

УДК 624.04

ГАШЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Шейн Александр Иванович,

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

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

Быков Александр Николаевич,

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

аспирант.

Аннотация

Вопрос противодействия сейсмическим и ветровым нагрузкам для защиты зданий от разрушений очень актуален. Поиск способов решения этой проблемы и нахождение новых методов гашения колебаний и противодействия динамическим нагрузкам, которые были бы экономически выгодны и легки в массовом применении, является темой ряда научных работ. В статье дан краткий обзор научных исследований в области гашения колебаний зданий и сооружений за 2019-2024 гг., а также работ в области устройств гашения колебаний. Приведены исследования российских и зарубежных ученых в рассматриваемой области. Описываются способы гашения динамических колебаний высотных сооружений.

Ключевые слова: гашение колебаний, демпфирующие устройства, сейсмические воздействия.

Damping of vibrations of structures of buildings and structures.

The current state of the problem

Shein Alexander Ivanovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

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

Bykov Alexander Nikolaevich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

post-graduate student.

Abstract

The issue of countering seismic and wind loads to protect buildings from destruction is very relevant. The search for ways to solve this problem and find new methods of damping vibrations and countering dynamic loads that would be economically profitable and easy to use on a large scale is the topic of a number of scientific papers. The article provides a brief overview of scientific research in the field of vibration damping of buildings and structures for 2019-2024, as well as work in the field of vibration damping devices. The research of Russian and foreign scientists in the field under consideration is presented. The methods of damping dynamic fluctuations of high-rise structures are described.

Keywords: vibration damping, damping devices, seismic effects.

Введение

Частота землетрясений во всем мире неуклонно растет. Известные примеры включают землетрясение 2001 года в Гуджарате (Гуджарат, Индия; магнитуда (M) = 7,7), землетрясение 2003 года на Баме (Бам, Иран; M = 6,6), землетрясение 2004 года на Суматре (Индонезия; M = 9,1), землетрясение 2005 года в Кашмире (Пакистан; M = 7,6), землетрясение 2007 года в Перу (M = 8,0), землетрясение 2008 года в Сычуани (провинция Сычуань, Китай; M = 8,0), землетрясение на Гаити 2010 года (M = 7,0), Великое землетрясение в Восточной Японии 2011 года (M = 9,1), землетрясение в Пакистане 2013 года (M = 7,7), землетрясение в Непале 2015 года (M = 7,8), землетрясение в Эквадоре 2016 года (M = 7,8), землетрясение в Кумамото 2016 года (Кумамото, Япония; M = 7,3), ирано–иракское землетрясение 2017 года (M = 7,3), землетрясение на Гаити 2021 года (M = 7,2), землетрясение в Афганистане 2022 года (M = 6,0), землетрясение в Турции и Сирии 2023 года (M = 7,8) и землетрясение в 2023 году Землетрясение в Марракеше–Сафи (Марокко; магнитуда = 6,8). Кроме того, магнитуда землетрясений растёт, что приводит к резкому увеличению числа жертв и экономических потерь.

Согласно исследованиям последствий землетрясений в прошлом, в том числе вышеупомянутых сильных землетрясений, многие средне- и малоэтажные здания, особенно железобетонные здания с недостаточным армированием в колоннах, получили значительные повреждения. Поэтому вопрос противодействия сейсмическим и ветровым нагрузкам для защиты зданий от разрушений очень актуален. Поиск способов решения этой проблемы и нахождение новых методов гашения колебаний и противодействия динамическим нагрузкам, которые были бы экономически выгодны и легки в массовом применении, является темой ряда научных работ.

В статье [1] выполнена оценка сейсмостойкости железобетонного каркаса, заполненного сборными модульными блоками и предложена новая концепция сейсмоусиления с использованием сборных модульных блочных стен (PMBW) для улучшения и устранения недостатков традиционных методов сейсмоусиления железобетонных (ЖБ) каркасов, заполненных поперечными стенами, каменными стенами и сборными панелями. Метод сейсмоусиления с использованием PMBW максимально использует преимущества заводских модульных блоков, повышая конструктивность и целостность соединений между существующим каркасом и заполняющими его PMBW. Кроме того, метод усиления PMBW повышает сейсмостойкость без значительного увеличения веса конструкции, а необходимое количество усиления можно легко рассчитать, поскольку метод усиления включает в себя типичное заполнение каркаса. Для железобетонных зданий с несейсмичными конструктивными элементами, в которых преобладают сдвиговые разрушения, применение этого метода сейсмоусиления просто обеспечивает достаточную прочность.

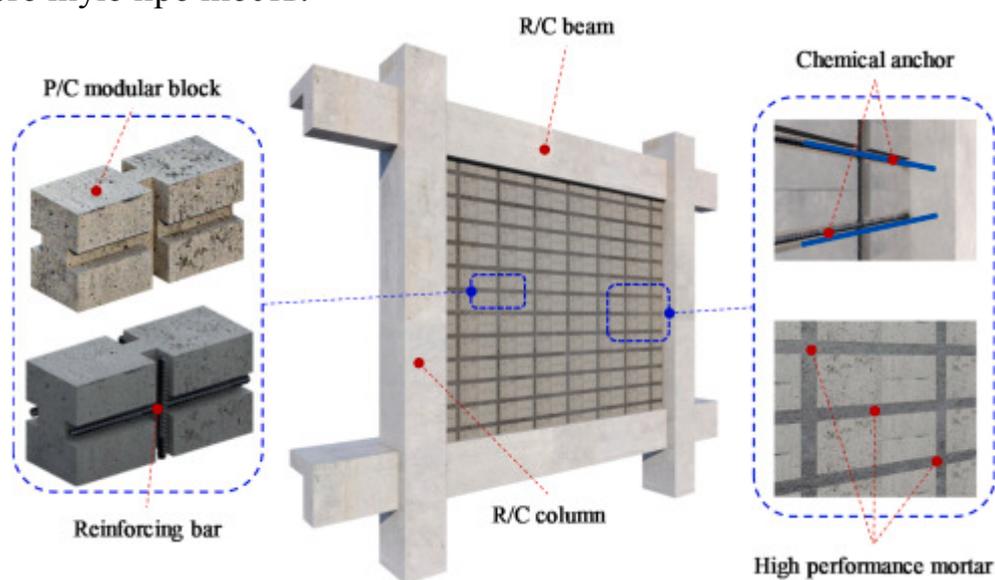


Рисунок 1 – [1] Детали метода армирования каркаса сборной модульной блочной стены (PMBW). P/C: сборный бетон; RC: железобетон

В статье [2] приведен анализ самоцентрирующихся качающихся систем для сейсмостойких строительных конструкций. Эти системы с низким уровнем повреждений могут предотвратить значительные экономические потери, связанные с ремонтом, сносом зданий и простоями в работе после землетрясений. Статья призвана предоставить обзор исследований систем раскачивания для зданий из различных материалов, включая сталь, бетон, кирпич и дерево, а также проанализировать предыдущие исследования.

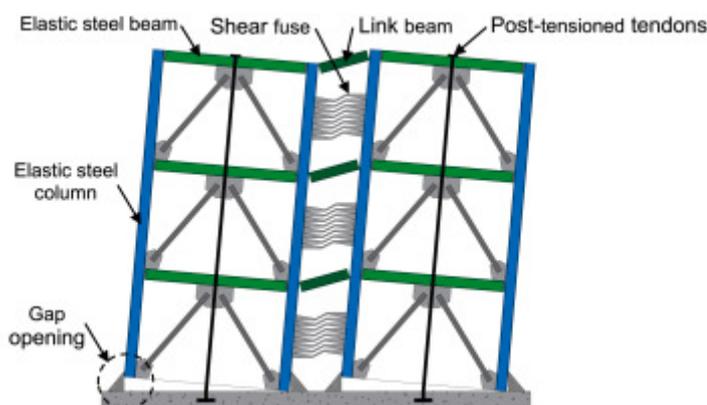


Рисунок 2 – [2] Система двойной качающейся стальной рамы и ее различные КОМПОНЕНТЫ

