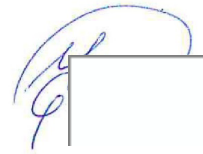


На правах рукописи



НЕСТЕРОВА Ольга Павловна

**ПОДБОР ПАРАМЕТРОВ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ
ДИНАМИЧЕСКИХ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ (ДГК)
СИЛЬНО ДЕМПФИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

Специальность: 05.23.17 – Строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Уздин Александр Моисеевич

Официальные оппоненты: **Абакаров Абакар Джансулаевич,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный
технический университет», кафедра «Архитек-
тура», заведующий;

Фрезе Максим Владимирович,
кандидат технических наук,
АО «Трансмост» (г. Санкт-Петербург), сектор
разработки программных средств, главный
специалист;

Ведущая организация: АО «Научно-исследовательский центр «Стро-
ительство»

Защита диссертации состоится «17» июня 2019 года в 13.30 часов на засе-
дании 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: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строитель-
ный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/nesterova-olga-pavlovna>.

Автореферат разослан «13» мая 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Лидия Никитовна Кондратьева

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Землетрясения приводят к большим человеческим жертвам и экономическим потерям, поэтому антисейсмическому усилению во всем мире уделяется большое внимание. Следует отметить, что сейсмические нагрузки не являются абсолютно внешними, а генерируются самим сооружением в результате сейсмических колебаний. В связи с этим в практике сейсмостойкого строительства сложились два подхода к повышению сейсмостойкости: традиционный и специальный. В первом случае увеличивают размеры элементов сооружения и их армирование для восприятия сейсмических нагрузок. А во втором случае целенаправленно изменяют динамическую схему сооружения для снижения динамических нагрузок. К специальным методам сейсмозащиты относят сейсмоизоляцию и сейсмогашение. Сейсмоизоляция в настоящее время получила достаточно широкое распространение. Она позволяет в 1,5–2,5 раза снизить сейсмические нагрузки. Однако её не всегда можно реализовать. Во-первых, это связано с большими перемещениями в уровне сейсмоизоляции, что затрудняет изготовление изолирующих опор. Во-вторых, достаточно сложно использовать сейсмоизоляцию для защиты существующих зданий. Второму способу сейсмозащиты – сейсмогашению посвящено меньше исследований и опыт его применения ограничен. Между тем, имеющиеся теоретические разработки показывают, что динамические гасители колебаний (ДГК) могут существенно снижать сейсмические нагрузки, а для сейсмоизолированных систем может снизить опасные смещения сейсмоизоляции. Однако теория ДГК разработана для систем с малым демпфированием, что затрудняет применение ДГК для снижения колебаний демпфированных систем, в частности, зданий и сооружений на слабых грунтах, сооружений с неоднородным демпфированием в конструкциях, сооружениях с сейсмоизоляцией и т. п. В связи с изложенным, развитие теории и методов расчета сооружений с ДГК с учетом рассеяния энергии в сооружении представляется достаточно актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. ДГК представляет собой массу, соединенную упругой связью с защищаемой системой. При определенном подборе жесткости и затухания пружины ДГК можно добиться сильного снижения колебаний системы от динамической нагрузки. Указанный эффект был обнаружен в конце XIX века. Он описан в работе адмирала С.О. Макарова, который рекомендовал его использовать для защиты судов при волнении. Однако в мире открытие ДГК приписывают немецкому механику Х. Фраму, который описал эффект ДГК, получил патент и реализовал данный принцип для судов при их спуске со стапеля. Последующие 100 лет вопросами эффективности и настройки ДГК занимались многие специалисты: Б.Г. Корнев, С.П. Тимошенко, Л.М. Резников, О.А. Савинов, В.С. Поляков. Эти исследования показали, что гасители малой массы требуют точной настройки и характеризуются большими амплитудами смещений при колебаниях. Это сильно усложняет конструкцию пружины ДГК и затрудняет их применение в строительной практике, где точная настройка может быть затруднительной. В связи с этим многие специалисты предлагали переход к многомассовым гасителям или гасителям

большой массы. Такие гасители предложены в работах А.А. Никитина, А.И. Цейтлина, А.М. Уздина, В.В. Сахаровой, С.А. Шульмана и др. Применение ДГК для снижения сейсмических нагрузок было предложено в работах Б.Г. Коренева, В.С. Полякова и Л.М. Резникова. Ими получены настройки ДГК при рассмотрении сейсмического воздействия как стационарного случайного процесса. ДГК большой массы в сейсмостойком строительстве рассмотрены в работах А.А. Никитина и А.И. Цейтлина. В частности, А.И. Цейтлин предложил в 1974 г. использование верхнего гибкого этажа здания. А.А. Никитин рассматривал задачу использования пролетного строения в качестве гасителя мостовых опор. А.А. Никитиным и А.М. Уздиным впервые введено понятие критической массы гасителя. При массе гасителя больше критической эффект гашения отсутствует. А.А. Никитин полагал, что относительная критическая (отношение массы гасителя к массе сооружения) масса равна 2, а метод инвариантных точек неприменим к ДГК большой массы. Имеется успешное применение ДГК в строительной практике, например, монументальная скульптура Родина-Мать, поставленная во второй половине прошлого века в Киеве имеет ДГК меча, который до установки гасителя сильно раскачивался при порывах ветра. ДГК, спроектированного под руководством Б.Г. Коренева, снабжена телебашня в городе Алма-Ата. Однако внедрение ДГК в практику строительства началось активно в последние 30 лет, прежде всего, при строительстве высотных зданий. Значительная часть зданий, построенных в Гуанчжоу, Гонконге, снабжены ДГК, которые предназначались для снижения ветровых нагрузок. При этом часть этих зданий расположена в высоко сейсмических районах, и гаситель должен снижать как ветровые, так и сейсмические нагрузки. Наибольшее развитие применения ДГК получило в Армении под руководством проф. М. Мелкумяна. В Гюмри построено больше 10 зданий с гибким верхним этажом, выступающим в роли ДГК. Так же им использовано ДГК для сейсмозащиты эксплуатируемых зданий старой постройки. Экспериментальные исследования показали, что использование ДГК снижает динамические нагрузки на защищаемые объекты в 1,5-1,8 раза. Хотя во многих случаях такое снижение оказывается вполне достаточным, оно существенно ниже, чем полученное в теоретических исследованиях. Это связано с тем, что разработчики ДГК использовали настройки, полученные без учета демпфирования форм колебаний в защищаемом сооружении.

Цель исследования. Разработать методы расчета и подбора параметров сейсмостойких демпфированных систем с ДГК.

Задачи исследования:

1. Установить особенности работы и настройки параметров ДГК для демпфированных систем при гармоническом воздействии.
2. Выявить влияние демпфирования в системе на параметры ДГК: настройку, демпфирование в пружине гасителя и критическую массу.
3. Разработать методы расчета демпфированных систем на сейсмические нагрузки при использовании линейно-спектральной методики (ЛСМ).

4. Проанализировать особенности расчета ДГК по ЛСМ и по акселерограммам землетрясений.

5. Оценить эффективность работы ДГК для гашения колебаний демпфированных систем при развитии повреждений в сооружении.

Объект исследования – динамические гасители колебаний сильно демпфированных систем.

Предмет исследования – методы расчета сильно демпфированных систем с ДГК.

Новизна результатов исследований:

1. Установлено влияние демпфирования в сооружении на настройку и демпфирование ДГК

2. Показано существенное влияние демпфирования в системе на критическую массу ДГК; при этом впервые установлен количественный показатель, определяющий понятие критической массы.

