

На правах рукописи

ОСТРОВСКАЯ Надежда Владимировна

**МЕТОД РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ
ПАРАМЕТРОВ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕМПФЕРОВ
В СИСТЕМАХ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ**

Специальность: **05.23.17 – Строительная механика**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Рутман Юрий Лазаревич

Официальные оппоненты: **Индейкин Андрей Викторович**
заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Петербургский
государственный университет путей
сообщения Императора Александра I»,
кафедра «Теоретическая механика»,
заведующий;

Цейтлин Борис Вениаминович
кандидат технических наук, доцент,
АО «Всероссийский научно-
исследовательский институт гидротехники
имени Б.Е. Веденеева» (г. Санкт-Петербург),
лаборатория динамики и сейсмостойкости
сооружений, ведущий научный сотрудник;

Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра
Великого»**

Защита диссертации состоится «31» марта 2016 года в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.03** при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д.4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте www.spbgasu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор

Лидия Никитовна Кондратьева

I ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы. В системах сейсмоизоляции (ССИ) всегда присутствуют диссипативные элементы, рассеивающие энергию, передающуюся на защищаемый объект (ЗО) во время сейсмического воздействия. В качестве диссипативных элементов могут выступать устройства, принцип работы которых основан на вязком либо сухом трении, либо на пластическом деформировании специальных конструкций, например стальных стержней. Последнее является наиболее эффективным способом демпфирования.

Рассеивание энергии в пластических демпферах (ПД) осуществляется за счет возникающих в процессе пластического деформирования гистерезисных петель силовых характеристик ПД. Поэтому важной задачей является расчет этих силовых характеристик, на основе которого можно выбрать оптимальные параметры ПД, а также установить количество циклов, которое способен выдержать демпфер. Оптимизация параметров ПД приводит к минимизации возникающего при землетрясении ущерба, т.е. к существенно меньшим экономическим потерям. Однако, для поиска оптимума в условиях ограниченного при проектировании временного ресурса необходимо наличие физически прозрачных аналитических зависимостей, описывающих силовые диаграммы ПД.

Данная работа посвящена разработке метода аналитического расчета силовых характеристик пластически деформируемых элементов, входящих в состав ПД, метода определения пластического ресурса этих элементов, метода расчета оптимальных параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции.

Степень разработанности темы исследования. Несмотря на то, что пластические демпферы имеют широкое применение в различных технических устройствах, поведение этих устройств в целом исследовано недостаточно.

Начиная с 80-х годов прошлого века, появилось большое число работ, рассматривающих проблему оптимизации параметров ССИ. Этот вопрос исследовали отечественные специалисты: Я.М. Айзенберг, И.У. Альберт, Т.А. Белаш, Г.Д. Давыдова, А.А. Долгая, А.В. Индейкин, И.О. Кузнецова, А.М. Масленников, Ю.Л. Рутман, О.А. Савинов, В.И. Смирнов, А.М. Уздин, Б.В. Цейтлин, а также зарубежные ученые: R.I. Skinner, W.N. Robinson, J.M. Kelly, A.K. Chopra и другие. Однако проблема еще далека от разрешения.

Исследование непосредственно параметров демпфирования, в том числе и пластического, можно найти в трудах итальянского ученого L.M. Moreschi, который использует для описания работы гистерезисного стального устройства «модель Боука-Вена». Данная модель представляет собой сложные дифференциальные зависимости, которые требуют большого количества экспериментальных данных.

Такая же ситуация складывается при рассмотрении работ итальянских инженеров S. Infanti, M.G. Castelliano, G.P. Colato, которые, имея в распоряжении обширную испытательную базу и производство, приводят в

своих статьях численное или экспериментальное обоснование силовых характеристик демпферов.

Расчет стержней с учетом их физической нелинейности рассматривался в работах В.В. Елисеева, В.В. Лалина, Д.П. Голоскокова, Ю.Л. Рутмана.

Если говорить о поиске аналитических методов расчета силовых характеристик, то первые результаты в этом направлении были получены И.Л. Диковичем, но они имели весьма частный характер.

Необходимость учета малоциклового усталости при сейсмостойком проектировании отражена в работах Э. Симборта, S. Cambell, P. Fajfar, E. Cosenza, R. Perera. Однако данные исследования проводились применительно к сейсмостойким зданиям. В настоящей работе рассмотрена проблема возникновения малоциклового усталости у элементов ПД.

Вопрос поиска оптимальных параметров пластических демпферов в системах сейсмоизоляции рассмотрен не достаточно полно, является актуальным и находится в стадии развития.

Цель исследования заключается в разработке методов, алгоритмов и аналитических инструментов для расчета и выбора оптимальных параметров пластических демпферов в системах сейсмоизоляции.

Задачи исследования:

- проанализировать существующие динамические модели, описывающие поведение сейсмоизолированных объектов;
- разработать метод аналитического расчета параметров силовых диаграмм пластически деформируемых стержневых элементов;
- получить силовые диаграммы для элементов различной конфигурации и поперечных сечений;
- разработать метод расчета пластического ресурса пластически деформируемых элементов в условиях циклического нагружения;
- сформулировать критерии для выбора оптимальных параметров демпфирования на основе теории сейсмического риска;
- разработать алгоритм поиска оптимальных параметров для различных постановок задачи (функций цели);
- сопоставить результаты исследований с экспериментальными данными, полученными в ходе натуральных сейсмических испытаний макета здания с системой изоляции маятникового типа.

Объект исследования – пластические демпферы в системах сейсмоизоляции.

Предмет исследования – проектирование и расчет пластических демпферов для оптимальной диссипации энергии в системах сейсмоизоляции.

Научная новизна исследования заключается в достижении следующих конкретных результатов:

1. Установлен критерий оптимизации пластических демпферов в системах сейсмоизоляции: в качестве целевой функции выбран минимум абсолютных ускорений защищаемого объекта, а в качестве ограничений выбраны конструктивно возможные относительные перемещения.

2. Получены аналитические зависимости в безразмерном виде, описывающие силовые характеристики пластически деформируемых элементов. Аналитическая форма определения силовых характеристик позволяет находить оптимальные параметры пластических демпферов в приемлемые для практического проектирования сроки.

3. Разработан метод расчета пластического ресурса демпферных стержней в условиях циклического нагружения, который позволяет определить используемый и утрачиваемый пластический ресурс стержней, а также регулировать эти параметры с помощью варьирования геометрии и количества стержней в пластическом демпфере.

4. Разработан метод определения оптимальных параметров пластических демпферов. Найденные оптимальные параметры позволяют уменьшить сейсмический риск в 1.5–1.8 раза.

5. Разработана методика экспериментальной проверки эффективности применения пластических демпферов на основе натурных испытаний макета здания с системой изоляции маятникового типа, которая позволила подтвердить результаты теоретических исследований.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что полученные аналитические зависимости для определения силовых характеристик ПД являются новыми результатами в теории физически нелинейной стержневой модели. Новыми теоретическими результатами также являются: постановка задачи оптимизации параметров ПД на основе теории сейсмического риска, выбор критериев и ограничений для оптимизационной задачи.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в том, что разработанные аналитические зависимости позволяют проводить эффективный поиск оптимальных параметров ПД. Применение предложенного метода оптимизации параметров ПД уменьшает среднеквадратические значения абсолютных ускорений ЗО в 1.6–2 раза. В работе показано, что необходимый пластический ресурс стержневых ПД можно обеспечить варьированием геометрии и количества стержней.

Методология и методы исследования. В работе использовались современные методы теории упругости и пластичности, строительной механики, теория сейсмостойкости и сейсмического риска, общепринятые допущения сопротивления материалов, методы теории оптимизации.