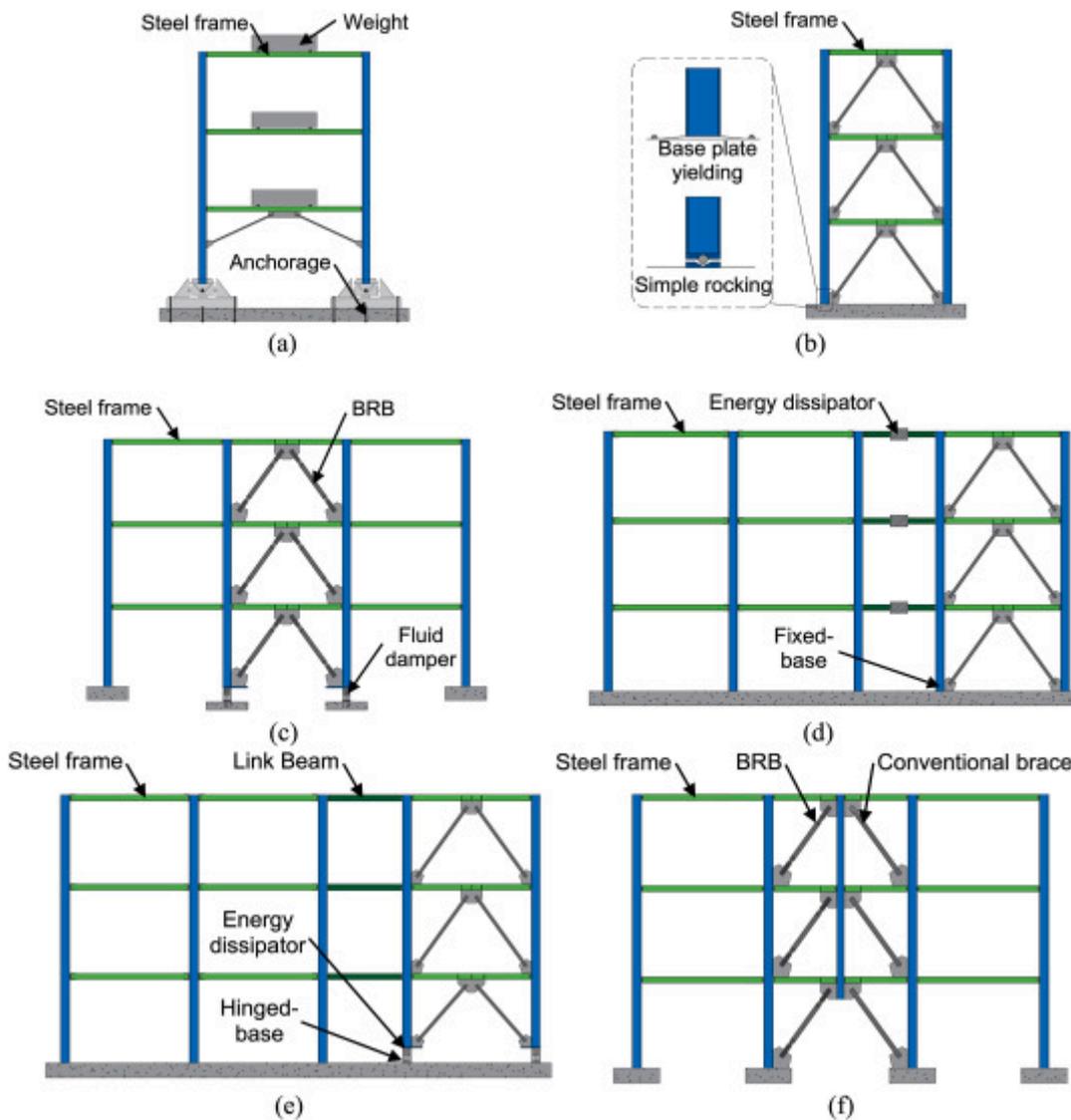


Рисунок 3 – [2] Некоторые конфигурации систем раскачивания в стальных конструкциях; (а) 3-этажная испытательная модель Клафа и Хакельбриджа [21]; (б) простая система раскачивания и податливая система с опорной плитой; (в) система раскачивания BRB с жидкостным демпфером; (г) система раскачивания с отдельными ступенями и жидкостными демпферами в соединительной балке; (д) система раскачивания с отдельными опорами и жидкостными демпферами в основании; (е) система раскачивания BRBF

Целью исследования [3] является разработка пошаговой процедуры проектирования сейсмоусиления существующих стальных зданий на основе локальных мероприятий по усилению соединений и использования традиционных крестообразных распорок (X-CBF), которые спроектированы с учётом архитектурных ограничений и экономии времени и средств. Предложенная процедура применяется к существующему шестиэтажному стальному зданию, не соответствующему нормативным требованиям, которое находится в Неаполе (Италия). Для изучения эффективности предложенной процедуры проводится как локальный, так и глобальный численный анализ. Полученные результаты показывают, что можно снизить на 25 % сопротивление и жёсткость новых X-CBF, если укрепить соединения между балками и колоннами, чтобы они выдерживали прогиб соединённых балок. Сравнивается сейсмическая уязвимость построенных и модернизированных конструкций, а также количественно оценивается снижение сейсмического риска в соответствии с итальянскими рекомендациями по классификации рисков для конструкций. Оценивается изменение класса сейсмического риска в результате запланированных мероприятий, что подтверждает значительное снижение риска для модернизированного здания.

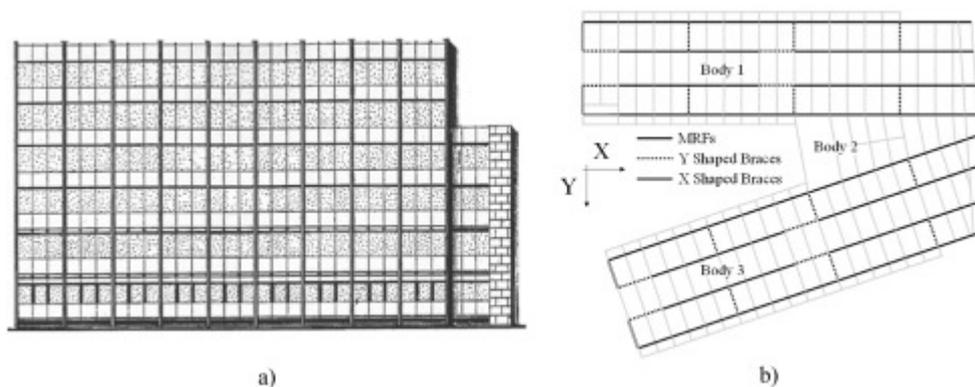


Рисунок 4 – [3] Вид сбоку на объект исследования (а); расположение LFRS (б)

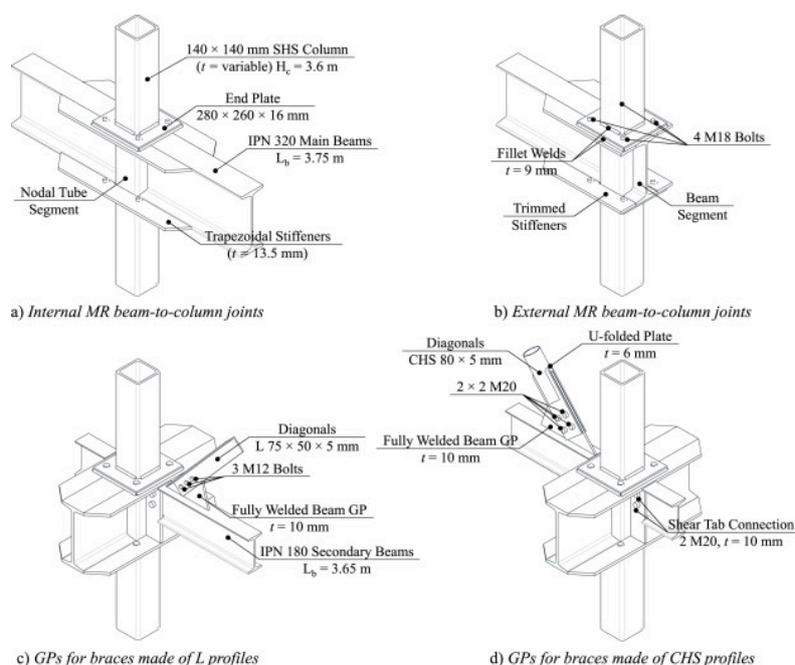


Рисунок 5 – [3] Основные конструктивные элементы: соединения балок с колоннами (а–b), соединения диагоналей с балками (с) и соединения балок с колоннами (d)

В статье [4] оценка влияния ветра на сейсмоизолированное сверхвысотное здание на основе комплексного метода проектирования сейсмоизоляции: всесторонне изучают влияние ветра на сейсмоизолированное высотное здание в Китае. Согласно недавно опубликованному в Китае «Стандарту для сейсмоизоляции при проектировании зданий» (GB/T51408-2021), для проектирования сейсмоизоляции используется комплексный метод проектирования сейсмоизоляции (ISIM), основанный на теории комплексного спектра реакции при наложении мод и комплексной полной квадратичной комбинации. ISIM и традиционные методы проектирования сейсмоизоляции сравниваются с точки зрения экономичности и безопасности. На основе действующих национальных норм предлагается подход к анализу воздействия ветра на сейсмоизолированные высотные здания. Устойчивость сейсмоизолирующего слоя к воздействию ветра рассматривается, когда периоды повторяемости ветровых нагрузок превышают 50-летнюю норму. Результаты исследования показывают, что ISIM значительно повышает сейсмостойкость сейсмоизолированных зданий, кроме того, этот метод экономичен. Проблема дискомфорта при ветровых колебаниях наблюдается на верхних этажах сейсмоизолированных высотных зданий, где сложнее обеспечить комфорт при ветровой нагрузке с периодом повторяемости 1 год по сравнению с ветровыми нагрузками с периодами повторяемости 5 и 10 лет соответственно. Текущий метод проектирования ветровой устойчивости, который по сути является методом статического расчёта, недооценивает

влияние ветра на сейсмоизолированные высотные здания. Комфортность ветровых колебаний и устойчивость к ветровым нагрузкам сейсмоизолированных высотных зданий требуют дополнительной оценки. При проектировании сейсмоизолированных высотных зданий в будущем необходимо учитывать возможные неблагоприятные последствия кумулятивной остаточной деформации, вызванной ветром, для сейсмоизоляции.