3. Разработан вариант ЛСМ, позволяющий проводить расчеты систем с произвольным неоднородным демпфированием.

4. Обоснована эффективность ДГК для гашения сейсмических колебаний демпфированных систем.

5. Разработана методика задания расчетных акселерограмм для оценки эффективности и подбора параметров сооружений с ДГК.

6. Получены оценки эффективности ДГК для систем с повреждениями, в частности, показано уменьшение работы сил пластического деформирования для упругопластических систем и уменьшение трещинообразования для систем с деградирующей жесткостью.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в диссертации использовались методы математического моделирования сейсмических колебаний, строительной механики, динамики сооружений. Результаты исследований сопоставлялись с опубликованными результатами расчетов других авторов.

Теоретическая значимость диссертационной работы. Впервые дано определение критической массы динамического гасителя колебаний и установлена зависимость критической массы от демпфирования в сооружении. Разработан новый вариант линейно-спектральной теории для расчета сильно демпфированных систем с непропорциональным демпфированием.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в:

1. Обосновании эффективности использования ДГК для снижения колебаний сильно демпфированных систем, включая системы сейсмоизоляции.

2. Разработке варианта ЛСМ, позволяющего проводить инженерные расчеты для сильно демпфированных систем

3. Разработке предложений по настройке ДГК для снижения повреждаемости при воздействии разрушительных землетрясений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Наличие демпфирования в сооружении существенно влияет на методы исследования и параметры ДГК. При исследовании работы гасителя демпфиро-

ванной системы не применим метод инвариантных точек, используемый в теории ДГК. Настройка гасителя с ростом затухания в защищаемой системе падает, а демпфирование в пружине гасителя растет.

2. В работе конкретизировано понятие критической массы гасителя и показана ее существенная зависимость от демпфирования в системе. С увеличением затухания в системе от 0 % до 15 % от критического значения, относительная критическая масса падает от 2 до 1. Ранее считалось, что относительная критическая масса равна двум.

3. Предложен вариант ЛСМ для сильно демпфированных систем с неоднородным демпфированием, использующий комплексные собственные числа и собственные векторы. Для пропорционального демпфирования предложенный вариант совпадает с существующим вариантом ЛСМ, использующим разложение уравнения движения по недемпфированным формам. А при малом демпфировании результаты предлагаемого расчета совпадают с полученными по нормативной ЛСМ.

4. Для оценки эффективности гасителя с использованием акселерограмм землетрясения необходимо применять различные расчетные записи землетрясения для системы с ДГК и без него. В расчетах ДГК на проектное землетрясение (ПЗ) необходимо обеспечивать кинематические характеристики расчетных воздействий: пиковые ускорения, коэффициент гармоничности и т. д. В расчетах ДГК на максимальное расчетное землетрясение (МРЗ), вызывающее повреждение в сооружении, необходимо обеспечивать энергетические характеристики расчетных воздействий.

5. Для задания МРЗ предложена новая энергетическая характеристика, использующая спектр работ сил пластического деформирования.

6. Настройка ДГК, полученная при гармоническом воздействии обеспечивает высокую эффективность ДГК в расчетах по акселерограммам землетрясений, при этом существенное снижение нагрузок имеет место при опасных резонансных сейсмических воздействиях.

7. ДГК, настройка которых получена при гармоническом воздействии, оказываются эффективными для уменьшения повреждения системы при разрушительных землетрясениях. При этом для систем с деградирующей жесткостью уменьшается трещинообразование, снижается показатель повреждаемости и рост периода колебаний из-за трещинообразования. А для упругопластических систем снижается время нахождения системы за пределами упругости и работа сил пластического деформирования.

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

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследований подтверждается их сопоставлением с опытом прошлых землетрясений и данными исследований, полученными в этой области. Для систем без затухания результаты расчета, предложенные автором, полностью совпадают с известными данными.

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

– XXVI Международной конференции. Математическое и компьютерное моделирование в механике деформируемых сред и конструкций. Санкт-Петербург 28–30 сентября 2015 г.;

– LXXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2016;

– Научно-практической конференции по сейсмостойкому строительству (с международным участием) памяти В.И. Смирнова. Москва, 1-2 декабря 2016;

– LXXXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург, 2017;

– X международная конференция по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте, Санкт-Петербург, 2017 г.;

– XXVII International Conference «Mathematical and Computer Simulation in Mechanics of Solids and Structures» MCM-2017. Fundamentals of static and dynamic fracture. Санкт-Петербург, 25-27 сентября 2017.

– Международной научной конференции по механике. Восьмые Поляховские чтения: Санкт-Петербург, 30 января – 2 февраля 2018 г.

Результаты научного исследования были использованы в качестве учебно-методического материала на кафедре «Механика» в ФГБОУ ВО «СПбГАСУ» и удостоены диплома «Победитель конкурса на соискание премии Правительства Санкт-Петербурга в области научно-педагогической деятельности в 2018 году» (диплом № 18018). Результаты научного исследования были удостоены диплома «Победитель конкурса грантов Санкт-Петербурга для студентов, аспирантов, молодых ученых, молодых кандидатов наук 2018 г.» (№ 18703).

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 24 научных работах, в том числе 7 в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК и 6 статьях в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа изложена на 140 страницах печатного текста, состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 173 источника, в том числе 50 на иностранном языке. В работе представлено 68 рисунков, 4 таблицы и 60 формул.

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

В первой главе представлен краткий обзор развития теории сейсмостойкости и методов сейсмозащиты зданий и сооружений. Проанализирована эффективность применения сейсмоизоляции и сейсмогашения. Приведен обзор методов расчета и обзор примеров применения ДГК в сейсмостойком строительстве.

Во второй главе приведен анализ влияния демпфирования в системе на параметры ДГК при гармонических колебаниях. Получены зависимости настройки и демпфирования ДГК от демпфирования в защищаемой системе. Конкрети-

зировано понятие критической массы и установлена ее связь с демпфированием в защищаемом сооружении. Разработан вариант ЛСМ для расчета демпфированных систем с ДГК и проведена оценка эффективности ДГК с использованием ЛСМ.

В третьей главе рассмотрены особенности расчета ДГК по акселерограммам землетрясений. При этом проанализированы кинематические, спектральные и энергетические характеристики землетрясений. Даны рекомендации по подбору расчетных акселерограмм при оценке эффективности и подбору параметров ДГК демпфированных систем. Показано, что настройка ДГК, полученная при гармоническом воздействии, обеспечивает его эффективность и при воздействии, заданном акселерограммой.

В четвертой главе рассмотрена эффективность применения ДГК для снижения повреждения при воздействии разрушающих землетрясений (МРЗ). При этом рассмотрено две модели накопления повреждений: упругопластическая модель, в которой степень повреждения определяется работой сил пластического деформирования, и модель с деградирующей жесткостью, в которой повреждаемость определяется максимальным за историю нагружения перемещением, определяющим трещинообразование в системе. Показано, что ДГК с настройкой, полученной при гармоническом воздействии, позволяет существенно снизить время нахождения за пределами упругости (работу сил пластического деформирования) для упругопластических систем и трещинообразование и рост преобладающего периода колебаний для систем с деградирующей жесткостью.