Положения, выносимые на защиту:

- постановка задачи оптимизации параметров пластических демпферов (критерий и система ограничений) на основе теории сейсмического риска;
- аналитические силовые характеристики пластически деформируемых элементов различной конфигурации и поперечных сечений;
- метод расчета пластического ресурса демпферных стержней в условиях циклического нагружения;
- алгоритм выбора оптимальных параметров пластических демпферов;
- подтверждение теоретических разработок результатами натурных испытаний системы сейсмоизоляции маятникового типа.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК: 05.23.17 – Строительная механика, а именно п. 3 «Аналитические методы расчета сооружений и их элементов», п. 5 «Теория и методы оптимизации сооружений» и п. 7 «Теория и методы расчета сооружений в экстремальных ситуациях (землетрясения, ураганы, взрывы и т.д.)».

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов диссертации подтверждают соответствие результатов аналитического и численного методов расчета, а также сопоставлением с данными, полученными другими авторами. Достоверность разработанных расчетных моделей подтверждается удовлетворительным согласованием с экспериментальными данными.

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

- XXII Международная конференция «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 24–27 сентября 2007;
- IV Межвузовская студенческая научно-учебная конференция «Моделирование явлений в технических и гуманитарных науках», Санкт-Петербург, СПбГМТУ, 5 марта 2008;
- I научная конференция молодых специалистов ОАО «КБСМ», Санкт-Петербург, ОАО «КБСМ», 20 апреля 2009;
- Научно-практический семинар «Расчет сооружений на экстремальные нагрузки», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 13–15 марта 2013;
- XXV Международная конференция «Математическое моделирование в механике деформируемых сред и конструкций. Методы граничных и конечных элементов», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 23–26 сентября 2013;
- IX Всероссийский форум студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновация в технических университетах», Санкт-Петербург, СПбГПУ, 27–30 октября 2015;
- Научно-технический семинар секции строительной механики «Санкт-Петербургского Дома Ученых РАН РФ», Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 10 ноября 2015.

Основные алгоритмы и методики, а также рекомендации по рациональному проектированию и подбору оптимальных параметров пластических демпферов в системах сейсмоизоляции были апробированы при разработке и производстве сейсмозолирующих опор СМ-859: разработчик – ОАО «КБСМ», г. Санкт-Петербург, изготовитель – ОАО «Спец-М», г. Пермь.

Результаты научного исследования были использованы в качестве учебно-методического материала на кафедре «Сопротивления материалов» в ФГБОУ ВПО «СПбГМТУ» и удостоены дипломов «Победитель конкурса на соискание премии Правительства Санкт-Петербурга в области научно-педагогической деятельности»: в 2012 году (диплом № 12025); в 2013 году (диплом № 13018); в 2014 году (диплом № 14022).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 10 печатных работах общим объемом 3.45 п.л., лично автору принадлежат 2.37 п.л., из них 5 статей в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация изложена на 127 страницах печатного текста, состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 140 источников, в том числе 40 – на иностранном языке, и двух приложений. В работе представлено 62 рисунка, 12 таблиц и 95 формул.

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, дана оценка научной и практической значимости полученных результатов.

В первой главе представлен анализ основных средств демпфирования в системах сейсмоизоляции. Проводится обзор публикаций, касающихся аналитического и численного расчета силовых характеристик ПД.

Во второй главе проведен анализ динамической системы «сооружение–сейсмоизоляция». Сформированы исходные данные для нестационарных сейсмических воздействий и параметров силовых характеристик ССИ. Приведены результаты динамических расчетов.

В третьей главе сформулирована общая постановка задачи для нахождения параметрических уравнений силовой диаграммы для криволинейного стержня. В случае прямолинейного стержня все выкладки доведены до конца в аналитическом виде. Получены выражения для силы, прогиба и продольного перемещения для упруго-пластической диаграммы материала в случае стержня с очертанием оси, являющейся частью окружности. Аналогичные зависимости найдены для стержня круглого сечения различной конфигурации.

В четвертой главе предложен алгоритм проектирования параметров ПД в системах сейсмоизоляции с учетом малоциклового усталости. Приведены все этапы определения пластического ресурса демпферных стержней.

В пятой главе сформулированы критерии оптимизации параметров демпфирования систем сейсмоизоляции при стохастической постановке задачи. Установлена связь между задачей оптимизации параметров ПД и теорией сейсмического риска. Даны алгоритмы поиска оптимальных параметров для различных постановок задачи. Рассмотрены линейная и нелинейная модели демпфирования. Приведены примеры расчета.

В шестой главе приведены результаты натурных сейсмических испытаний макета здания с системой сейсмоизоляции маятникового типа на динамические воздействия адекватные нагрузкам при землетрясении. Проведено сопоставление результатов теоретических исследований эффективности пластических демпферов с экспериментальными данными.

В заключении изложены основные итоги выполненного исследования, сделаны предложения о возможных направлениях продолжения исследования.

II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Установлен критерий оптимизации пластических демпферов в системах сейсмоизоляции: в качестве целевой функции выбран минимум абсолютных ускорений защищаемого объекта, а в качестве ограничений выбраны конструктивно возможные относительные перемещения.

Для поиска оптимальных параметров пластических демпферов была сформулирована следующая задача: выбран критерий оптимизации (минимум среднеквадратичных значений абсолютных ускорений ЗО) и система ограничений (максимум относительных перемещений ЗО). Варьируемым параметром являлся линейный коэффициент демпфирования γ или максимальное значение усилия сопротивления пластического демпфера f_T .

Минимизация абсолютных ускорений ЗО проводилась в рамках следующих динамических моделей (нелинейной и линейной):

$$\ddot{u} + 2\gamma_1\omega \cdot \dot{u} + \omega^2 \cdot u + f(u, \dot{u}) = -\ddot{x}(t), \quad (1)$$

$$\ddot{u} + 2\gamma\omega \cdot \dot{u} + \omega^2 \cdot u = -\ddot{x}(t), \quad (2)$$

где x – горизонтальное движение фундамента; u – относительные перемещение ЗО; ω – собственная частота системы (без ПД); γ_1, γ – безразмерные коэффициенты линейного демпфирования; $f(u, \dot{u})$ – приведенное к единичной массе усилие сопротивления ПД.

Применительно к этим моделям постановка задачи имеет вид:

$$\text{целевая функция } \min_{\gamma} a \text{ – для линейной модели,} \quad (3a)$$

$$\text{целевая функция } \min_f a \text{ – для нелинейной модели,} \quad (3б)$$

где $a = \max_t |\ddot{u}(t) + \ddot{x}(t)|$ – максимальные абсолютные ускорения ЗО, при этом ограничения определялись максимальными относительными смещениями ЗО.

Для качественной иллюстрации оптимального демпфирования к линейной модели (2) была приложена двухчастотная нагрузка:

$$\ddot{x}(t) = A_H \sin(2\pi \cdot f_H \cdot t) + A_B \sin(2\pi \cdot f_B \cdot t), \quad (4)$$

где f_H, f_B – значения частот низкочастотной и высокочастотной составляющих нагрузки соответственно; A_H, A_B – значения амплитуд (рисунок 1).

Полученная в результате зависимость максимальных абсолютных ускорений a от линейного коэффициента демпфирования γ , показывает, что оптимальное демпфирование существует (рисунок 2).

Нелинейность модели обусловлена силовыми характеристиками ПД, входящими в состав ССИ. Рассматривались конструкции ССИ, в которых демпфирование осуществляется пластическим деформированием прямолинейных и криволинейных стержней. Упругопластическая силовая характеристика этих стержней аппроксимировалась билинейной функцией с учетом разгрузки по принципу Мазинга.