Ашауи Юнес в своей статье [5] проиллюстрировал, что заглублённые в почву конструкции (фундаменты, подземные уровни зданий и т. д.) в ближайшем будущем смогут напрямую воздействовать на сам сейсмический сигнал, поступающий в основание зданий. С помощью численных моделей демонстрируется эффект от заглублённого устройства, состоящего из резонирующих железных сфер. Эта способность устройства фильтровать частоты открывает широкие возможности для применения в области взаимодействия грунта и конструкции (ISS), особенно если фундаменты спроектированы как для обеспечения несущей способности, так и в качестве локальных резонансных элементов.

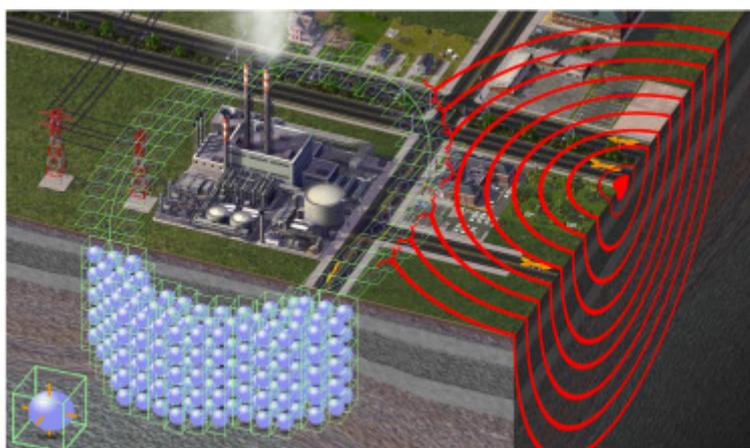


Рисунок 6 – [5] Схематическое изображение сейсмического волнового экрана, состоящего из инерционных резонаторов, расположенных вокруг фундаментов крупных гражданских сооружений. На вставке показана периодическая ячейка с железной сферой, соединённой с массивом бетона или грунта шестью железными или резиновыми связями

В работе [6] показан метод вязкостного демпфирования с использованием рамных домкратов для эффективного снижения сейсмической реакции диспетчерских вышек аэропортов для решения

проблемы уменьшения воздействия на диспетчерские вышки аэропортов предлагается новый подход, определяемый как вязкостный демпфер с рамным домкратом (FJ-EVD). Разработана механическая модель и желаемые свойства усиления деформации FJ-EVD, после чего была построена конструкция башенного типа, оснащенная FJ-EVD. Для изучения преимуществ снижения вибрации при сейсмических воздействиях, характеризующихся различными частотными составляющими, был проведен нелинейный анализ во временной области и параметрическое исследование.

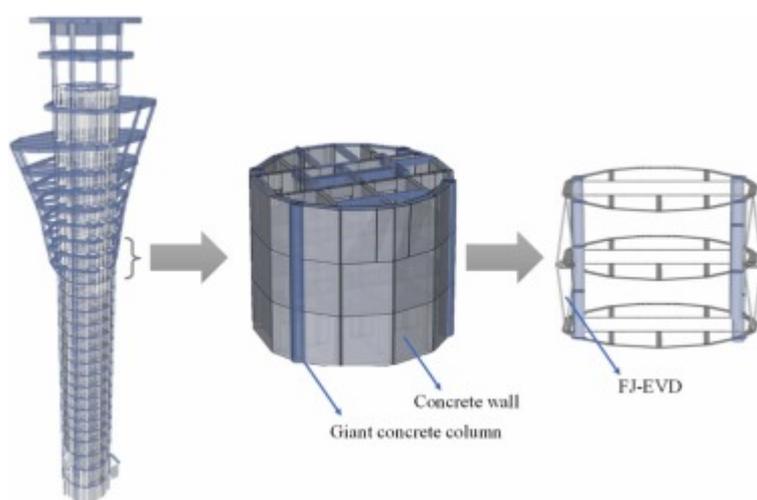


Рисунок 7 – [6] Схема установки нескольких FJ-EVD в диспетчерской вышке аэропорта

В статье [7] система демпфирования на основе инерционных масс для контроля вибрации морских платформ, подверженных воздействию колебаний грунта предлагается использовать инновационную инерционную демпфирующую систему изоляции (IDIS) для сейсмической защиты морских платформ. Концепция IDIS впервые предложена путём интеграции обычных подшипников с инерционными демпферами (ID). Создана аналитическая модель системы и выведены соответствующие уравнения равновесия движения. Без ущерба для общности в качестве целевых показателей эффективности выбраны ускорение палубы, смещение на крышке балластной цистерны и деформация изолирующего слоя, а морские сооружения являются критически важной инфраструктурой в области океанического строительства, которая может подвергаться угрозе землетрясений, особенно если она расположена в зоне повышенного риска.

В статье [8] система нейтрализации колебаний от сейсмических воздействий для высотных зданий предложил систему нейтрализации

колебаний для высотных зданий, подверженных сейсмическому воздействию. Описан принцип её работы и оценены её преимущества. Составлена математическая модель движения несущих и несиловых конструкций. Рассмотрены системы защиты от низкочастотных колебаний под воздействием внешнего гармонического воздействия. Определены оптимальные параметры настройки роликового демпфера в структуре системы компенсации.

В работе Сораче Стефано [9] сейсмическая оценка и модернизация с использованием диссипативных креплений для защиты заполнений и перегородок в железобетонных конструкциях представлено исследование замены кирпичных заполнений и перегородок диагональными ненапряжёнными распорками с нелинейным гистерезисным поведением «поворотного» типа. Для эквивалентных стоек генерируется трехлинейная кривая осевого усилия – смещения и преобразуется в кривую поперечного усилия-смещения панелей. Затем последняя сканируется с точки зрения последовательных пределов производительности и диапазонов. Эта модель демонстративно применяется к реальному тематическому исследованию, т. Е. К зданию с железобетонным каркасом, поврежденному землетрясением в Центральной Италии в 2016 году, хотя за несколько лет до этого были проведены работы по модернизации. На основе результатов анализа временных характеристик в первоначальных условиях предлагается альтернативное решение по модернизации, заключающееся во внедрении диссипативных распорок, оснащенных вязкостными демпферами с под давлением. Эта технология была выбрана из-за ее высокой демпфирующей способности, а также из-за быстрой активации составляющих устройств на ранних стадиях сейсмической реакции здания. Анализ, проведённый в обновлённой конфигурации для основных сейсмических записей землетрясения 2016 года, подтверждает это свойство, демонстрируя незначительные повреждения лишь в небольшом количестве перегородок — вместо распространённых повреждений средней и тяжёлой степени, которые были обнаружены в перегородках и заполнителях здания, — и безопасную реакцию всех конструктивных элементов.