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

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Установлена зависимость основных характеристик ДГК от демпфирования в защищаемом сооружении. Ранее эффективность и параметры ДГК определялись методом инвариантных точек, который исходит из того, что все амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) системы с ДГК с различным затуханием в пружине гасителя пересекаются в двух точках, называемых инвариантными. Для анализа влияния демпфирования в сооружении на работу ДГК рассмотрена традиционная двухмассная система. Анализ ее колебаний с учетом демпфирования в сооружении показал, что метод инвариантных точек не применим для нахождения параметров ДГК. В связи с этим все последующие исследования проводятся методом перебора значений параметров на сетке их возможных значений. К исследуемым параметрам относятся относительная масса $\nu = m_r/m_c$, настройка ДГК $f = k_r/k_c$, где k_r – парциальная частота собственных колебаний гасителя, а k_c – парциальная частота собственных колебаний сооружения, и коэффициент неупругого сопротивления пружины гасителя γ_r . Для подбора оптимальных параметров была разработана программа в системе Windows на языке C++.

Выполненные исследования подтверждают известный вывод о падении настройки и росте демпфирования в пружине ДГК с увеличением его относи-

тельной массы. Кроме того, установлено, что оптимальная настройка падает, а оптимальное демпфирование в пружине ДГК возрастает с увеличением демпфирования в сооружении. Последний вывод особенно существенен при использовании ДГК для снижения смещений в системах сейсмоизоляции. На рисунке 1 приведены зависимости настройки и демпфирования в пружине ДГК от затухания в защищаемой системе. Так же проведены исследования зависимости параметров ДГК от относительной массы при различном затухании в сооружении. А для установления точного значения критической массы детально проанализировано поведение системы с ДГК при больших значениях v .

Для оценки величины критической массы, прежде всего, была поставлена задача определения четкого критерия, по которому можно определить величину $v_{кр}$. Для этого была детально проанализирована область, в которой происходит переход от падения оптимальной настройки к её стабильному значению близкому к нулю. Результат обобщен на графике, представленном на рисунке 2, на котором видно, что в рассматриваемой области зависимость имеет экстремум. Таким образом, критической массой можно назвать такую массу, при которой:

$$\left. \frac{df}{dv} \right|_{v=v_{кр}} = 0.$$

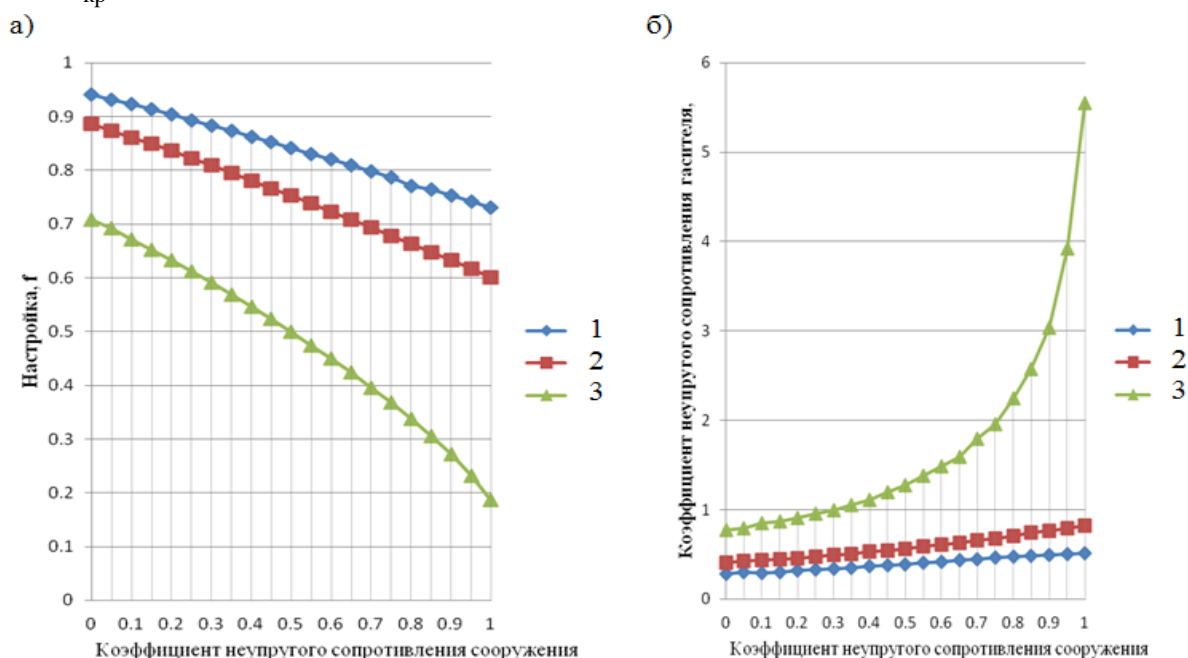


Рисунок 1 – Зависимость настройки (а) и демпфирования в пружине (б) ДГК от затухания в сооружении: 1 – $v=0.05$; 2 – $v=0.1$; 3 – $v=0.3$

Ранее отмечалось, что $v_{кр} \approx 2$; в работе показано, что с ростом затухания в сооружении величина $v_{кр}$ существенно падает (рисунок 3). Таким образом утверждение о том, что критическая масса ДГК примерно равна 2, справедливо при отсутствии затухания в сооружении.

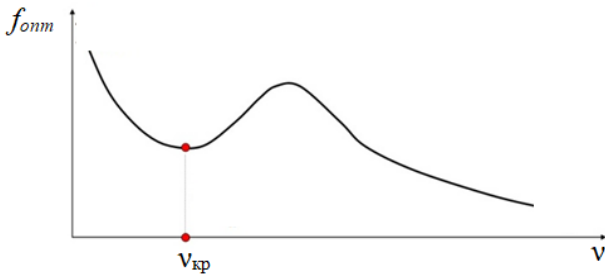


Рисунок 2 – Характер зависимости настройки ДГК от его относительной массы ν при больших значениях ν

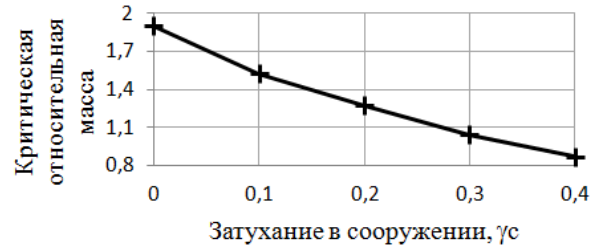


Рисунок 3 – Зависимость относительной критической массы от затухания в сооружении

2. Разработана методика оценки эффективности и параметров ДГК по ЛСМ. ЛСМ позволяет рассчитывать системы при отсутствии акселерограмм, что весьма важно при проектировании, особенно на начальных этапах, когда неизвестны сейсмологические данные, или для типового проектирования.

Нормативный вариант ЛСМ не позволяет учесть влияние демпфирования на формы колебаний. Поэтому возникает необходимость разработки варианта ЛСМ, который позволит учесть указанный эффект.

Уравнение сейсмических колебаний для системы с учетом затухания имеет следующий вид:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{Y}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{Y}} + \mathbf{R}\mathbf{Y} = -\mathbf{M}\mathbf{V}_p\ddot{y}_o, \quad (1)$$

где \mathbf{M} и \mathbf{R} – матрицы инерции и жесткости, \mathbf{B} – матрица вязкого демпфирования, \mathbf{Y} – вектор обобщенных координат, \mathbf{V}_p – вектор проекций воздействия на направления обобщенных координат, \ddot{y}_o – ускорение колебаний основания.