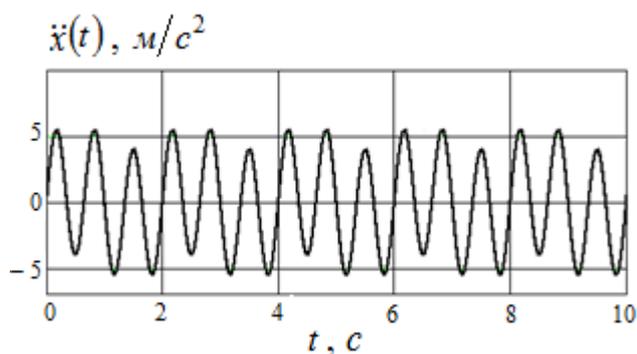


Рисунок 1 – Двухчастотное воздействие
 $\omega = 0.4 \text{ Гц}$, $A_B/A_H = 5$,
 $f_B = 1.5 \text{ Гц}$, $f_H = 0.5 \text{ Гц}$

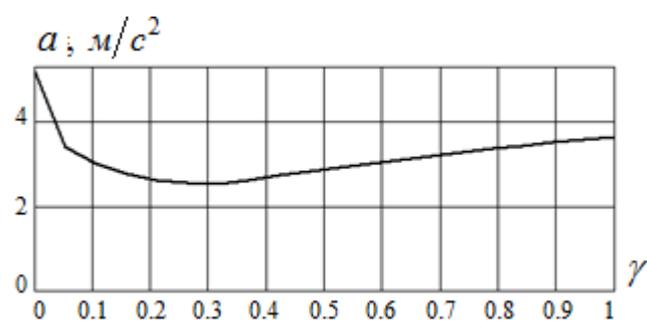


Рисунок 2 – Зависимость абсолютных ускорений от коэффициента демпфирования

Численное решение нелинейной модели (1), возбужденной нестационарными сейсмическими воздействиями (рисунок 3), реализовывалось с помощью специально разработанной программы в математическом пакете «MathCad». Для поиска оптимальных параметров ПД осуществлялось варьирование геометрии, диаметра стержней и их количества. Анализ силовых характеристик проводился с помощью конечно-элементного моделирования в ПК «ANSYS» с учетом упругопластических свойств материала.

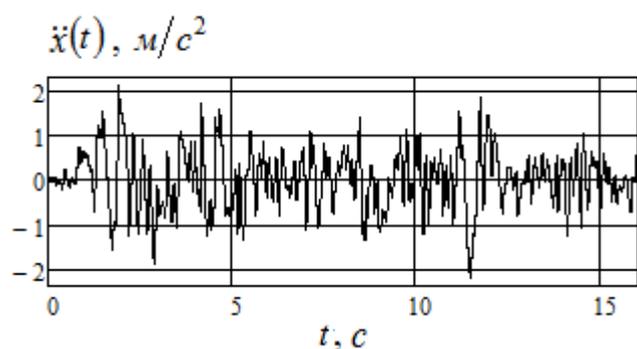


Рисунок 3 – Нестационарное сейсмическое воздействие

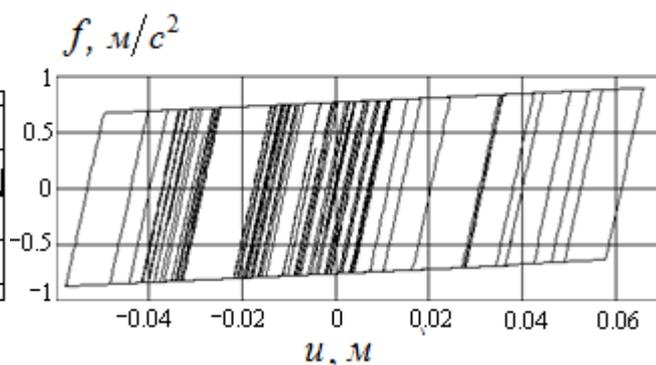


Рисунок 4 – Зависимость сопротивления ПД $f(u, \dot{u})$ от перемещений

Выполненная серия расчетов позволили сделать следующие выводы:

- оптимум параметров пластического демпфера существует, но реализовать его с помощью конечно-элементных расчетов в проектных условиях чрезвычайно сложно и трудоемко;
- возникает необходимость разработки специальной методики для отыскания аналитических зависимостей силовых характеристик демпфера;
- полученные зависимости сопротивления демпфера от перемещений (рисунок 4) показывают, что деформирование происходит циклически и при выборе оптимальных параметров следует учесть возможность возникновения малоциклового усталости.

2. Получены аналитические зависимости в безразмерном виде, описывающие силовые характеристики пластически деформируемых элементов. Аналитическая форма определения силовых характеристик позволяет находить оптимальные параметры пластических демпферов в приемлемые для практического проектирования сроки.

При разработке аналитических методов расчета силовых характеристик ПД были рассмотрены следующие расчетные схемы (рисунок 5, 6).

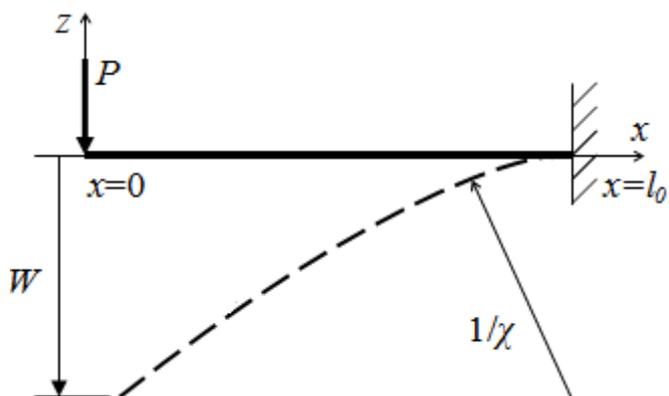


Рисунок 5 – Нагруженный краевой силой прямолинейный стержень

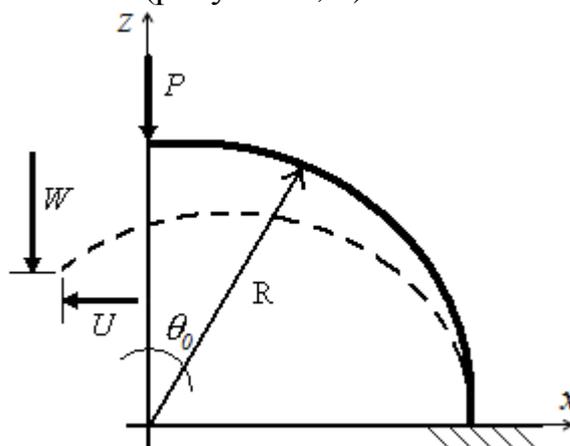


Рисунок 6 – Стержень с осью, являющейся частью окружности

На рисунках 5,6 обозначено:

x, z – продольная и поперечная координаты; l_0 – длина консоли; R – радиус окружности; θ_0 – угол раствора окружности; P – внешняя сила; $\chi(x)$ – кривизна; W – прогиб под силой; U – продольное перемещение под силой.

В результате решения задачи плоского изгиба были получены следующие параметрические соотношения для силы и прогиба на конце:

$$p(t) = \Phi(t), \quad w(t) = t - \frac{1}{\Phi^2(t)} \int_0^t \Phi^2(\tau) d\tau, \quad (5)$$

где $p(t)$ – безразмерная сила; $w(t)$ – безразмерный прогиб;

$\Phi(\tau) \equiv \frac{1}{\tau^2} \int_0^\tau f(\tau_1) \beta\left(\frac{\tau_1}{\tau}\right) \tau_1 d\tau_1$ – интегральная функция закона состояния,

описывающая изгибающий момент в сечении; $f(\tau_1)$ – закон состояния материала; $\beta(\tau_1)$ – закон изменения ширины двояко-симметричного сечения;

$\tau_1 \equiv \frac{\chi y}{\varepsilon_T}$; $\tau \equiv \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_T} \equiv \frac{\chi y_{\max}}{\varepsilon_T}$; $\tau|_{x=l_0} \equiv t$; y – вертикальная координата точек сечения;

ε – продольная деформация; $\varepsilon_T \equiv \frac{\sigma_T}{E}$ – деформация текучести; E – модуль упругости; σ_T – предел текучести.