В работе [10] аэродинамическое демпфирование, как основной фактор, определяющий вызванные ветром колебания, имеет огромное значение в строительной инженерии. В этом исследовании представлена новая модульная структура под названием «Глубокая нейронная сеть — генетический алгоритм» (DNN-GA), которая позволяет прогнозировать аэродинамическое демпфирование непосредственно по результатам измерения давления на поверхности и служит одним из первых примеров применения генетических

алгоритмов для прогнозирования аэродинамического демпфирования. Точный прогноз может дать инженерам-строителям более полное представление о потенциальной осуществимости проектов при значительно меньших затратах, что выгодно для проектирования зданий и инженерных решений. DNN-GA демонстрируется на примере аэроупругой конической призмы — нелинейной двунаправленной системы взаимодействия жидкости и конструкции (FSI) с прочными связями с проектированием зданий — с синхронными, высокоточными данными аэродинамической трубы для обучения и прогнозирования. При подаче давления модуль DNN прогнозирует реакцию наконечника в качестве промежуточного результата, на основе которого модуль GA оптимизирует аэродинамическое демпфирование в полностью автоматизированном рабочем процессе. Результаты показали, что DNN-GA превзошёл шесть эталонных алгоритмов машинного обучения как минимум на 400%.—3 Сравнение модуля GA с традиционным методом случайного уменьшения (RDT) показало повышение точности как минимум на 700%. Наконец, DNN-GA предсказал аэродинамическое демпфирование для режимов вихревых колебаний (VIV), галопа и VIV-галопа с максимальной среднеквадратичной и среднеабсолютной погрешностью всего $3,874 \times 10^{-3}$ и $3,053 \times 10^{-3}$, что свидетельствует о превосходной точности метода и его пригодности для сложных, нелинейных и различных типов FSI-колебаний. Учитывая, что DNN-GA работает с данными, он также применим к экспериментальным, числовым и даже полевым данным, что делает его привлекательным инструментом для создания инженерных приложений.

Ольга Поддаева в статье [11] провела ряд экспериментов для оценки динамического поведения моста в ветреную погоду при различных уровнях демпфирования. Композитные материалы обладают лучшими диссипативными свойствами по сравнению с металлами и их сплавами. Во второй части рассмотрели различные способы определения демпфирующей способности материала. Далее провели серию экспериментов, чтобы проанализировать влияние демпфирования композитных материалов на аэродинамическую устойчивость моста.

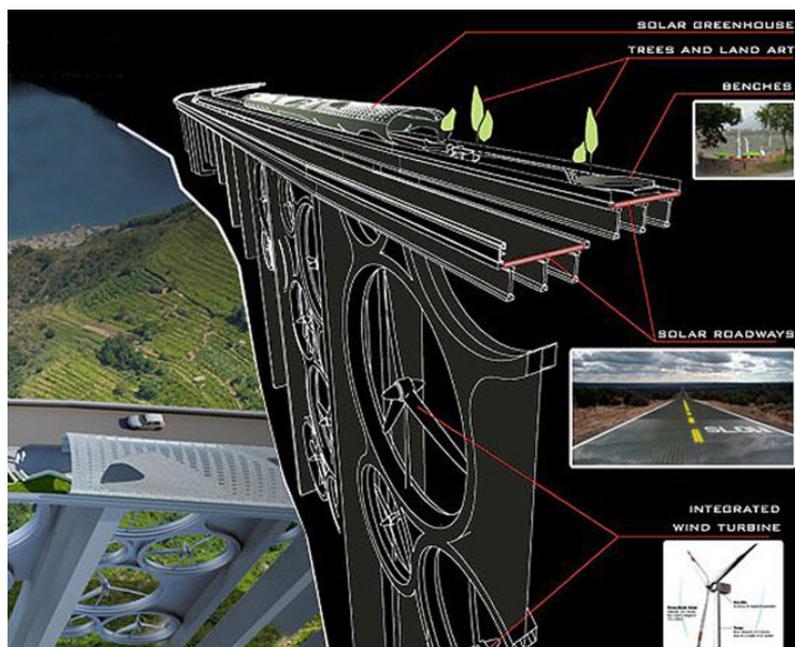


Рисунок 8 – [11] Примеры интеграции фотоэлектрических систем в конструкции мостов

Работа посвящена анализу и оценке результатов исследований в области влияния демпфирующей способности материалов на динамическое поведение мостовых конструкций для их дальнейшего использования как в самих мостовых конструкциях и материалах, из которых они изготовлены, в чистом виде, так и, в том числе, для интеграции в такие конструкции. проектирует фотоэлектрические модули и другие компоненты фотоэлектрических систем.

О. Касабланка [12] в своей работе исследовал периодические фундаментные сваи для сейсмической защиты сооружений в качестве инновационной системы сейсмической защиты. Эта система фильтрует сдвиговые волны в деформируемом грунте в определенном диапазоне частот. Периодическая свая-фундамент состоит из массива вертикальных периодических структурных элементов, содержащих внутренние резонаторы, настроенные на одну или несколько собственных частот грунтового отложения. Предложенная система эквивалентна прерывистой свае-фундаменту и может быть установлена в грунте примерно так же, как и сваи, что делает её пригодной для применения в существующих конструкциях.

В статье [13] были рассмотрены жидкостные вязкоупругие демпферы для сейсмической защиты мостов. Жидкостные вязкостные демпферы (FVD) — это специальные устройства, которые рассеивают энергию за счёт ламинарного течения вязкой жидкости, проходящей через отверстие или клапанную систему под действием поршня. Эти устройства способны рассеивать большое количество энергии, не оказывая существенного влияния на жёсткость конструкции, при этом их реакция строго зависит от скорости.

Цель этой статьи — представить эволюцию FVD для сейсмической защиты мостов, начиная с первых применений пассивных FVD и заканчивая современными устройствами, такими как полуактивные FVD, электрореологические, магнитореологические, демпферы с переменной жёсткостью и демпферы с переменным коэффициентом демпфирования. В связи с тем, что количество доступных устройств постоянно растёт, в этой работе не делается попытка представить полный обзор современного состояния вопроса, а основное внимание уделяется обсуждению основных этапов развития, а также наиболее существенных недостатков. Устройства, выбранные для обсуждения, представлены с исторической точки зрения и, по мнению авторов, являются первыми оригинальными разработками в области сейсмической защиты мостов с помощью демпферов.

В случаях, когда установленные расчетом или выявленные на практике колебания конструкций не удовлетворяют требованиям, обеспечивающим их несущую способность или физиологическим и технологическим требованиям по ограничению уровня вибраций, рекомендуется применять различные способы уменьшения колебаний несущих конструкций. При выборе способа в каждом конкретном случае следует руководствоваться соображениями целесообразности, эффективности и экономичности его применения. Ожидаемые результаты осуществления того или иного мероприятия должны проверяться повторным динамическим расчетом конструкций, т.е. определением амплитуд перемещений и внутренних усилий в измененных условиях.

Основные методы уменьшения колебаний конструкций, вызванных гармоническими нагрузками:

1) Изменение соотношения между частотой вынужденных колебаний и частотами собственных колебаний конструкции (отстройка) путём изменения жесткости, массы или схемы конструкции, а также путем изменения частоты вынужденных колебаний.

2) Изменение расположения и способа крепления машин и установок на несущих конструкциях, передача динамических нагрузок на отдельные фундаменты, колонны, разгрузочные балки и т.п.

3) Устройство эффективной виброизоляции

4) Применение динамических и ударных гасителей колебаний, увеличение демпфирования колебаний, устройство жестких и нежёстких ограничителей

5) Уравновешивание и балансировка машин, создание эксплуатационных условий, препятствующих разбалансировке и образованию

случайных дебалансов, применение специальных устройств, обеспечивающих работу нескольких машин попарно в противофазе.

В настоящий момент активно используется сейсмическая защита, которая тесно связана с применением специальных устройств – энергопоглотителей. Они предназначены для предотвращения колебаний при сейсмической активности за счет развития в материале конструкций неупругих деформаций. Такие системы устанавливаются в узлах конструкций с большой вероятностью возникновения зон упругих деформаций. Большим плюсом таких систем является то, что они компактны их можно использовать в зданиях любой сложности при этом они легки в замене при необходимости.

В статье [14] оценка сейсмических повреждений склеенных и несклеенных многослойных резиновых: взгляд с точки зрения глубокого обучения рассматривают опорные плиты из ламинированной резины (LRB), широко используемые в автомобильных мостах по всему миру, подвержены разрушению при сдвиге, сжатию или смещению во время сейсмических событий, что может поставить под угрозу безопасность моста. Поскольку опорные плиты широко используются в мостах с небольшими и средними пролётами по всему миру, разработка эффективного подхода к оценке повреждений опорных плит имеет решающее значение для оценки сейсмостойкости мостов. Исследования, проведённые после землетрясений в Вэньчуане в 2008 году, Нортридже в 1994 году и Чи-Чи в 1999 году, показали, что опорные плиты действуют как «предохранительный элемент» во время сейсмических событий, что приводит к значительному снижению степени повреждения мостов.

В статье [15] рассмотрены экспериментальные и численные исследования сейсмических реакций конструкций ветряных турбин с усиливающей демпфирующей системой. Ветряная турбина (ВТ) с большим периодом вращения является динамически чувствительной, но слабо демпфированной конструкцией, которая может быть подвержена землетрясениям, особенно при импульсных записях, близких к разломам, содержащих большую амплитуду импульсов скорости с периодом, близким к периоду вращения ВТ. Эффективное и удобное решение для усиления демпфирующего эффекта ВТ — система усиления демпфирования (ADTS) — заключается в передаче верхнего вращения ветряной турбины на её нижнюю часть с помощью механизма усиленного демпфирования. Возможность применения ADTS подтверждается экспериментально с помощью испытаний на свободную вибрацию, синусоидальное возбуждение и испытания на вибростенде как для неимпульсных, так и для импульсных землетрясений.