Для сильно демпфированных систем с непропорциональным демпфированием необходимо работать с полной матрицей системы (1):

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{B} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{R} \\ \mathbf{E} & \mathbf{0} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

Для применения ЛСМ к сильно демпфированной системе удобно воспользоваться теоремой о приведении произвольной вещественной матрицы к трехдиагональному виду. Данная трехдиагональная матрица имеет порядок $2n$, где n – число степеней свободы; матрица состоит из 4 квадратных диагональных блоков, размером $n \times n$. У первого и последнего блока на диагонали стоят вещественные части собственных чисел матрицы \mathbf{A} , у второго и третьего блоков – мнимые части, причем у одного из блоков со знаком минус. Трехдиагональная матрица Φ имеет следующий вид:

$$\Phi = \begin{pmatrix} \mathbf{N} & \mathbf{\Omega} \\ -\mathbf{\Omega} & \mathbf{N} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где $\mathbf{N} = [\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_n]$ – вещественные части собственных чисел матрицы \mathbf{A} ; $\mathbf{\Omega} = [\omega_1, \omega_1, \dots, \omega_n]$ – мнимые части собственных чисел матрицы \mathbf{A} .

В главных координатах система (1) примет следующий вид:

$$\ddot{\Xi} + \mathbf{G}\mathbf{K}\dot{\Xi} + \mathbf{K}^2\Xi = -(\mathbf{\Omega}\mathbf{Q}_1 + \frac{1}{2}\mathbf{G}\mathbf{K}\mathbf{P}_1)\ddot{Y}_0 - \mathbf{P}_1\ddot{Y}_0, \quad (4)$$

$$\ddot{\mathbf{H}} + \mathbf{ГК}\dot{\mathbf{H}} + \mathbf{K}^2\mathbf{H} = -(\mathbf{Q}\mathbf{P}_1 + \frac{1}{2}\mathbf{ГКQ}_1)\ddot{\mathbf{Y}}_0 - \mathbf{Q}_1\ddot{\mathbf{Y}}_0, \quad (5)$$

здесь $\mathbf{E}=[\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_k]$, $\mathbf{H}=[\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_k]$ – главные координаты; $\ddot{\mathbf{Y}}_0 = \mathbf{V}_p\ddot{y}_0$,

$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{\gamma_1 k_1}{2} & -\frac{\gamma_2 k_2}{2} & \dots & -\frac{\gamma_n k_n}{2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} + i \begin{bmatrix} \omega_1 & \omega_2 & \dots & \omega_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$ – матрица; $\mathbf{K} = [k_1, k_2, \dots, k_n]$ – спектр частот матрицы \mathbf{A} ; $\mathbf{Г} = [\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n]$ – спектр демпфирования матрицы \mathbf{A} .

При суммировании перемещений и усилий по формам колебаний в ЛСМ предполагается, что суммируемые функции являются случайными функциями с нулевым математическим ожиданием. А в качестве расчетного усилия принимается среднеквадратическое отклонение этой величины.

Для сейсмической силы S_i по i -ому обобщенному направлению формулу с учетом корреляции можно записать в виде:

$$S_i = \left[\sum_j \sum_k S_{ij} S_{ik} \varepsilon_{jk} + \sum_j \sum_k S'_{ij} S'_{ik} \varepsilon''_{jk} + \sum_{j \neq k} \sum_k S_{ij} S'_{ik} \varepsilon'_{jk} \right]^{1/2}, \quad (6)$$

где ε_{jk} , ε'_{jk} и ε''_{jk} – коэффициенты корреляции форм колебаний.

В формуле (6) в первой сумме S_{ij} является аналогом традиционных сейсмических сил и вычисляется по формуле:

$$S_{ij} = A g m_i \beta(T_j) K_\psi(\gamma_j) \eta_{ij}, \quad (7)$$

где A – пиковое ускорение основания в долях g ; m_i – величина i -й массы, $\beta(T_j)$ – коэффициент динамичности, зависящий от периода колебаний T_j по j -й форме; K_ψ – коэффициент, учитывающий способность зданий и сооружений к рассеиванию энергии; η_{ij} – коэффициент формы.

Обычно коэффициент корреляции определяют в предположении стационарности процессов

$$\varepsilon_{ij} = \frac{K_{ij}^{(0)}}{\sigma_i \sigma_j}, \quad (8)$$

где $K_{ij}^{(0)}$ – корреляционная функция i -й и j -й координат при $t=0$ (математическое ожидание произведения $\overline{\xi_i \xi_j}$), σ_j – среднеквадратичное отклонение j -й главной координаты.

Значения $K_{ij}^{(0)}$ и σ_j определяются по известным формулам

$$K_{ij}^{(0)} = \int_0^\infty \frac{Z(\omega) S(\omega) d\omega}{H_i(\omega) \cdot H_j(\omega)}, \quad \sigma_j^2 = \int_0^\infty \frac{S(\omega) d\omega}{H_j(\omega)}, \quad (9)$$

здесь $H_j(\omega) = (\omega^2 - k_j^2)^2 + \gamma_j^2 k_j^2 \omega^2$, $Z(\omega) = (k_j^2 - \omega^2) \cdot (k_k^2 - \omega^2) + \gamma_j \gamma_k k_j k_k \omega^2$;

Не представляет затруднений численное взятие интегралов (9). Для ряда процессов (вида функции $S(\omega)$) интегралы (9) взяты аналитически.

Вторая сумма в формуле (6) определяется составляющими смещений от компоненты уравнений (4,5) с \ddot{y}_0 . Сейсмические силы в данной сумме вычисляются по формуле, аналогичной (7). Коэффициент корреляции в этом слагаемом определяется интегралами:

$$K_{ij}^{n(0)} = \int_0^{\infty} \frac{Z(\omega)S(\omega)\omega^2 d\omega}{H_i(\omega) \cdot H_j(\omega)}; \quad (\sigma_j^n)^2 = \int_0^{\infty} \frac{S(\omega)\omega^4 d\omega}{H_j(\omega)}. \quad (10)$$

Третья сумма связана с попарной корреляцией компонент смещений вызванных составляющими \dot{y}_0 и \ddot{y}_0 в уравнении (4,5). Коэффициент корреляции в этом слагаемом определяется интегралами:

$$K_{ij}^{r(0)} = \int_0^{\infty} \frac{Z(\omega)S(\omega)\omega d\omega}{H_i(\omega) \cdot H_j(\omega)}; \quad (\sigma_j^r)^2 = \int_0^{\infty} \frac{S(\omega)\omega^2 d\omega}{H_j(\omega)}. \quad (11)$$

Коэффициенты корреляции факторов, обусловленных второй и третьей производной при $j=k$, равны нулю.

По данной методике рассчитана рассматриваемая двухмассная система. В расчете принимается коэффициент неупругого сопротивления $\gamma_c=0.1$ в защищаемом сооружении, а в пружине гасителя эта величина γ_2 варьируется.

Следует отметить, что в рассматриваемой системе существенны демпфирование и корреляция форм колебаний. В связи с этим был выполнен расчет перерезывающей силы по основанию стержня как по нормативной ЛСМ, так и по уточненной методике, учитывающей демпфирование в системе, с использованием формулы (6). Соответствующие зависимости величины Q от демпфирования в пружине гасителя приведены на рисунке 4. Как видно из рисунка, неоднородное демпфирование и корреляция форм колебаний существенно сказывается на результатах расчета при затухании в пружине гасителя близком к оптимальному, причем неучет влияния демпфирования на формы колебаний дает неконсервативный результат.