Упругопластическая диаграмма материала может быть аппроксимирована полиномиальной функцией:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_T, \\ \sigma_T + E \left(a_1(\varepsilon - \varepsilon_T) - \frac{a_2}{\varepsilon_T}(\varepsilon - \varepsilon_T)^2 + \frac{a_3}{\varepsilon_T^2}(\varepsilon - \varepsilon_T)^3 \right), & \varepsilon_T \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max}, \end{cases} \quad (6)$$

при этом:

$$f(\tau) = \begin{cases} \tau, & 0 \leq \tau \leq 1, \\ 1 + a_1(\tau - 1) - a_2(\tau - 1)^2 + a_3(\tau - 1)^3, & 1 \leq \tau \leq \tau_{\max}. \end{cases} \quad (7)$$

При постоянной ширине $\beta = 1$ интегральная функция закона состояния представляется формулой:

$$\Phi(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{3}\tau, & 0 \leq \tau \leq 1, \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{6\tau^2} + \frac{a_1(2\tau + 1)(\tau - 1)^2}{6\tau^2} - \frac{a_2(3\tau + 1)(\tau - 1)^3}{12\tau^2} + \\ + \frac{a_3(4\tau + 1)(\tau - 1)^4}{20\tau^2}, & 1 \leq \tau \leq \tau_{\max} \end{cases}. \quad (8)$$

Для круглого сечения, согласно закону изменения ширины – $\beta = \sqrt{1 - \xi^2}$, где $\xi = \frac{y}{r}$, r – радиус сечения, интегральная функция закона состояния преобразуется к следующему виду:

$$\Phi(\tau) = \begin{cases} \frac{\pi}{16}\tau, & 0 \leq \tau \leq 1, \\ \left(\frac{1}{24} + a_1 \left[\frac{\pi}{16}\tau - \frac{1}{24} \right] \right) \left(3\tau \arcsin\left(\frac{1}{\tau}\right) + \frac{(5\tau^2 - 2)\sqrt{\tau^2 - 1}}{\tau^3} \right) + \\ + a_2 \left[\frac{\pi}{8}\tau - \frac{\tau}{4} \arcsin\left(\frac{1}{\tau}\right) - \frac{8\tau^4 + 9\tau^2 - 2}{60\tau^3} \right] + \\ + a_3 \left[\left(\frac{\pi}{32}\tau - \frac{\tau}{16} \arcsin\left(\frac{1}{\tau}\right) \right) (\tau^2 + 6) - \frac{81\tau^4 + 28\tau^2 - 4}{240\tau^3} \right], & 1 \leq \tau \leq \tau_{\max}. \end{cases} \quad (9)$$

После аналитического задания $\Phi(\tau)$ дальнейшие построения в общем случае сводятся к графическому переходу от параметрических зависимостей к явной диаграмме «сила–прогиб».

В случае упруго-пластической диаграммы с линейным упрочнением $a_1 \equiv a = \frac{H}{E}$ ($0 < a < 1$), при $\tau, t \geq 1$ получаем:

а) для прямоугольного сечения

$$p(t) = \frac{(3t^2 - 1) + a(2t + 1)(t - 1)^2}{6t^2}, \quad (10)$$

$$w(t) = \frac{2t \left(4a^2 t^6 + 9a(1-a)t^5 + (20 - 21a + 6a \ln t)(1-a)t^3 - (1-a)^2(18t^2 - 2) \right)}{3 \left(4a^2 t^6 + 12a(1-a)t^5 + (1-a)^2(9t^4 - 6t^2 + 1) - 4a(1-a)t^3 \right)}.$$

Качественно диаграмма для упругопластической силовой характеристики и соответствующая диаграмма материала представлены на рисунках 7, 8.

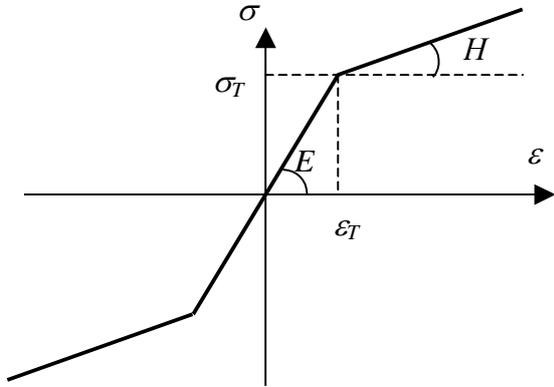


Рисунок 7 – Диаграмма материала « $\sigma - \epsilon$ »

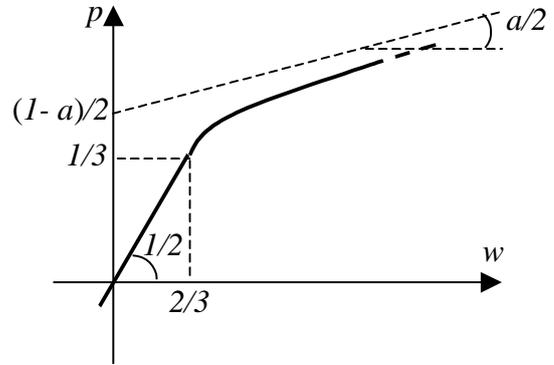


Рисунок 8 – Диаграмма « $p - w$ » для прямолинейного стержня

б) для круглого сечения

$$p(t) = \frac{\pi}{16} at + \frac{1-a}{24} \left(3t \arcsin\left(\frac{1}{t}\right) + \frac{(5t^2 - 2)\sqrt{t^2 - 1}}{t^3} \right), \quad (11)$$

$$w(t) = t - \frac{1}{\left[\frac{\pi}{16} at + \frac{1-a}{24} \left(3t \arcsin\left(\frac{1}{t}\right) + \frac{(5t^2 - 2)\sqrt{t^2 - 1}}{t^3} \right) \right]^2} \times \left[\int_0^1 \left(\frac{\pi}{16} \tau \right)^2 d\tau + \int_1^t \left[\frac{\pi}{16} a\tau + \frac{1-a}{24} \left(3\tau \arcsin\left(\frac{1}{\tau}\right) + \frac{(5\tau^2 - 2)\sqrt{\tau^2 - 1}}{\tau^3} \right) \right]^2 d\tau \right].$$

Выражения для силы, прогиба и продольного перемещения, полученные для стержня прямоугольного сечения с осью, которая является частью окружности:

$$p(t) = \frac{at}{3} + \frac{1-a}{2} \left(1 - \frac{1}{3t^2} \right), \quad (12)$$

$$w(t) = \frac{2}{p^2} \int_1^t \frac{\left(\frac{a\tau}{3} + \frac{1-a}{2} \left(1 - \frac{1}{3\tau^2} \right) \right) \left(\frac{a\tau}{3} + \frac{1-a}{2} \right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\frac{a\tau}{3} + \frac{1-a}{2} \left(1 - \frac{1}{3\tau^2} \right)}{\frac{p}{\sin \theta_0}} \right)^2}} d\tau + w_p,$$

$$w_p \equiv \frac{3p}{\sin^3 \theta_0} \left(\arcsin \left(\frac{\sin \theta_0}{3p} \right) - \frac{1}{2} \sin 2 \left(\arcsin \left(\frac{\sin \theta_0}{3p} \right) \right) \right),$$

$$u(t) = \frac{2}{p \sin \theta_0} \left[\int_1^t \frac{\left(\frac{a\tau + 1 - a}{3} + \frac{1 - a}{3\tau^2} \right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\frac{a\tau + 1 - a}{3} + \frac{1 - a}{2} \left(1 - \frac{1}{3\tau^2} \right) \right)^2 \frac{p}{\sin \theta_0}}} d\tau - \int_1^t \left(\frac{a\tau}{3} + \frac{1 - a}{3\tau^2} \right) d\tau \right] + u_p,$$

$$u_p \equiv \frac{3p}{\sin^3 \theta_0} \left(\cos \left(\arcsin \left(\frac{\sin \theta_0}{3p} \right) \right) - 1 \right)^2.$$

При предельном переходе ($\theta_0 \rightarrow \pi \Rightarrow \sin \theta_0 \rightarrow 0$) – продольное перемещение $u(t) \rightarrow 0$, а выражения для силы и прогиба (12) дают решение (10) для прямолинейного стержня.

