполненной в лаборатории ЦНИИСК серии натурных испытаний экспериментального образца элемента сейсмоизолятора, позволяет применять предлагаемые аналитические решения для расчета сейсмоизолированных зданий.

6. Расчет, проведенный в рамках программы ETABS с моделью резинометаллических сейсмоизоляторов, практически не отличается от аналитического решения. В случае здания без сейсмической защиты, происходит заметное увеличение амплитуды сейсмоускорений в - 3 раза (по сравнению с колебаниями основания), а для здания с резинометаллическими сейсмоизоляторами амплитуда сейсмоускорения заметно уменьшаются в - 2 раза (по сравнению с колебаниями основания). Величина продольной силы одного из элементов сейсмоизолированного здания уменьшается более чем в 5 раз (по сравнению с продольной силой в том же элементе здания без сейсмической защиты), а величина изгибающего момента - в 4 раза.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ле Тхи Тху Хуэн, Мондрус В.Л. Сопоставление сейсмических нагрузок по нормам России, США и Японии. // Научно-техническая конференция по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры/ Сборник докладов / МГСУ. – 2006. – с.24-26.

2. Ле Тхи Тху Хуэн, Мондрус В.Л. Определение частот собственных колебаний зданий, сооружений с учетом влияния арматуры и режимов нагружений. // На всероссийский смотр научных и творческих работ иностранных студентов и аспирантов / Томск. – 2007. – 18с.

3. Ле Тхи Тху Хуэн. Краткое сравнение сейсмических норм Европы, Японии и России. // Вестник МГСУ / Москва. – №4. – 2009. – с.262-265.

4. Мондрус В.Л., Сизов Д. К., Ле Тхи Тху Хуэн. Распространение амплитуд виброускорений в многоэтажном административном здании от действующей линии

метрополитена. Доклад на Двенадцатая Российская конференция пользователей MSC. // Форум пользователей MSC / Сборник докладов / М.:MSC.Software – 2009. – 1 Электр. опт. дис. (DVD-ROM).

5. Мондрус В.Л., Сизов Д. К., Ле Тхи Тху Хуэн. Распределение амплитуд виброускорений в многоэтажном административном здании от источников техногенного происхождения. // Вестник МГСУ / Москва.– №1. – 2010. – с.113-116.

6. Мондрус В.Л., Ле Тхи Тху Хуэн. Определение сейсмической нагрузки на сейсмоизолированное здание, вызванной движением грунта при землетрясениях. // XIX Польско-словацко-российского семинара «Теоретические основы строительства» / Сборник трудов. – 2010. – с.83-88.

7. Мондрус В.Л., Ле Тхи Тху Хуэн. Сейсмическая опасность на территории Вьетнама. Примеры сильных и слабых землетрясений. // Тринадцатая международная межвузовская научно-практическая конференция молодых ученых, докторантов и аспирантов «Строительство - формирование среды жизнедеятельности» / Сборник трудов. – 2010. – с.138-141.

8. Мондрус В.Л., Сизов Д. К., Ле Тхи Тху Хуэн. Снижение уровня сейсмического воздействия при движении грунта основания с использованием сейсмоизоляторов. // Традиционной научно-практической конференции преподавательского состава института Строительства и архитектуры / Сборник докладов / МГСУ. – 2010. – с.225-230.

9. Хасанов Т.М., Сизов Д. К., Ле Тхи Тху Хуэн. Экспериментальное определение жесткости сейсмоизоляторов. // Журнал ПГС / Москва. – №3. – 2010. – с.38-39.