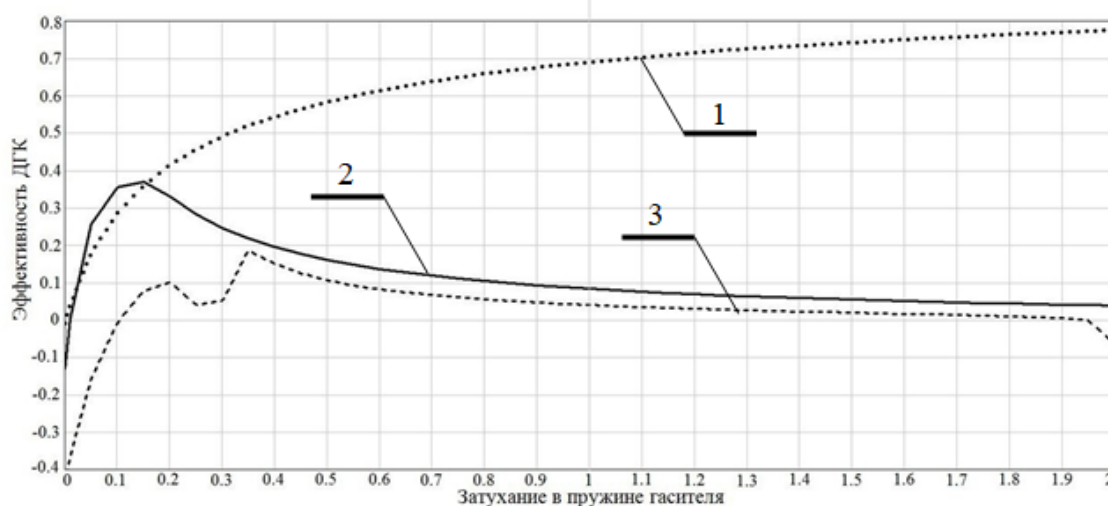


Рисунок 4 – Зависимость эффективности ДГК от затухания в его пружине.

1 – кривая, полученная по расчету по нормативной ЛСМ; 2 – кривая, полученная по точному расчету при гармоническом воздействии; 3 – кривая, полученная по расчету по ЛСМ с учетом влияния демпфирования на формы колебаний

Различие между расчетом на гармоническое воздействие и расчетом по ЛСМ не носят качественного характера и обусловлены различным видом кривых динамичности в расчетах на гармонику и по ЛСМ. Использование уточненного варианта ЛСМ с учетом влияния демпфирования на формы колебаний позволяет учесть основные качественные особенности работы ДГК и подобрать оптимальное демпфирование в пружине гасителя.

3. Разработана методика оценки эффективности систем с ДГК по акселерограммам землетрясений. Основопологающим для расчета является задание сейсмических воздействий. При генерации акселерограмм существует два принципиальных подхода: генерация под площадку строительства и под сооружение. Первый подход предлагается сейсмологами и должен учесть все сейсмологические особенности площадки строительства. Основными недостатками данного подхода является ограниченность исходной сейсмологической информации и отсутствие учета динамических свойств рассчитываемого сооружения при генерации воздействия. При учете свойств сооружения небольшие изменения спектрального состава воздействия могут существенно повлиять на реакцию сооружения. В связи со сказанным, расчет по акселерограммам, сгенерированным под площадку строительства, может приводить к неверным техническим решениям. В связи с этим обычно генерируют несколько акселерограмм, а также прибегают к варьированию преобладающих частот воздействия в рамках сейсмологических данных.

При генерации воздействия опасного для сооружения задается модель воздействия с опасной (резонансной) для сооружения частотой. Для этого задается многопараметрической функцией, состоящей из набора затухающих синусоид или подобных осциллирующих функций. Частота осцилляций подбирается опасной для сооружения. Для линейных систем это собственные частоты колебаний сооружения. Простейшим синтетическим воздействием является затухающая синусоида, использованная И.Л. Корчинским в 1954. Обобщение этого воздействия предложено А.А. Долгой. Ею для описания велосиграммы использовано следующее представление:

$$\dot{y}_0 = \sum_{i=1}^3 A_i e^{-\varepsilon_i t} \sin \omega_i t, \quad (12)$$

здесь ω_i – частоты, опасные для сооружения; A_i и ε_i – неопределенные параметры воздействия.

Частоты ω_i назначаются опасными (резонансными) для сооружения. Шесть параметров (три амплитуды A_i и три затухания ε_i) являются неопределенными. Дополнительным, седьмым параметром является продолжительность воздействия. Более сложная модель воздействия предложена в работах, где синтетическая велосиграмма записывается в виде:

$$\dot{y} = v(t + \varphi) + \sum_{i=1}^3 e^{-\alpha_i t} (1 - e^{-\beta_i t}) A_i \sin \omega_i t, \quad (13)$$

здесь ω_i – частоты, опасные для сооружения; α_i , β_i и A_i – неопределенные параметры воздействия; $v(t)$ – импульс скорости; φ – варьируемый параметр, определяющий сдвиг импульса относительно начала воздействия. Импульс характеризуется продолжительностью $2t_0$ и остаточным смещением d_{\max} .

Выражение (13) характеризуется двенадцатью неопределенными параметрами, которые подбираются так, чтобы свойства сгенерированного воздействия соответствовали свойствам реальных акселерограмм.

Важно отметить, что при проектировании зданий следует проводить расчеты минимум на два уровня нагрузок: проектное землетрясение (ПЗ) и максимальное расчетное землетрясение (МРЗ). Определяющие характеристики землетрясения для ПЗ и МРЗ различны. При ПЗ сооружение работает в упругой стадии, и усилия в элементах конструкции пропорциональны уровню ускорений. Поэтому основной характеристикой ПЗ является пиковое ускорение. При проектировании на МРЗ необходимо исключить малоцикловую усталость и прогрессивное обрушение несущих конструкций. Критерием этих повреждений является работа сил пластического деформирования. В связи с этим при генерации воздействий нужно обращать внимание на их энергетические характеристики.

В работе большое внимание уделено обоснованию параметров воздействия для анализа работы ДГК в упругой и неупругой стадии. Уточнены параметры сейсмического воздействия: кинематические, определяющие ПЗ, и энергетические, определяющие МРЗ. К кинематическим относятся пиковые ускорения основания, коэффициент гармоничности и момент включения импульса скорости. Построена зависимость пиковых ускорений от преобладающего периода воздействия. Подтвержден вывод о том, что значения пиковых ускорений падают с увеличением преобладающего периода. Опыт генерации расчетных акселерограмм показывает, что весьма важной характеристикой является коэффициент гармоничности, который не позволяет задать монохромный процесс. Для данной величины также получена зависимость от преобладающего периода, на которой видно уменьшение данного коэффициента с ростом периода. Также было проанализирована зависимость момента включения импульса скорости от преобладающего периода. Из зависимости видно, что чем больше преобладающий период, тем позже наступает момент включения импульса. Построены зависимости для энергетических характеристик землетрясения от преобладающего периода воздействия: интенсивности по Ариасу (I_A), кумулятивной абсолютной скорости (CAV) и плотности сейсмической энергии (SED). Предложен новый показатель интенсивности землетрясения, названный SEI (seismic energy index). Данная энергетическая характеристика определяет работу сил пластического деформирования землетрясения. Этот показатель имеет два преимущества по сравнению с существующими. Во-первых, он не требует задания продолжительности землетрясения. Эффективная часть воздействия начинается, когда начинается переход от упругой ветви диаграммы деформирования сооружения к пластической. Во-вторых, предлагаемый показатель позволяет оценить потенциальные разрушительные способности сейсмического воздействия. При оценке показателя SEI землетрясению даётся возможность выбрать все сооружения, над повреждениями которых оно может поработать. Слабым является землетрясение, которое не может повредить никакое сооружение.