Сравнение результатов аналитического расчета с конечно-элементным дает расхождение для геометрически линейной постановки задачи менее 1% (рисунок 9).

Для определения диаграммы в безразмерном виде достаточно задать значение коэффициента упрочнения a (рисунок 10).

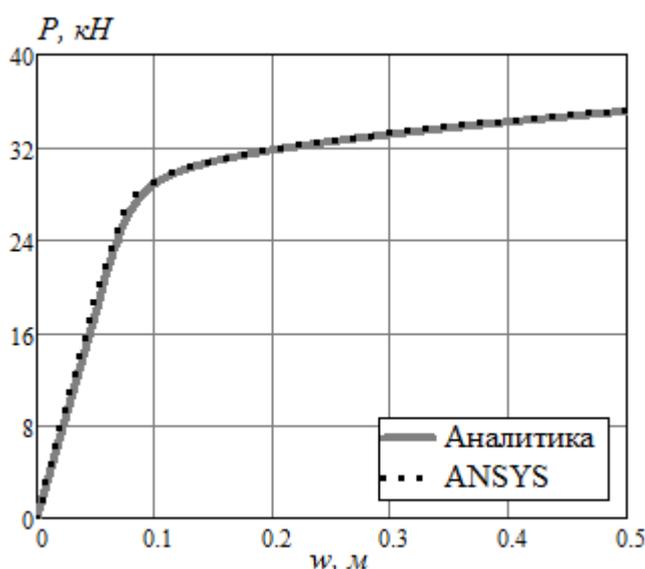


Рисунок 9 – Диаграмма сила-прогиб для прямолинейного стержня круглого сечения

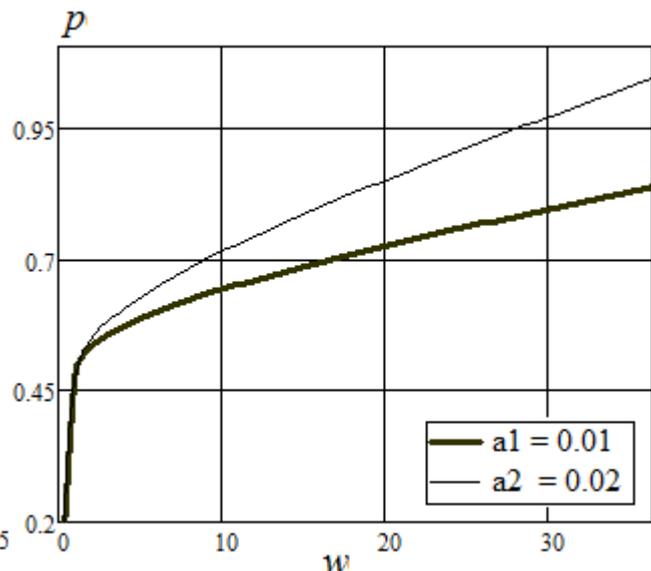


Рисунок 10 – Безразмерная диаграмма прямолинейного стержня для различных коэффициентов a

В размерном виде выражения (10), варьируя геометрией стержней, например, длиной l (рисунок 11) или соотношением b/h , при $h=0.05$ м (рисунок 12), позволяют добиться желаемого уровня срабатывания, а также наклона участка в пластической стадии работы стержня.

Формулы (12) были получены в 2007 г. [6] и в дальнейшем широко использовались при расчете параметров арматурных стержней в работах В.И. Плетнёва, О.В. Голых, Л.Н. Кондратьевой, С.Т. Нгуиена, Х.Х. Нгуена.

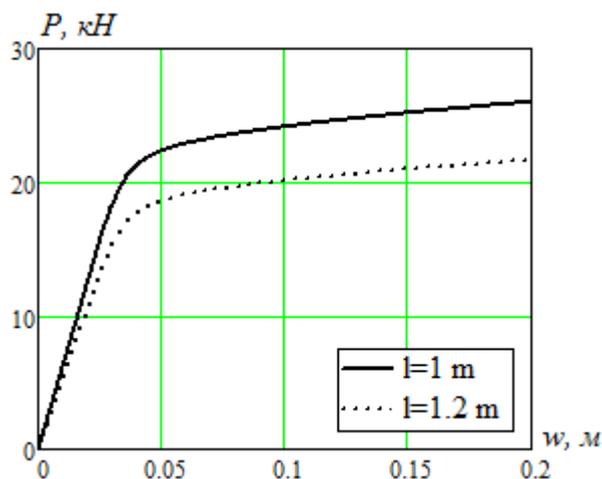


Рисунок 11 – Размерная силовая диаграмма прямолинейного стержня для различных значений длины l

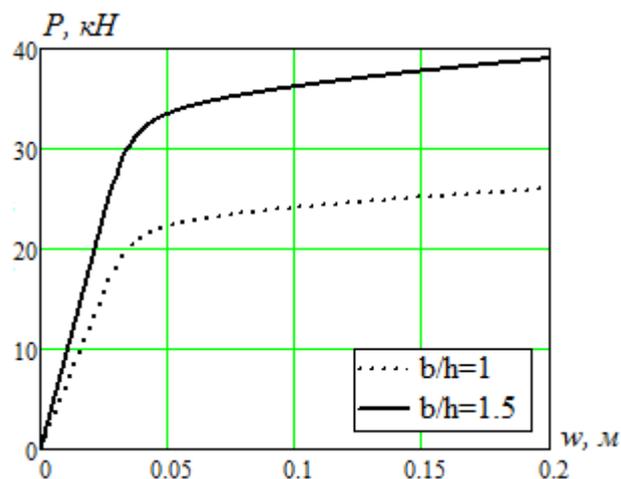


Рисунок 12 – Размерная силовая диаграмма прямолинейного стержня для различных соотношений b/h

3. Разработан метод расчета пластического ресурса демпферных стержней в условиях циклического нагружения, который позволяет определить используемый и утрачиваемый пластический ресурс стержней, а также регулировать эти параметры с помощью варьирования геометрии и количества стержней в пластическом демпфере.

При сейсмическом воздействии на конструкцию возникает циклическое нагружение демпферных стержней, при этом они работают в упругопластической зоне, то есть становится актуальной проблема малоциклового усталости стержней. Разработанный метод определения пластического ресурса состоит из следующих этапов:

- решение динамической задачи и определение числа циклов нагружения;
- распределение числа циклов нагружения с различным уровнем перемещений;
- переход от перемещений к максимальным деформациям;
- по имеющимся критериям (формула Коффина-Менсона и правило Палмгрема-Майнера) установление допускаемого числа циклов и пластического ресурса стержня.

Решение динамической задачи дает картину циклического нагружения стержней, входящих в ПД, с различной амплитудой перемещений (рисунок 13).