В исследовании [16] систематически изучается влияние демпфирования на сейсмическую реакцию конструкций с большим периодом колебаний. Для систем с одной степенью свободы, работающих в течение длительного времени, добавление демпфирования в среднем уменьшит относительную деформацию и скорость, но увеличит абсолютное ускорение. Однако явление перекрёстного резонанса, то есть увеличение демпфирования приводит к большей реакции конструкции, будет наблюдаться в спектральном смещении или скорости некоторых определённых колебаний грунта, что более выражено при увеличении периодов колебаний конструкции. Целью данного исследования является систематическое изучение влияния демпфирования на долгопериодические структуры, которое состоит из двух частей. В первой части рассматриваются долгопериодические системы SDOF и рассчитываются DMF реальных движений грунта для оценки эффекта демпфирования. Обсуждается изменение DMFs вместе с коэффициентами демпфирования, и в длиннопериодическом диапазоне выделяются перекрестные явления. Вторая часть касается систем с несколькими степенями свободы (MDOF), проиллюстрированных двумя длиннопролетными вантовыми мостами. Для повышения демпфирования мостовой системы используются линейные вязкостные демпферы (VFD), и оценивается влияние VFD на сейсмостойкость двух мостов. Обсуждаются некоторые важные вопросы, связанные с применением демпфирующих устройств в длиннопериодных конструкциях

В статье [17] выполнена оценка демпфирования восьмиэтажного стального здания с нелинейным масляным демпфером при сильных землетрясениях. Предложен и исследован тип нелинейного масляного демпфера с вязкоупругими полимерными мягкими уплотнениями, который позволяет упростить производство.

В статье [18] рассмотрено снижение вибрации большепролетных мостов с демпфирующими опорами. В этом исследовании предлагается новая концепция дополнительного демпфирования таких мостов для смягчения колебаний за счет демпфирования вращений балки моста во время вертикальных и крутильных колебаний вместо поступательных перемещений, которые ранее были в центре внимания соответствующих исследований. Важным преимуществом этой концепции является то, что во время колебаний повороты мостовой балки вблизи её концов относительно велики, что обеспечивает достаточное дополнительное демпфирование, а также удобство реализации. Концепция реализуется с помощью демпфирующей аутригеры, состоящей из жёсткой аутригеры, жёстко соединённой с мостовой балкой, и горизонтальных демпферов, соединяющих

конец аутригеры с опорой моста или пилонной опорой. Для демонстрации эффекта демпфирования демпфирующих аутригеров на подвесных мостах сначала используется напряжённая балка с ограничениями по вращению.

В работе а Ван Мэн [19] выполнен анализ демпфирования высотных зданий с аутригерами и демпферами с инерцией и отрицательной жёсткостью с учётом взаимодействия грунта и конструкции. В статье анализируют демпфирование затухающих колебаний выносных опор высотных зданий с инерцией и отрицательной жесткостью с учетом взаимодействия грунта и конструкции (SSI). Установлено единое характеристическое уравнение для различных грунтовых условий и выносных систем. Решая унифицированное характеристическое уравнение, можно параметрически исследовать многомодовый эффект демпфирования эффект демпфирования для оценки влияния SSI на высотные здания при установке обычных аутригеров (CO), обычных аутригеров с демпфированием (CDO), аутригеров с демпфированием отрицательной жёсткости (NSDO) и аутригеров с инерционным демпфированием (IDO). Затем оцениваются виброхарактеристики демпфированных систем аутригеров с учётом SSI при ветровых и сейсмических нагрузках. Выделяются два ключевых момента: (i) взаимодействие между качанием грунта и вращением выносных опор в высотных зданиях; (ii) влияние изменения частоты, вызванного SSI, на IDO и NSDO с частотно-зависимыми / независимыми характеристиками. Анализ результатов показывает, что более сильный CO увеличит демпфирующий эффект грунта фундамента, если CO не установлен на нижних этажах. эффект вибрационного режима приведет к тому, что CDO будет сильнее рассеиваться в первом режиме, но ограничит эффект демпфирования CDO в более высоких режимах. IDO может быть эффективным для целевого режима, но очень чувствителен к эффекту SSI из-за своей зависимости от частоты; повторная оптимизация IDO для правильного приведет к тому, что CDO будет сильнее рассеиваться в первом режиме, но ограничит эффект демпфирования CDO в более высоких режимах. Идо может быть эффективная приманка для ловли в целевой режим, но очень чувствительных к воздействию ССИ благодаря частотно-зависимого объекта; повторный-оптимизация Идо правильного режима вибрации всегда необходим для защиты от ветра и землетрясений. Напротив, эффект демпфирования NSDO менее чувствителен к эффекту SSI и может быть эффективен в нескольких режимах благодаря своей частотно-независимой функции. Например, большая часть поступающей энергии от ветра (более 90 %) и землетрясений (более 70 %) будет рассеиваться NSDO, и такие высокие значения практически не меняются

в условиях SSI, что подтверждает, что NSDO может обеспечить эффективный и надёжный контроль над несколькими опасными факторами.

Из-за низкого уровня демпфирования и большой высоты высотные здания, скорее всего, будут подвергаться чрезмерным колебаниям при внешних боковых нагрузках, таких как ветер и землетрясение, что может привести к проблемам с безопасностью (большие смещения), эксплуатационными характеристиками (большие ускорения на этажах и дискомфорт для жильцов) и даже с устойчивостью (остаточная деформация, которую трудно устранить). Чтобы повысить безопасность, эксплуатационные характеристики, устойчивость и даже долговечность высотных зданий, необходимо дополнительное решение для рассеивания энергии. Было признано, что демпфер с настроенной массой (TMD) со вспомогательной массой, прикреплённой с помощью соединительной пружины и демпфера, эффективен для контроля ветровых колебаний высотных зданий; поэтому во многих известных высотных зданиях, таких как башня Джона Хэнкока, Ситикорп-центр, Тайбэй-101 и Шанхайская центральная башня, применение TMD стало реальностью. Тем не менее, эффективность TMD в борьбе с землетрясениями оспаривается уже давно, поскольку известно, что TMD чувствителен к изменению частоты и может быть эффективен только для целевого режима, но может снижать эффективность при других режимах вибрации. В связи с этим были предприняты большие усилия по использованию активного, полуактивного или адаптивного TMD для обеспечения сейсмостойкости. Например, для контроля крутильных колебаний асимметричных конструкций недавно был предложен двунаправленный полуактивный TMD (BSTMD) с адаптивной жёсткостью, переменной массой и полуактивным демпфированием.

Лин Пао-Чун в статье [20] рассмотрел оптимальную конструкцию системы с несколькими демпфирующими аутригерами, включающими ограничивающие прогиб распорки. Система аутригеров является эффективным решением для смягчения последствий землетрясений для высотных зданий за счет мобилизации осевой жесткости периферийных колонн при сейсмическом воздействии сейсмической энергии. Была предложена концепция демпфированных аутригеров, в которой в систему аутригеров вводятся демпферы для рассеивания энергии. В этом исследовании рассматривается система демпфированных аутригеров с использованием распорок, ограничивающих прогиб (BRB-аутригеры). Эффект выносных опор в сочетании с механизмом рассеивания энергии распорки, препятствующей потере устойчивости (BRB), эффективно снижает сейсмостойкость здания. В этом исследовании предлагаются методы

оценки неупругой сейсмостойкости конструкций с несколькими демпфирующими выносными опорами на основе процедуры спектрального анализа (SA). Для конструкции с выносными опорами BRB оптимальными являются такие высоты выносных опор и соотношения между осевой жёсткостью BRB, осевой жёсткостью периферийной колонны и жёсткостью на изгиб основной конструкции, которые минимизируют сейсмическое воздействие. Это является основной целью данного исследования.

В статье [21] исследуется настраиваемый жидкостный демпфер для снижения вибрации сейсмоактивных конструкций на мягком грунте. Целью исследования является изучение потенциала использования настраиваемого жидкостного демпфера (TLD) в качестве меры по смягчению последствий для уменьшения повреждений конструкций на мягком грунте. Демпфирующие экраны устанавливаются в TLD в качестве устройства для демпфирования потока (FDD) для повышения способности рассеивать энергию. Для моделирования взаимодействия жидкости и резервуара используется эквивалентная модель импульсных и конвективных масс, в то время как модель конуса используется для моделирования грунта под несущими фундаментами.