В работе показано, что расчет на ПЗ требует генерации трех акселерограмм: опасной для сооружения без ДГК и двух опасных для сооружения с ДГК, одна из которых определяет работу сооружения, а вторая – работу ДГК.

Расчет только на акселерограмму опасную для сооружения без ДГК завышает его эффективность.

Для дополнительной оценки эффективности ДГК произведены расчет на акселерограммы прошлых землетрясений. Полученные результаты показали, что более опасной является акселерограмма с преобладающим периодом близким к резонансной частоте колебаний сооружения с ДГК. Отмечено, что при расчете сооружения с ДГК по существующим акселерограммам прошлых землетрясений необходимо использовать два пакета записей: опасный для сооружения и опасный для сооружения с ДГК.

Во всех случаях при расчете на акселерограммы настройка ДГК принималась по расчетам при гармоническом воздействии.

4. Показана эффективность ДГК для снижения повреждений при разрушительных землетрясениях.

Для описания нелинейной работы конструкции рассмотрены две модели накопления повреждения в ней.

Первая модель накопления повреждений – упруго пластическая. Диаграмма деформирования представляет собой диаграмму Прандтля. В качестве показателя повреждаемости сооружения принята работа сил пластического деформирования. Сооружения с такой диаграммой характеризуются АЧХ. Настройку ДГК можно подбирать исходя из положения максимума на АЧХ. Для выбора опасной акселерограммы необходимо строить спектр работ пластического деформирования для рассматриваемых записей. С этой целью рассматривалась реакция на заданную акселерограмму осциллятора, соединенного с основанием демпфером сухого трения, т. е. имеющего в качестве диаграммы деформирования диаграмму Прандтля. В качестве опасной акселерограммы выбиралась акселерограмма, имеющая наибольшее значение работы сил пластического деформирования для заданного начального периода и предела упругости. Сооружение при указанной настройке гасителя и выбранной акселерограмме рассчитывается стандартным образом по разработанной программе в системе Windows на языке C++ с использованием интеграла Дюамеля.

Вторая модель – модель с деградирующей жесткостью, характерная для хрупких материалов. Для нее за основу учета нелинейности работы взята модель Кирикова-Аманкулова. В данной модели жесткость рассматриваемого элемента R снижается, а коэффициент неупругого сопротивления и параметр повреждаемости к линейно растут с увеличением максимального за историю нагружения перемещения системы u_{\max} . Такое изменение параметров продолжается, пока величина u меньше предела упругости $u_{\text{упр}}$, жесткость системы постоянна. После этого принимается линейное падение его жесткости. Перемещение $u_{\text{усл}}$, при котором жесткость системы превращается в 0, названа условным перемещением разрушения. Фактическим перемещением, при котором происходит разрушение сооружения, следует считать перемещение $u_{\text{разр}}$, при котором реакция системы достигает максимального значения.

Интегрирование уравнения движения осуществляется с использованием интеграла Дюамеля после разложения системы уравнений движения по формам

колебаний. Такое разложение осуществляется для каждого шага интегрирования. Если в пределах этого шага менялись характеристики системы, то параметры разложения по формам колебаний меняются в соответствии с изменением жесткости и демпфирования в системе.

Сначала рассмотрен пример сооружения с ДГК в системе с деградирующей жесткостью. Критерием эффективности ДГК в данном случае была повреждаемость конструкции. Расчеты показывают, что ДГК может существенно снижать повреждаемость. В работе получен результат расчета системы на воздействие землетрясения, произошедшего в Бухаресте в 1978 года (рисунок 5). Начальный период колебаний рассматриваемого сооружения равен 1,19 с. За счет применения гасителя повреждаемость снизилась с 82 % до 36 %.

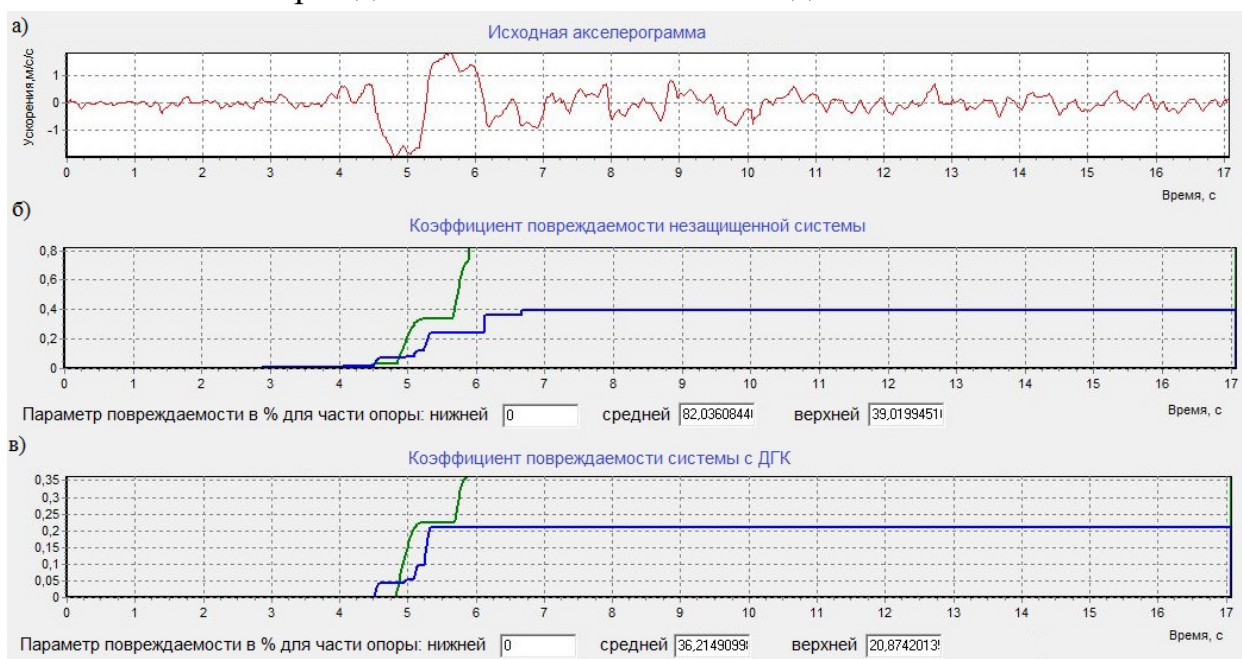


Рисунок 5 – Результаты расчета сооружения без ДГК и с ДГК на воздействие землетрясения в Бухаресте:

а) – акселерограмма землетрясения в Бухаресте, б) – график изменения коэффициента повреждаемости для незащищенного сооружения, в) – график изменения коэффициента повреждаемости для сооружения, защищенного ДГК

Для оценки эффективности гасителя следует подбирать акселерограммы наихудшие для системы с гасителем и без ДГК. Для исследования работы системы были сгенерированы соответствующие акселерограммы, опасные для сооружения в упругой стадии работы. При расчете на сгенерированное воздействие, опасное для незащищенного сооружения, система полностью разрушилась. Установка гасителя снизила повреждения системы до 87 %, т. е. спасла систему от разрушения. Результаты расчета системы с гасителем на воздействия, опасные для защищенного сооружения по первым двум преобладающим формам показали, что воздействие, сгенерированное опасным для системы с ДГК по второй форме колебаний, оказалось более разрушительным, что подтверждает идею о проверке системы с ДГК на опасные воздействия, сгенерированные по первому и второму преобладающему периоду защищенной системы.