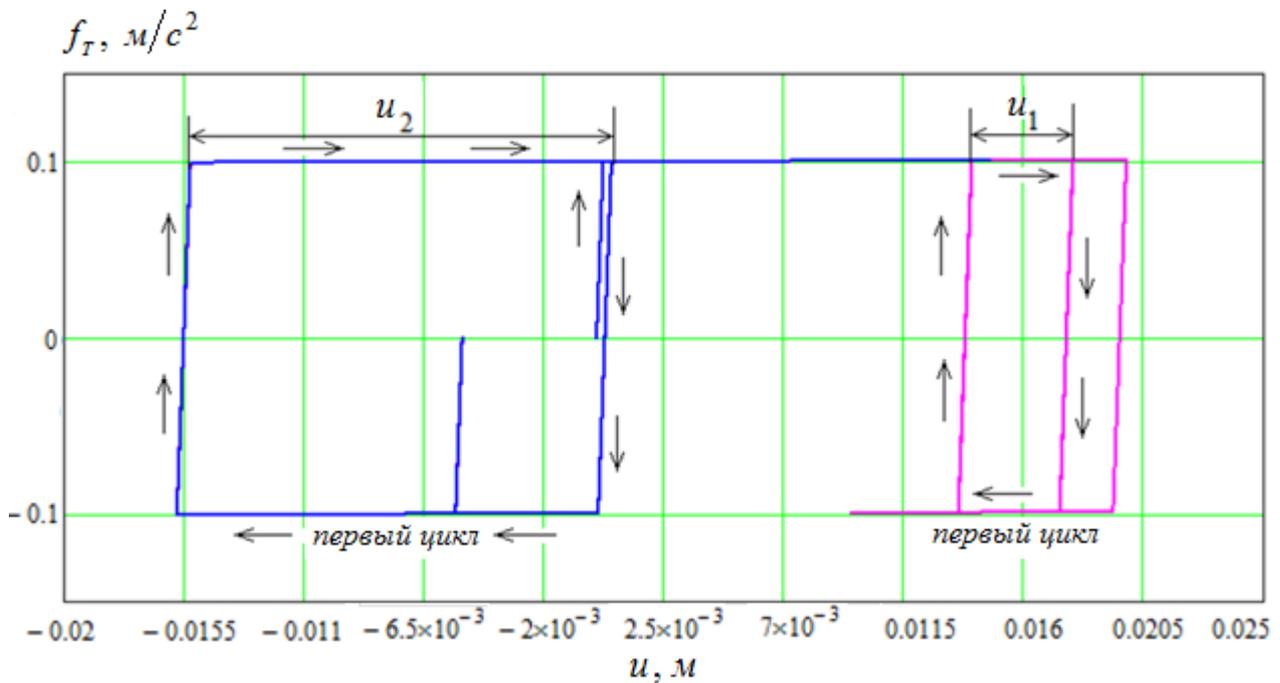


Рисунок 13 – Пример определения циклов нагружения с различной амплитудой по перемещению

Переход от перемещений к максимальным деформациям осуществляется с помощью полученных ранее параметрических зависимостей $p(t)$ и $w(t)$ для консольных стержней различной конфигурации и поперечных сечений.

Для каждого перемещения u_i (считаем его равным прогибу консольного конца стержня w_i) определяем параметр t_i , который связан с деформацией стержня в крайних волокнах сечения следующим соотношением: $\varepsilon = t \cdot \varepsilon_T$.

Определение допускаемого числа циклов и пластического ресурса стержня было сделано по методике, предложенной Э. Симбортом, где используется критерий малоциклового прочностности, основанный на линейном суммировании усталостных d_c и квазистатических d_s повреждений.

В качестве примера в диссертации был рассмотрен пластический демпфер, состоящий из 20 прямолинейных стержней, усилие срабатывания которых должно быть равно 1 т. Исходя из данного условия $p_T = 1$ т для каждого стержня с помощью метода, описанного выше, были подобраны:

- высота стержня – 1.1 м;
- сечение стержня – круглое, диаметром 60 мм;
- материал стержней – 01X18Н9Т со следующими механическими характеристиками: $\sigma_T = 288$ МПа, $\varepsilon_e = 50$ %, $\psi = 75.2$ %, $E = 2 \cdot 10^5$ МПа.

Для перехода от перемещений к максимальным деформациям были использованы параметрические зависимости для стержней круглого сечения (11), в которых коэффициент упрочнения принят $a = 0.01$.

Результаты расчета показали, что используемый пластический ресурс стержней в рассмотренном демпфере составил 80 %, а утрачиваемый 20 %.

Дальнейший численный анализ показал, что уменьшение диаметра стержней с 60 до 50 мм приводит к уменьшению утрачиваемого пластического ресурса на 1–2 %. Однако, чтобы сохранить оптимальное значение силы p_T , при уменьшении толщины стержней увеличивается их количество.

4. Разработан метод определения оптимальных параметров пластических демпферов. Найденные оптимальные параметры позволяют уменьшить сейсмический риск в 1.5–1.8 раза.

При формулировке целевых функций была использована теория сейсмического риска, предложенная В.В. Болотиным. Согласно этой теории сейсмический риск зависит от абсолютных ускорений системы, уменьшение которых приводит к уменьшению сейсмического риска. На основе этих рассуждений целевые функции были сформулированы следующим образом:

1. Для нелинейной модели (1) целевая функция:

$$\min_{\gamma} \max_i |\ddot{u}(t) + \ddot{x}(t)|, \quad (13)$$

$\max_i |\ddot{u}(t) + \ddot{x}(t)|$ – усредненные по i абсолютные ускорения ЗО (оценка математического ожидания); i – номер реализации внешнего воздействия в репрезентативной выборке этих воздействий.

2. Для линейной модели (2) целевая функция:

$$\min_{\gamma} \sqrt{D}, \quad (14)$$

где D – дисперсия абсолютных ускорений ЗО. Изменение абсолютных ускорений ЗО во времени считается стационарным эргодическим процессом.

Для всех целевых функций принято следующее ограничение:

$$u = \max_t |u_i(t)| \leq h, \quad (15)$$

где h – максимально возможные по конструктивным соображениям перемещения ЗО относительно фундамента (за счет работы ССИ).

В качестве потока событий, подаваемого в правую часть уравнений движения, методом статистического моделирования был получен пакет искусственных акселерограмм объемом $N = 300$. На основе анализа карт сейсмического районирования было принято следующие осреднение: на 300 воздействий приходится 10 сильных (9 баллов), 40 средних (8 баллов) и 250 слабых (6-7 баллов) землетрясений. Параметры синтезируемых акселерограмм соответствуют району г. Сочи.

На каждую синтезированную акселерограмму пакета проводился расчет сейсмоизолированной системы с частотой 0.4 Гц. Для линейной модели (2) варьировался коэффициент линейного демпфирования γ от 0 до 1. Для нелинейной модели (1) без учета линейного демпфирования зависимость $f(u, \dot{u})$ аппроксимировалась билинейной диаграммой с фиксированными параметрами $\omega_1 = 20$ и $\omega_2 = 0.2$, и варьировался параметр f_T от 0 до 0.3 м/с².

В результате расчетов на 300 акселерограмм были получены смещения и ускорения при разных значениях γ и f_T . Поиск оптимального демпфирования

осуществлялся через определение отклика системы с последующим осреднением (14). Согласно расчетам оптимальный коэффициент линейного демпфирования существует и равен 0.1 (рисунок 14, 15).