В работе [22] выполнено численное моделирование и экспериментальная проверка гибридного демпфера с квадратичным затуханием скорости для контроля вибрации высотных зданий. Гибридные массовые демпферы (ГМД), которые сочетают в себе настраиваемые массовые демпферы с активными массовыми демпферами (АМД), установленными сверху, используются для контроля вибрации в высотных зданиях. Однако при различных нагрузках ход и сила управления ГМД могут превышать их расчётные пределы, что потенциально снижает эффективность управления. Типично ограниченное внутреннее пространство высотных конструкций ещё больше усугубляет эту проблему. Для решения этой проблемы в данном исследовании предлагается НМД с демпфированием в квадрате скорости (VSD-HMD), который сочетает в себе устройство демпфирования в квадрате скорости (VSDD) с АМД. Создана численная модель башни Canton Tower, управляемой VSD-HMD, и представлено оптимальное соотношение между силой и скоростью VSDD. Для оценки производительности системы с использованием линейно-квадратичной гауссовой стратегии управления.

Ли Мао в статье [23] предложил новый пассивный вязкостный демпфер с переменным коэффициентом демпфирования, зависящим от скорости, и подтверждён испытаниями. Разработал численную модель вязкостного демпфера с переменным демпфированием, выполнил структурный анализ

высотного здания с вязкостным гасителем колебаний переменной степени демпфирования, подвергнутого ветровой нагрузке. Высотные здания подвержены низкочастотным колебаниям, вызванным ветровой нагрузкой, и традиционный вязкостный демпфер с постоянным коэффициентом затухания (CDVD) не справляется с эффективным подавлением колебаний высотных зданий при ветровых нагрузках из-за постоянного коэффициента затухания. Для решения этой проблемы был разработан и изготовлен новый вязкостный демпфер с переменным коэффициентом затухания (VDVD). Для оценки характеристик переменного затухания при различных скоростях были проведены испытания. Эффективность управления VDVD в высотных зданиях при ветровых нагрузках с переменным давлением ветра смоделирована и проанализирована в сравнении с CDVD.

Лю Вэй в статье [24] предлагает сейсмический контроль конструкций, изолированных от основания, с использованием не зависящих от скорости демпфирующих устройств: модель инерционно-вязкого демпфера с отрицательной жёсткостью Максвелла — Вейхерта (IvNsMW) и модель инерционно-вязкого демпфера RILD. Эти модели различаются по способу соединения инерционного и вязкостного демпферов. Представлен метод прямого расчёта для определения коэффициентов этих двух устройств. Эффективность предложенных устройств на основе RILD для сейсмоизоляции низкочастотных конструкций была изучена на примере многоэтажного здания с изолированным фундаментом. Результаты показывают, что предложенные устройства на основе RILD являются перспективными инструментами для контроля смещения и ускорения низкочастотных конструкций.

Шаленный В. Т. в патенте на изобретение [25] представил кинематическую трубобетонную сейсмоизолирующую опору на монолитном железобетонном фундаменте. Кинематическая трубобетонная сейсмоизолирующая опора на монолитном железобетонном фундаменте, состоящая из колонны в трубобетонном варианте и шарнирных узлов, составляющих с гасителями колебаний единое целое, выполненных из стальных листов прокатной стали, размещенных в нижней и верхней частях колонны, причем гасители одновременно являются поглотителями энергии и ограничителями горизонтальных и вертикальных перемещений, а также закладной детали фундамента со слоем подливки между ними, отличающаяся тем, что гаситель колебаний снабжен промежуточной шайбой из мягкого металла, а упомянутая закладная деталь фундамента - кольцевой прокладкой, выполненной из упругого материала, зафиксированной в пространстве между ней и ограничителем перемещений.

Е.В. Денисов в своей статье [26] рассматривает проблему демпфирования колебаний строительных конструкций. На основе анализа математической модели системы с двумя степенями свободы предложена конструкция гасителя колебаний элементов балочного типа, установленных при реконструкции на фасаде ДП КСКЦ «Концерн Стирол». Согласно архитектурной идее фасада данные элементы представляют несвязанные между собой консоли вылетом 6–7 м и подвержены эффектам вихревого возбуждения колебаний в ветровом потоке, при которых могут возникать устойчивые вибрации повышенного уровня поперек ветрового потока. Произведены натурные динамические испытания работы конструкций с гасителями колебаний и без них с целью получения информации об эффективности применения предложенных устройств.

В [27] проведен сравнительный анализ работы одномассового осциллятора и монолитного железобетонного здания с сейсмоизоляцией в виде скользящего пояса в уровне фундамента, резинометаллических и маятниковых скользящих опор при сейсмическом воздействии. При проведении исследования использовался прямой динамический метод, основанный на явной схеме интегрирования уравнения движения (метод центральных разностей). Получены графики относительных сдвиговых перемещений нижнего, среднего и верхнего яруса пяти- и шестнадцатиэтажного здания с резинометаллическими и маятниковыми скользящими опорами, скользящим поясом в уровне фундамента, а также картины с изополями интенсивности напряжений для всего здания и наиболее нагруженного этажа. Анализ полученных результатов показал, что для рассматриваемых ситуаций, эффективность применения сейсмоизолирующего скользящего пояса уступает эффективности резинометаллических и маятниковых скользящих опор. Однако, принимая во внимание относительную простоту конструкции, устройства, обслуживания и сметную стоимость скользящего пояса, данный вид сейсмоизоляции может конкурировать с резинометаллическими и маятниковыми скользящими опорами.

Статья [28] посвящена моделированию динамического поведения стержней, выполненных из полимер-композитных материалов. В качестве модели внутреннего трения материала используется модель нелокального демпфирования. Колебательный процесс рассматривается на примере стержня, жёстко защемлённого по концам. Уравнение движения стержня, построенное с учётом нелокального демпфирования, решается методом Бубнова-Галёркина. Определяется количество форм собственных колебаний, учёт которых необходим для достижения требуемой точности расчёта. В

статье рассматривается влияние изменения параметров модели нелокального демпфирования на характеристики процесса колебаний стержня под действием детерминированной периодической нагрузки. Процесс калибровки модели нелокального демпфирования, заключается в определении её параметра на основании данных численного эксперимента. В качестве численного эксперимента использовались результаты трёхмерного конечно-элементного моделирования колебаний стержня, выполненного из терморезистивного винилэфирного стеклопластика, нагруженного мгновенно приложенной

равномерно распределённой нагрузкой. Трёхмерная конечно-элементная модель стержня была построена в расчётном комплексе с учётом ортотропных свойств композитного материала. Достоверность откалиброванной модели подтверждалась на стержнях с изменёнными геометрическими характеристиками. Результаты, приведённые в статье, получены в ходе диссертационного исследования, выполненного автором.

В работе [29] ставилась задача разработки методов, алгоритмов и программного обеспечения для решения задач оптимального гашения колебаний сосредоточенных и распределенных систем по различным критериям при действующих возмущениях из заданного класса. В диссертации решалась задача о предельных возможностях виброзащиты в системах с сосредоточенными и распределенными параметрами для класса внешних воздействий. Решена двухкритериальная задача гашения колебаний консольной балки с помощью безмассового активного динамического гасителя. Решена двухкритериальная задача оптимального гашения колебаний систем с распределенными параметрами с помощью пьезоэлектрических актюаторов.

В [30] разбираются плюсовые и минусовые качества различных способов гашения колебаний упругих амортизаторов, виброгасителей ударного действия, демпферов вязкого трения, резино-металлических опор и т.п. В частности, по демпферам вязкого трения отмечено: гидравлические демпферы в основном выполняются в виде поршневых и дроссельных. Основные их преимущества: хорошее демпфирование; линейная зависимость вязкого сопротивления, от скорости колебаний. К недостаткам следует отнести: большой температурный коэффициент вязкости рабочей жидкости; возможные при больших нагрузках кавитационные разрывы жидкости, нарушающие гармонический характер колебаний.

В [31] проводится экспериментальное сравнение локальных и модальных систем управления изгибными колебаниями балки. Приведено численное исследование локальных и модальных систем управления и

различных вариантов моделирования пьезоэлементов. Приведен алгоритм численного решения задачи о колебаниях шарнирно-опертой балки.

В [32] ставилась цель: повысить производительность подъемно-транспортных механизмов путём оптимизации цикла транспортировки. Для этого разработана система гашения колебаний груза при его перемещении для мостового подъемного крана.