В работе предлагается сохранять настройку на упругую систему, в этом случае гаситель будет гасить резонансные колебания сооружения, которые воз-

никают в течение 3-5 с интенсивного воздействия. Когда начинают возникать повреждения в системе, её собственный период начинает увеличиваться. Но время существования системы с фиксированным периодом оказывается малым для того, чтобы реализовались резонансные колебания.

Также, исходя из того, что частота собственных колебаний сооружения меняется, целесообразно устанавливать два гасителя. Один должен снижать колебания системы в упругой стадии работы, в этом случае ДГК может предотвратить переход в пластическую часть. Второй должен снижать колебания системы в пластической части. В этом случае ДГК начнет работать, когда частота колебаний сооружения совпадет с частотой, на которую настроен гаситель.

Далее рассматривается работа сооружения с ДГК для упругопластической системы. Также как и в задаче о колебаниях системы с деградирующей жесткостью в упруго пластической системе следует ожидать снижение эффективности ДГК, так как с ростом пластических деформаций будет меняться период колебаний исходной системы.

Однако при возникновении пластической деформации работа гасителя существенно отличается от рассмотренной выше работы ДГК в системах с деградирующей жесткостью. Упруго пластические системы можно охарактеризовать АЧХ, хотя параметры АЧХ зависят от амплитуды колебаний. Для иллюстрации работы ДГК в упругопластической системе для наглядности были рассмотрены гармонические возмущения. Критерием эффективности ДГК является время нахождения в пластическом состоянии и амплитуда пластических деформаций. Эти параметры, в конечном счете, определяют работу пластического деформирования, которая в свою очередь определяет возможность прогрессирующего обрушения или малоциклового усталости конструкций сооружения.

Поскольку частота собственных колебаний меняется в процессе колебаний, так же, как и для систем с деградирующей жесткостью, представляется целесообразным установка двух ДГК. Первый ДГК снижает нагрузки на сооружение в упругой области работы сооружения, предотвращает переход в пластическую область, а второй ДГК включается в работу в пластической области деформирования сооружения.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы

1. Установлены особенности работы и настройки параметров ДГК для демпфированных систем. Показано, что ДГК могут быть эффективны для гашения сейсмических колебаний, однако при настройке их параметров необходимо учитывать демпфирование в материале защищаемого сооружения.

2. Выявлено влияние демпфирования в системе на параметры ДГК. Показано, что демпфирование в материале сооружения не позволяет использовать для оптимизации ДГК традиционно используемый для этой цели метод инвариантных точек. В работе установлены зависимости настройки и демпфирования ДГК от показателя затухания в сооружении и относительной массы гасителя. С увеличением гасящей массы в системе с кинематическим возмущением возникает ситуация, когда эффект гашения исчезает. Массу, при которой прекра-

щается гашение, в литературе называют критической. Считалось, что эта масса в два раза больше массы защищаемого объекта. В работе уточнено понятие критической массы. Показано, что на зависимости настройки гасителя f от его относительной массы ν существует точка, в которой производная от настройки по относительной массе ДГК равна 0. Соответствующую массу предложено называть в работе критической. Выполненные исследования показали, что при отсутствии затухания в сооружении $\nu_{кр} \approx 1.9$, а с ростом затухания в сооружении величина $\nu_{кр}$ снижается до 1. Этот результат представляется важным при использовании в качестве ДГК части самого сооружения.

3. Разработаны методы расчета демпфированных систем на сейсмические нагрузки при использовании ЛСМ. Такой расчет можно проводить, не имея расчетных акселерограмм для площадки строительства. Однако действующий вариант ЛСМ не позволяет учесть фактическое демпфирование в сооружении и пружине ДГК. В работе предложен вариант ЛСМ для систем с неоднородным демпфированием, основанный на точном разложении демпфированной системы по комплексным формам колебаний. Методика доведена до расчетных формул, аналогичных нормативным. Показано, что ЛСМ позволяет оптимизировать параметры гасителя и оценивать его эффект. При этом нормативный вариант ЛСМ допустимо использовать только для подбора жесткости ДГК при затухании в системе не более 15 % от критического значения.

4. Проанализированы особенности расчета ДГК по акселерограммам землетрясений и установлено, что такой расчет для ДГК требует более внимательного подхода, чем расчет обычных сооружений. Для проведения расчетов необходимо задавать акселерограммы, опасные для рассматриваемой системы. При оценке эффективности ДГК для сооружения без ДГК и с ДГК эти акселерограммы различны. Для сооружения с ДГК приходится использовать две расчетные акселерограммы (или два набора акселерограмм). Одна акселерограмма определяет усилия в защищаемом сооружении и является резонансной для первой формы колебаний системы. Вторая акселерограмма определяет усилия в пружине гасителя и является резонансной для второй формы колебаний системы. Формальный подбор расчетных акселерограмм для площадки строительства может привести к неверному выводу о неэффективности, или даже опасности устройства ДГК.

5. При генерации акселерограмм для расчета ДГК необходимо учитывать помимо спектрального состава основные кинематические и энергетические характеристики реальных воздействий. К числу кинематических характеристик, кроме пиковых ускорений и скоростей необходимо учитывать коэффициент

гармоничности воздействия κ :
$$\kappa = \frac{\ddot{y}_0^{(\max)} \cdot y_0^{(\max)}}{\left(\dot{y}_0^{(\max)}\right)^2}$$
. Для синтетических акселеро-

грамм параметр κ должен находиться в диапазоне от 2 до 10 в зависимости от преобладающей частоты акселерограммы. Занижение величины κ приводит к завышению эффективности ДГК.

К энергетическим характеристикам воздействия относятся интенсивность по Аиасу (I_A), кумулятивная абсолютная скорость (CAV) и плотность сейсми-

ческой энергии (SED). Кроме указанных выше энергетических характеристик в работе введена новая энергетическая характеристика воздействия, основанная на понятии спектра работы сил пластического деформирования. В отличие от традиционного спектра акселерограмма пропускается через осциллятор с диаграммой деформирования Прандтля. При этом получается система спектров работы сил пластического деформирования в зависимости от предела упругости системы.

6. Оценена эффективность работы ДГК для гашения колебаний демпфированных систем при развитии повреждений в сооружении. Проведенные исследования позволяют заключить, что ДГК повышают сейсмостойкость сооружений при разрушительных землетрясениях. ДГК снижают развитие трещинообразования (максимальное за историю нагружения смещение) для систем с деградирующей жесткостью и работу сил пластического деформирования для упругопластических систем. Выявлены критерии подбора параметров ДГК при наличии повреждений в сооружении:

- Для систем с деградирующей жесткостью целесообразна настройка гасителя на собственную частоту колебаний неповрежденной системы.
- Для упругопластических систем следует настраивать ДГК на опасную частоту по АЧХ системы или на максимум на спектре работы сил пластического деформирования.

IV. ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

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

1. Нестерова О.П. Особенности работы динамических гасителей колебаний при силовом и кинематическом возмущении демпфированных сооружений / О.П. Нестерова, А.М. Уздин // Известия российской Академии ракетных и артиллерийских наук, Москва – 2016. – Вып. 2(92). – С. 84-89. (0,38 п. л.)

2. Нестерова О.П. Возможность применения линейно-спектральной методики для расчета динамических гасителей сейсмических колебаний / О.П. Нестерова, Л.Н. Смирнова, Т. Д. Азаев // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений – 2016. – №2. – С. 46-51. (0,375 п. л.)