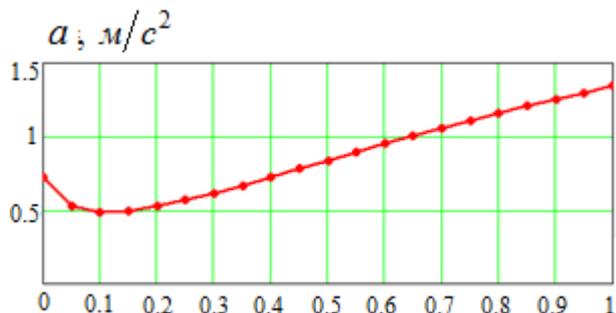


Рисунок 14 – Результаты расчетов по линейной модели

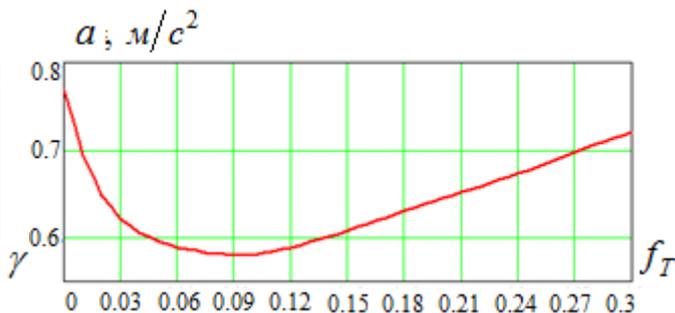


Рисунок 15 – Результаты расчетов по нелинейной модели

Была рассмотрена и другая постановка задачи оптимизации – (15). Она заключается в определении спектральной плотности процесса, который считается эргодичным и стационарным.

В этом случае: целевая функция – $\min_{\gamma} \tilde{a}$, где $\tilde{a} = \sqrt{D}$ – среднеквадратическое значение абсолютных ускорений ЗО:

$$D = \int_0^{\infty} S_{\ddot{a}}(\omega) d\omega, \quad (16)$$

где $S_{\ddot{a}}(\omega)$ – спектральная плотность абсолютных ускорений:

$$S_{\ddot{a}}(\omega) = H(\omega) S_{\ddot{x}}(\omega), \quad (17)$$

где $H(\omega)$ – передаточная функция; $S_{\ddot{x}}(\omega)$ – спектральная плотность ускорений грунта на входе.

В случае перехода от ускорений основания к абсолютным ускорениям ЗО передаточная функция имеет следующий вид:

$$H(\omega) = \frac{\sqrt{1 + \frac{(4 \cdot \gamma^2 \cdot \omega)^2}{\omega^2}}}{\sqrt{\left[1 - \frac{\omega^2}{\omega^2}\right]^2 + \frac{4 \cdot \gamma^2 \cdot \omega^2}{\omega^2}}}, \quad (18)$$

Определенные трудности возникают при оперировании реальными акселерограммами. Если имеется набор из N реализаций $x_k(t)$, $(k-1)T \leq t \leq kT$, $k=1,2,\dots,N$, стационарного эргодического случайного процесса $\{x(t)\}$, то оценка спектральной плотности имеет вид:

$$S_{\ddot{x}}(f) = \frac{2}{N \cdot T} \sum_{k=1}^N |X_k(f, T)|^2, \quad (19)$$

где T – длина каждого процесса, $X_k(f, T)$ – финитное преобразования Фурье для k – той реализаций:
$$X_k(f, T) = \int_0^T x_k(t) \cdot e^{-j2\pi \cdot f \cdot t} dt.$$

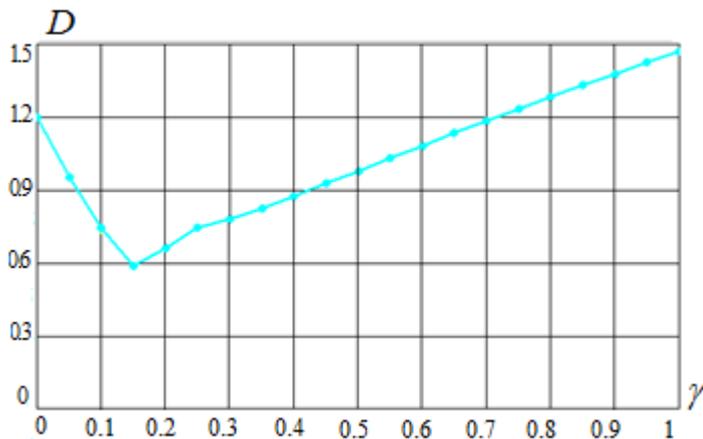


Рисунок 16 – Зависимость дисперсии процесса от коэффициента демпфирования

Финитное преобразование Фурье применительно к реализации сейсмического воздействия было найдено с помощью математического пакета «MathCad».

Далее последовательно используются формулы (16) – (19).

В результате варьирования коэффициента демпфирования γ от 0 до 1 получаем следующую зависимость дисперсии процесса от коэффициента демпфирования (рисунок 16).

5. Разработана методика экспериментальной проверки эффективности применения пластических демпферов на основе натуральных испытаний макета здания с системой изоляции маятникового типа, которая позволила подтвердить результаты теоретических исследований.

Испытания макета здания с сейсмоопорами маятникового типа, разработанными ОАО «КБСМ», проводились на динамические воздействия адекватные нагрузкам при землетрясении интенсивностью до 9 баллов (рисунок 17). Верхнее строение макета имитировалось гибкой конструкцией, выполненной из металлических элементов с размерами 4.6 на 3.7 м и высотой 6.815 м, с общей массой ~ 40 т, и было установлено на систему опорно-маятниковой сейсмоизоляции, состоящей из трех сейсмоопор, в состав каждой входят – маятниковые тяги и пластический демпфер.

Для интерпретации результатов на рисунке 18 приведена схема нумерации и расположения датчиков при проведении опытов. На схеме обозначены датчики ускорений с индексом А и перемещений с индексом Р.

Для проверки эффективности работы пластических демпферов помимо основных испытаний были выполнены следующие опыты:

- первый с опорами, оснащенными пластическими демпферами;
- во втором опыте пластические демпферы были выключены из работы.

Согласно результатам испытаний процесс относительного горизонтального движения верхнего строения имеет вид быстро затухающих под влиянием упругопластических демпферов колебаний. Результаты эксперимента по характерным ускорениям и перемещениям для системы с пластическими демпферами и без сведены в таблицу 1.

Для сравнения экспериментальных данных с расчетным был проведен динамический анализ нелинейной модели (1) без учета вязкого трения со следующими параметрами: частота системы – 0.4 Гц; параметры пластического демпфера: $f_T = 0.1$, $\omega_1 = 42$, $\omega_2 = 0.85$.

В качестве внешнего воздействия $\ddot{x}(t)$ были взяты ускорения основания сейсмоплатформы, на основе записанных с датчика A189 горизонтальных ускорений. Результаты динамических расчетов представлены на рисунке 19.



Рисунок 17 – Вид сейсмоплатформы с макетом сейсмоизолированного здания
1

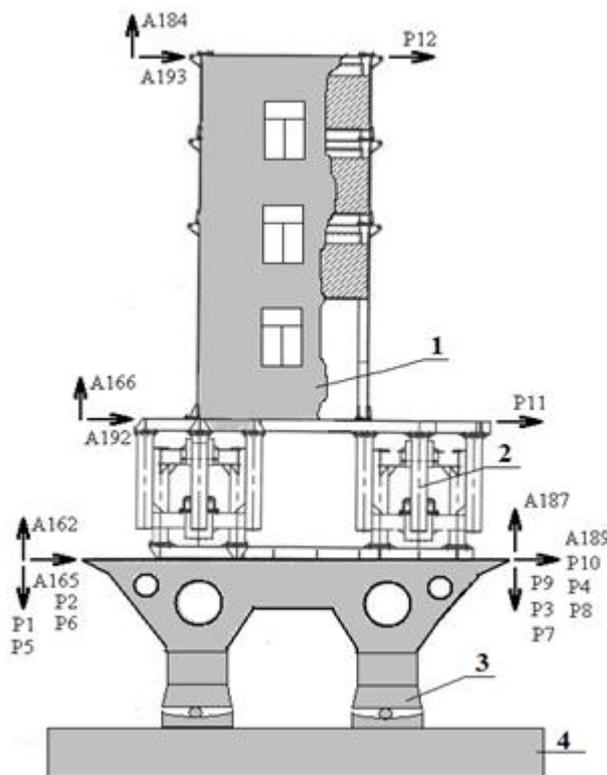


Рисунок 18 – Схема нумерации датчиков при проведении опытов:
1 – макет здания; 2 – блок сейсмоопор;
3 – платформа стенда; 4 – основание