В [33] разработана математическая модель вибростенда с инерционным возбуждением и предложены аналитические соотношения. Для оценки динамических свойств вводится передаточная функция межпарциальных связей. Настройка вибрационного поля осуществляется путем выбора массоинерционных параметров, связанных с моментом инерции рабочего стола, его массой и расположением центра тяжести. Для контроля параметров динамического состояния механической колебательной системы используются передаточные функции и частотные характеристики. Концепция управления параметрами вибрационного поля основана на использовании эффектов динамического гашения колебаний. Получены условия для снижения нагрузок на возбудитель и обеспечения необходимого уровня управляемости в выборе параметров вибрационного поля рабочей зоны вибростола. Предлагается методика расчета. Приведены результаты численного эксперимента.

В [34] рассмотрен процесс вибрационного гашения колебаний сосредоточенного тела посредством динамического ударного виброгасителя, содержащего систему последовательных ударных пар, в которых соударяющиеся элементы представляют собой магниты. Рассмотрено влияние выбора проектируемых параметров виброгасителя на колебания тела. Описаны особенности настройки системы в режим широкой полосы виброгашения. Ключевые слова: динамическое гашение колебаний, магнитная ударная пара, последовательные ударные пары, сила ударного взаимодействия. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №19- 19-00065).

В [35] рассматривается задача о снижении уровня вибраций на лапах электрических машин с помощью динамических гасителей колебаний. Для этого лапа электрических машин представляется в виде подамортизированного твердого тела с шестью степенями свободы, установленного на вязкоупругих опорах. Как известно, суть метода динамического гашения колебаний заключается в том, чтобы за счет присоединения к объекту виброзащиты дополнительных устройств (массы) добиться изменения его вибрационных характеристик. Целью работы является разработка алгоритмов и комплекса программ для исследования

динамических характеристик механических систем с конечным числом степеней свободы.

В [36] анализируется возможность гашения маятниковых колебаний груза, перемещаемого краном мостового типа с релейным приводом при единичном включении привода на разгон и последующем единичном торможении до нулевой скорости с постоянными ускорениями. Приводятся результаты исследования влияния постоянных значений ускорений разгона, торможения и максимальной скорости движения привода отдельной управляемой координаты мостового крана на время перемещения, длину перемещения и остаточную амплитуду колебаний груза при условии минимизации последней. Рассматривается расчетный случай минимального возможного единичного включения привода на разгон и единичного выключения привода при торможении.

В исследовании [37] предлагается использовать дополнительные устройства рассеивания массы (AMD) для управления нелинейными динамическими характеристиками. Концепция AMD предполагает установку вспомогательной системы демпфирования массы поверх основной конструкции. Разработан аналитический подход для определения оптимальных конструктивных параметров AMD для линейных и нелинейных систем с одной степенью свободы с использованием методов оптимизации H_2 и H_∞ . Для оценки возможностей снижения динамических характеристик используются методы передаточной функции и гармонического баланса. По сравнению с оптимально спроектированными устройствами по более ранней технологии, предлагаемые AMD с оптимизацией H_2 и H_∞ демонстрируют значительно более эффективное снижение вибрации, достигая снижения динамических характеристик на 77 % и 73,71 % соответственно. Численная проверка Newmark-beta подтверждает, что AMDs превосходят CTMDs на 16,06 % в плане минимизации вибраций конструкции. Новая концепция AMD в сочетании с разработанными оптимальными конструктивными решениями предлагает высокоэффективную стратегию контроля вибрации как для линейных, так и для нелинейных конструктивных систем, подверженных гармоническим и случайным воздействиям. Это аналитическое решение открывает путь для практического применения AMD для повышения безопасности конструкций и долговечности при воздействии внешних динамических нагрузок.

В работе [38] были изучены следующие виды дополнительных демпфирующих устройств: фрикционные демпфирующие устройства (FDD), металлические демпфирующие устройства (MDD), вязкоупругие устройства (VED) и устройства для работы с вязкой жидкостью (VFD). Несмотря на то,

что доступны механизмы установки нескольких устройств, в этой статье более подробно рассматриваются методы установки устройств. В этой статье описывается стандартная методика установки, т.е. метод Лавана Такеваки (LTt), и простой алгоритм последовательного поиска (SSSA).

В [39] предлагается новая регулируемая жидкостная заслонка с демпфирующей сеткой и наклонным дном (DNS-TLD) в качестве альтернативы традиционной регулируемой жидкостной заслонке (TLD). Затем проводится сейсродинамический временной анализ многоэтажного сооружения, оснащенного DNS-TLD, для проверки его эффективности при фактическом контроле снижения сейсмической нагрузки на конструкцию. Как испытания на вибростоле, так и результаты численного моделирования демонстрируют, что DNS-TLD превосходит другие типы TLD с точки зрения демпфирующих характеристик, эффективности, надежности и инженерной применимости.

В [40] в качестве элемента регулировки жесткости, является сплав с памятью формы (SMA). В данном исследовании для устранения вибрации в неподвижной балке использовались пружины, изготовленные из сплава с эффектом памяти формы. Вместо обычной пружины была использована пружина SMA с массой, и эксперименты проводились на различных частотах. Было проведено сравнение результатов анализа гармонического отклика в диапазоне частот. Экспериментальные и аналитические результаты хорошо согласуются, когда для эффективного демпфирования системы используется одна пружина SMA или две пружины SMA, соединенные параллельно или последовательно. Результаты этой работы могут быть использованы в качестве ориентира при проектировании амортизатора с нитиноловой (с памятью) пружиной в качестве компонента настройки жесткости в условиях, когда требуется плавная и непрерывная настройка амортизатора.

В [41] заключается, что надежная оценка сейсмических характеристик конструкций требует количественной оценки случайных и эпистемологических неопределенностей параметров системы. Сначала формируется современная численная модель с полной пространственной параметризацией ее прочностных свойств и свойств пластической деформации. Эмпирические зависимости, полученные на основе экспериментальных данных, используются для моделирования циклического поведения стальных профилей с использованием вероятностно распределенных параметров, которые включают внутри- и межкомпонентную корреляцию. Наконец, для точной оценки сейсмических характеристик модели под влиянием неопределенностей используются пошаговый динамический анализ и моделирование методом Монте-Карло.

В статье [42] представлена стратегия контроля вибрации мостов, которая включает в себя внедрение инерционного усилителя для снижения вибрации, вызываемой поездом. В исследовании всесторонне оценивается эффективность двух типов вибропоглотителей, а именно пружинно-массового резонатора (SMR) и инерционных усилителей (IA), с использованием безразмерной структуры, основанной на механике. В дальнейшем в исследовании использовался адаптивный генетический алгоритм эвристического поиска (GA) для определения оптимальных конструктивных параметров предлагаемых вибропоглотителей.

В статье [43] обычные строительные материалы, такие как сталь и бетон, могут демонстрировать неадекватные эксплуатационные характеристики в виде коррозии, износа, окисления и т.д. Сплавы с памятью формы (SMA) - это новые металлы, обладающие отличительными свойствами и желательным потенциалом для преодоления недостатков существующих конструкционных материалов и позволяющие конструкции более эффективно переносить повреждения. Эффект памяти формы (SME) и псевдоупругость (PE) были наиболее привлекательными характеристиками, на которые обратили внимание ученые среди различных свойств, присущих SMA. SME позволяет материалу сохранять свою первоначальную форму после сильной деформации, в то время как PE-свойства SMAs обеспечивают широкий диапазон деформации при одновременном снижении значительного количества возможных напряжений. Такие свойства являются следствием фазового превращения. Было проведено множество исследований по моделированию и применению SMAS в конструкционных системах, позволяющих выдерживать прикладываемые динамические нагрузки в виде активных, пассивных и гибридных систем контроля вибрации. Целью данной статьи является представление обзора приложений на основе SMA и наиболее часто используемого структурного моделирования, а также их ограничений в устройствах контроля вибрации конструкций и сейсмоизоляции.

В исследовании [44] представлена оптимальная стратегия проектирования для снижения сейсмических воздействий в современных конструкциях за счет стратегического использования гидровязких демпферов (FVD) и вязкостных стеновых демпферов (VWD). Задача оптимизации сформулирована таким образом, чтобы минимизировать скалярную сумму трех составляющих: количества амортизаторов, общего коэффициента смещения между этажами и абсолютного ускорения от пола. Конструктивные параметры определяют типы амортизаторов и их расположение в конструкции. Для эффективного решения этой задачи оптимизации был внедрен и применен алгоритм расширенного поиска симбиотических

организмов (ExSOS), включающий изменения на трех этапах. Численные примеры на полномасштабных моделях 10-этажных зданий. Полученные результаты подчеркивают важность точной настройки распределения и количества демпферов для достижения оптимальных сейсмических характеристик, что указывает на потенциальную применимость к более крупным или сложным сооружениям.