3. Смирнова Л.Н. Некоторые особенности подбора параметров динамических гасителей колебаний (ДГК) для сейсмозащиты зданий и сооружений / Л.Н. Смирнова, А.А. Долгая, А.М. Уздин, О.П. Нестерова // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений – 2016. – №3. – С. 22-29. (0,5 п. л.)

4. Нестерова О.П. Использование линейно-спектральной методики для расчета динамических гасителей колебаний демпфированных систем / О.П. Нестерова // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 3(62). – С. 50-55. (0,375 п. л.)

5. Нестерова О.П. Отклик на статью А.Г.Тяпина «Неклассическое демпфирование в системе «основание-сооружение» и вопрос о применимости спектрального метода расчета усилий» / О.П. Нестерова, К.В. Воробьева, А.М. Уз-

дин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений – 2017. – №2. – С. 60-63. (0,25 п. л.)

6. Нестерова О.П. Универсальный численный показатель силы землетрясения / О.П. Нестерова, А.М. Уздин, Г.А. Сибуль, А.А. Долгая, Ю. Гуань // Известия российской Академии ракетных и артиллерийских наук, Москва – 2018. – Вып. 2(102). – С. 152-156. (0,3125 п. л.)

7. Нестерова О.П. К вопросу о задании уровня сейсмического воздействия в шкалах балльности и нормах проектирования / О.П. Нестерова, А.С. Ткаченко, А.М. Уздин, А.А. Долгая, Л.Н. Смирнова, Ю. Гуань // Вопросы инженерной сейсмологии – 2018. – Т. 45, № 1. – С. 73–80. (0,5 п. л.)

Публикации в изданиях, индексируемых международной системой цитирования (Scopus и Web of Science)

1. Vorobyova K.V. Taking account of damping in estimating structure earthquake stability / K.V. Vorobyova, O.P. Nesterova, A.M. Uzdin, N.V. Nikonova, M.Yu. Fedorova // Materials Physics and Mechanics -2016. – 26 – p.57-60. (0,25 п. л.)

2. Иванова Т.В. Моделирование расчетного сейсмического воздействия в условиях ограниченной сейсмологической информации / Т.В. Иванова, Ю. Гуань, О.П. Нестерова, С.В. Прокопович, Л.Н. Смирнова, А.М. Уздин, Д.А. Ивашиных // Инженерно-строительный журнал – 2017. – №7(75). – С. 129-138. (0,625 п. л.)

3. Альберт И.У. Расчетное сейсмическое воздействие для сооружения с динамическим гасителем колебаний / И.У. Альберт, А.А. Долгая, Т.В. Иванова, О.П. Нестерова, А.М. Уздин, Ю. Гуань, Д.А. Ивашиных, О.К. Воронков, В.Б. Штильман, С.Г. Шульман, А.А. Храпов // Инженерно-строительный журнал – 2017. – №8(76). – С. 98-105. (0,5 п. л.)

4. Nesterova O. Features of tuned mass damper behavior under strong earthquakes / O. Nesterova, A. Uzdin, M. Fedorova // AIP Conference Proceedings – 2018. – 1959. – 030016 (0,5 п. л.)

5. Нестерова О.П. Метод расчета сильно демпфированных систем с непропорциональным демпфированием / О.П. Нестерова, А.М. Уздин, М.Ю. Федорова // Инженерно-строительный журнал – 2018. – №5(81). – С. 64-72. (0,5625 п. л.)

6. Benin A. Efficiency of Using Tuned Mass Damper to Reduce Damage after Strong Earthquakes / A. Benin, A. Uzdin, O. Nesterova // MATEC Web of Conferences – 2018. – Vol. 239. – 05014 (0,5 п. л.)

Статьи в других изданиях

1. Нестерова О.П. Динамический гаситель колебаний демпфированных систем / О.П. Нестерова, А.М. Уздин // В сборнике: ТРАНСПОРТ: ПРОБЛЕМЫ, ИДЕИ, ПЕРСПЕКТИВЫ сборник трудов LXXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – 2017. – С. 91-94. (0,125 п. л.)

2. Богданова М.А. Числовые характеристики сейсмических воздействий / М.А. Богданова, О.П. Нестерова, Н.В. Никонова, А.С. Ткаченко, А.М. Уздин, М. Рахманова, Т.М. Азаев, Х.Р. Зайнулабидова // Наука и мир. – 2017. – №3 (43), том 1. – С. 49-55. (0,4375 п. л.)

3. Уздин А.М. Моделирование сейсмических воздействий для динамического расчета зданий и сооружений / А.М. Уздин, О.П. Нестерова, С.В.Прокопович, А.А. Долгая, Ю. Чанг, Ю. Гуань, Х. Ван // Российско-китайский научный журнал «Содружество» Ежемесячный научный журнал научно-практической конференции – 2017. – № 20 1 часть. – С. 59-66. (0,5 п. л.)

4. Долгая А.А. Генерация расчетных акселерограмм при многоуровневом проектировании сейсмостойких сооружений / А.А. Долгая, Х.Р. Зайнулабидова, О.П. Нестерова, Л.Н. Смирнова // В сборнике: Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте Сборник трудов X Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте. – 2018. – С. 85-92. (0,25 п. л.)

5. Лобанов А.Н. Энергетические характеристики сейсмических воздействий / А.Н. Лобанов, О.П. Нестерова, Г.А. Сибуль, А.С. Ткаченко, А.М. Уздин, А.А. Долгая, Х.Р. Зайнулабидова, Т.М. Азаев, Ю. Гуань // В сборнике: Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте Сборник трудов X Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте. – 2018. – С. 173-182. (0,3125 п. л.)

6. Нестерова О.П. Некоторые особенности учета сейсмологических условий при генерации акселерограмм для расчета сооружений / О.П. Нестерова, Н.В. Никонова, С.В. Прокопович // В сборнике: Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте Сборник трудов X Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте. – 2018. – С. 182-190. (0,28125 п. л.)

7. Нестерова О.П. Карты сейсмического районирования в физических величинах – миф или реальность / О.П. Нестерова, А.С. Ткаченко, А.М. Уздин, А.А. Долгая, Л.Н. Смирнова // В сборнике: Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте Сборник трудов X Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте. – 2018. – С. 190-195. (0,1875 п. л.)

8. Сибуль Г.А. Энергетические методы в теории сейсмостойкости / Г.А. Сибуль, А.А. Ермошин, О.П. Нестерова, А.М. Уздин // В сборнике: Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте Сборник трудов X Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте. – 2018. – С. 225-229. (0,15625 п. л.)

9. Богданова М.А. Связь силы землетрясения, коэффициента редукции, пиковых ускорений и энергетических характеристик сейсмического воздействия / М. А. Богданова, А.В. Бенин, О.П. Нестерова, С.Г. Семенов, А.С. Ткаченко, А.М. Уздин, Л.Н. Смирнова, А.А. Долгая, Ю. Гуань // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2018. – №1 (39). – С. 27-31 (0,3125 п. л.)

10. Нестерова О.П. Универсальная энергетическая характеристика землетрясения / О.П. Нестерова, А.М. Уздин, Г.А. Сибуль, А.А. Долгая, Ю. Гуань // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2018. – №3 (41). – С. 23-26. (0,25 п. л.)

11. Бенин А.В. Оценка коэффициента редукиции сейсмической нагрузки с позиций предельных перемещений сооружения / А.В. Бенин, О.П. Нестерова, Г.А. Сибуль, А.М. Уздин // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2018. – №4 (42). – С. 18-20. (0,1875 п. л.)

Компьютерная верстка С. Н. Яблокова

Подписано к печати 15.04.2019. Формат 60×84 1/16. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 44.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.