Таблица 1 – Результаты эксперимента

№ датчика	максимальное значение внешнего воздействия	максимальное абсолютное ускорение системы		максимальное относительное перемещение системы	
	$ \ddot{x}_{\max} , м/с^2$	$ \ddot{u}_{\max} , м/с^2$		$ u_{\max} , мм$	
	A189	A192	A193	P11	P12
с ПД	8.149	4.77	4.406	59	110
без ПД	7.959	6.918	4.359	67	113

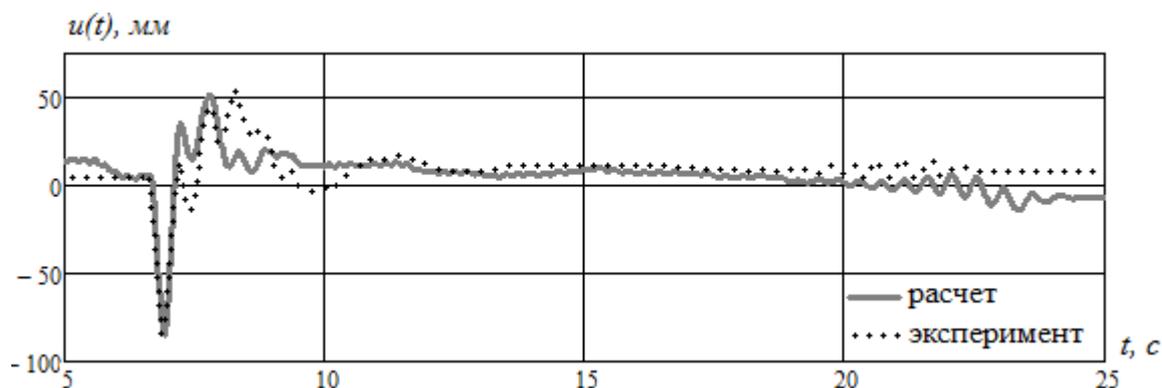


Рисунок 19 – Относительные перемещения по расчету и эксперименту

III ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По итогам работы над диссертацией получены следующие результаты:

1. Анализ результатов динамических расчетов системы «сооружение–сейсмоизоляция» показал:

- оптимум параметров демпфирования существует, но реализовать его с помощью конечно-элементных расчетов в проектных условиях чрезвычайно сложно и трудоемко;
- деформирование ПД происходит циклически и при выборе оптимальных параметров следует учесть возможность малоциклового усталости.

2. Разработан метод аналитического расчета силовых характеристик для криволинейного физически нелинейного статически определимого стержневого элемента и получены параметрические зависимости силовых характеристик в интегральной форме. Получены результаты для прямолинейного элемента, а также для элемента с осью, являющейся частью окружности, в случае прямоугольного и круглого поперечного сечения.

3. Анализ полученных численных значений аналитического решения, показал:

- силовые диаграммы определяются через безразмерные параметры, что избавляет от необходимости проведения сложных многочисленных расчетов с помощью программных комплексов;
- выбор параметров демпфирующих элементов становится физически прозрачным.

4. Разработана методика определения пластического ресурса демпферных стержней в условиях циклического нагружения при сейсмическом воздействии. Численный анализ показал, что необходимый пластический ресурс можно обеспечить варьированием геометрии и количества стержней.

5. Разработан метод оптимизации параметров демпфирования на основе теории сейсмического риска. Численный анализ показал, что оптимизация позволяет уменьшить критериальный параметр в 1.6–2 раза.

6. Разработана методика экспериментальной проверки эффективности применения пластических демпферов на основе натуральных испытаний макета здания с системой изоляции маятникового типа.

7. При сопоставлении результатов теоретических исследований применения системы сейсмоизоляции с пластическими демпферами с экспериментальными данными наблюдается удовлетворительное совпадение расчета с опытом.

Рекомендации к практическому применению:

Полученные в диссертации решения могут быть использованы при проектировании пластических демпферов в системах сейсмоизоляции различного назначения и конструкции. Полученная методика аналитического определения силовых диаграмм пластически деформируемых элементов может быть применена в различных моделях.

**IV ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ
ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:**

**Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией
Министерства образования и науки Российской Федерации.**

1. **Ковалева, Н.В.** Оценка эффективности параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции [Текст] / Н.В. Ковалева, Ю.Л. Рутман // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 1(27). – С. 37–43 (0.375 / 0.1875 п.л.).
2. **Ковалева, Н.В.** Определение оптимальных параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции [Текст] / Н.В. Ковалева, Ю.Л. Рутман, Г.В. Давыдова // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 5(40). – С. 107–115 (0.5 / 0.16 п.л.).
3. **Ковалева, Н.В.** Учет малоциклового усталости при оптимизации параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции [Текст] / Н.В. Ковалева // Инженерно-строительный журнал, Специальный выпуск: Труды конференции «ВЕМ&FEM–2013». – 2013. – № 9(44). – С. 49–55 (0.375 п.л.).
4. **Островская, Н.В.** Анализ основных подходов к проектированию параметров пластического демпфирования в системах сейсмоизоляции [Текст] / Н.В. Островская // Морские интеллектуальные технологии. – 2014. – № 3(24). – С. 61–66 (0.3125 п.л.).
5. **Островская, Н.В.** Определение параметров силовой диаграммы пластически деформируемого криволинейного стержня круглого сечения [Текст] / Н.В. Островская // Вестник гражданский инженеров. – 2015. – № 4(51). – С. 68–73 (0.3125 п.л.).

Публикации в других изданиях:

6. **Ковалева, Н.В.** Определение параметров силовой диаграммы пластически деформируемых элементов конструкции [Текст] / Н.В. Ковалева, В.Р. Скворцов, Ю.Л. Рутман // Сборник «Труды Двадцать второй Международной конференции «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов». – СПб.: Изд-во НИЦ МОРИНТЕХ, 2007. – С. 220–225 (0.3125 / 0.1 п.л.).

7. **Ковалева, Н.В.** Математическое моделирование систем сейсмоизоляции [Текст] / Н.В. Ковалева // Сборник «Труды межвузовской студенческой научно-учебной конференции «Моделирование явлений в технических и гуманитарных науках». – СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2008. – С. 67–70 (0.1875 п.л.).
8. **Ковалева, Н.В.** Аналитическое определение силовой диаграммы упруго-пластических элементов амортизаторов [Текст] / Н.В. Ковалева // Сборник «Труды Первой научной конференции молодых специалистов ОАО «КБСМ», «Военмех. Вестник БГТУ». – № 7. – 2009. – С. 30–34 (0.25 п.л.).
9. Грунин, В.В. Системы сейсмоизоляции гражданских и промышленных зданий и устройств оборудования этих объектов от экстремальных воздействия [Текст] / В.В. Грунин, **Н.В. Ковалева** // Сборник научных докладов Первой Международной научно-практической конференция «Научно-техническое творчество молодежи – путь к обществу, основанному на знаниях». – М.: МГСУ, 2009. – С. 65–70 (0.3125 / 0.15 п.л.).
10. Beliaev, V. Studying support-pendulum seismic isolation system for large NPP equipment [Текст] / V. Beliaev, Yu. Rutman, **N. Kovaleva** // Abstract book of 22nd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology. – 2013. – Reference paper: 423 (0.5 / 0.16 п.л.).