В статье [45] показывается, что вибрация и динамическая нестабильность по-прежнему являются постоянными проблемами, которые накладывают некоторые ограничения на технологию турбин. В этом документе представлен критический и актуальный обзор проблем вибрации ветряных турбин и стратегий борьбы с ней, а также комплексный анализ событий, произошедших с 2015 года по настоящее время. Обзор охватывает всестороннее изучение проблем, связанных с вибрациями ветряных турбин, и рассматривает как существующие, так и появляющиеся решения, включая устройства и инновации с открытым исходным кодом, обеспечивая современную основу для дальнейших исследований и разработки динамических методов и методов контроля вибрации в контексте ветроэнергетики.

В [46] представлен полуактивный электромеханический гаситель колебаний массы (SATMD), состоящий из комбинированного пружинно-пьезоэлектрического устройства, подключенного к внешней резистивно-индуктивной электрической цепи, предназначенный для обеспечения надежных возможностей мультимодального подавления вибрации в больших гибких конструкциях. Комбинированное пружинно-пьезоэлектрическое устройство обеспечивает жесткость резонансной массы, а также электромеханическое преобразование энергии и связь. Разработана структурная динамическая модель суперпозиции режимов пониженного порядка, связанная с устройством SATMD и электрической схемой шунтирования RL, для моделирования реакции интегрированной структурной системы. Возможности предлагаемого SATMD по широкополосному подавлению вибраций были оценены численно и экспериментально на упрощенной модели планера в уменьшенном масштабе. Получена очень хорошая корреляция между численными и измеренными результатами. Результаты показывают, что конфигурация SATMD с дополнительной массой, равной 1% от массы конструкции, и комбинированным резистивно-индуктивным сопротивлением обеспечивает существенное одновременное подавление вибрации в диапазоне трех низкочастотных режимов конструкции и может быть легко перенастроена с учетом изменений параметров конструкции и нагрузки в полете

В [47] констатируется, что снижение вибраций конструкции является одной из основных задач при управлении конструкцией. Для этой цели предлагаются различные методы управления. Среди множества методов управления полуактивные являются очень привлекательными и выгодными, поскольку они требуют минимального количества энергии, но при этом способны значительно уменьшить смещения конструкции. В этой статье поведение конструкции, оснащенной новым типом полуактивного настраиваемого демпфера массы, называемого SADA-TMD, сравнивается с поведением конструкции, оснащенной активным настраиваемым демпфером массы (ATMD). SADA-TMD - это TMD, оснащенный полуактивным демпферным приводом (SADA). Это устройство может поглощать энергию, передаваемую на обычный TMD во время землетрясений, и использовать его в качестве привода; оно также может гасить любую часть этой поглощенной энергии. Для сравнения было проведено численное моделирование многоэтажного здания. Производительность SADA-TMD и ATMD управляется контроллером с нечеткой логикой (FLC). Преимущества использования SADA-TMD для уменьшения структурных реакций показаны на иллюстрациях и численных результатах. Однако результаты, полученные при применении SADA-TMD, можно сравнить с результатами использования активных демпферов массы (ATMD), поскольку SADA-TMD является полуактивным устройством, потребляемая мощность которого значительно ниже, чем у ATMD. Следует отметить, что, поскольку SADA-TMD может работать от аккумулятора, он более надежен, чем ATMD, во время сильных землетрясений, поскольку источник энергии, необходимый для активного привода, может выйти из строя во время этих землетрясений.

В статье [48] исследуются нелинейные вибрационные характеристики тонкой пластины из многослойного металлического волокна (FMLTP), обработанной накладками с ограниченным демпфирующим слоем (CLD). Кроме того, на основе нелинейной теории материалов Джонса-Нельсона и геометрической нелинейной теории Кармана создана теоретическая модель для FMLTP с участками CLD, учитывающая нелинейность материала. Используя энергетический метод, формулируется уравнение энергии и методом Ньютона-Рафсона итеративно определяются нелинейные собственные частоты и вибрационные характеристики исследуемой конструкции при различных амплитудах возбуждения. Кроме того, с использованием метода комплексного модуля рассчитываются коэффициенты демпфирования. Для проверки эффективности модели была сконструирована соответствующая система тестирования, и испытания были проведены на 5-слойном TA2/TC500 FMLTP, обработанном двумя

пластырями CLD. Результаты испытаний показали отличное соответствие теоретическим результатам. Наконец, обсуждается влияние различных методов обработки пластырей CLD на вибрационные характеристики FMLTP.

В [49] в сочетании с адаптивным маятниковым амортизатором переменного трения (AVFPI) предлагается простая и практичная механическая модель. После применения механической модели с моделью влияния, зависящей от трения, предложена усовершенствованная процедура анализа спектра отклика (IRS) для маятниковых изолирующих систем с переменным трением. Примечательно, что предложенная процедура позволяет учитывать влияние изменений скорости, температуры и давления на характеристики трения без необходимости анализа истории нелинейных откликов (NRHA). Процедура начинается с получения численной модели зависимости трения с помощью исследований фрикционных материалов, затем переходят к проверке надежности как зависимости трения, так и механической модели с помощью испытаний прототипа AVFPIs. Неспособность учесть влияние зависимости от трения в условиях высоких температур приводит к недооценке смещения скольжения изолятора и последующему увеличению частоты отказов. Широко используемые в настоящее время фрикционные материалы из политетрафторэтилена (PTFE) демонстрируют сильную зависимость от трения и, как следствие, вызывают относительно большие смещения при низких и высоких температурах.

В [50] представлен геометрический подход для проектирования и определения размеров инерционных демпферов, которые будут применяться к мультимодальным структурным генераторам колебаний. Их демпфирующий эффект зависит от того факта, что отклик вторичного генератора колебаний (демпфера) задерживает отклик основной массы, подлежащей управлению, на 90° , так что упругая сила, передаваемая демпфером, превращается в вязкую силу, действующую на управляемый генератор колебаний. Когда возникает такое условие, мы говорим, что демпфер "настроен" на основной генератор; демпфирование, создаваемое демпфером, невелико и служит лишь для ограничения смещения основного генератора. Такой геометрический подход представляет собой метод, язык которого близок к языку строительной механики, что позволяет профессионалам: (i) определять параметры демпфера; и (ii) оценивать устойчивость демпфируемой системы и пределы ее производительности. Целью разработки является изучение использования демпферов для управления начальными режимами реагирования зданий на горизонтальные сейсмические и аэродинамические нагрузки. Введя концепцию одномассивного генератора, эквивалентного заданному режиму вибрации, мы разработали мультимодальную многоамперную модель,

которую затем используем для выполнения численных оценок. В связи с изменением ширины полосы пропускания и интенсивности внешнего воздействия рассматривается несколько стратегий управления (включая изменение количества и положения заслонок). В работе обсуждаются преимущества и ограничения этого пассивного подхода к управлению конструкцией.

В [51] отмечается, что вязкоупругие демпферы (VED) привлекли к себе значительное внимание в последние десятилетия из-за их огромного потенциала в области контроля вибрации строительных конструкций. Однако из-за того, что температура и частота существенно влияют на характеристики VED, их широкое применение затруднено. Расширение температурного диапазона демпфирования матричных вязкоупругих демпфирующих материалов (VDMS) является ключом к расширению их применения. Развитие полимерных и наноматериалов открывает новые возможности для повышения демпфирующих характеристик VDMs. Более того, в расчетных моделях также следует учитывать различные влияющие факторы. Таким образом, в этой статье критически рассматриваются современные исследования в области технологий модификации VDMS. Кроме того, в этой статье всесторонне обобщены линейные и нелинейные определяющие модели VDMS. Кроме того, предлагаются разработки VDMs. Наконец, рассматриваются тенденции и направления развития VDMs и VEDs.

В исследовании [52] в основном рассматривается совместное воздействие землетрясения и ударной нагрузки на железобетонную конструкцию. Вызванные землетрясением вибрации конструкции усиливаются после ударной нагрузки. Также проводится параметрическое исследование конструкции с учетом возможных сочетаний нагрузок от землетрясения и взрыва. Кроме того, в этом исследовании обсуждается численное решение вышеупомянутой проблемы, которое укрепляет фундаментальные знания и дает инженерам-строителям более глубокое представление о сценарии многопараметрической нагрузки, рассмотренной в этом исследовании.

В статье [53] делается попытка нащупать общий подход к сейсмостойкости: с фундаментальной динамикой и стратегиями управления сейсмостойкими конструкциями, уделяя особое внимание влиянию возбуждения и нелинейным эффектам. Сначала рассматривается фундаментальная структурная динамика с управляющими силами при сейсмическом возбуждении. Затем, в качестве базовой стратегии управления конструкциями, рассматриваются эффекты линейных законов управления с обратной связью. Далее, вводя наименьший квадратичный регулятор (LQR),

учитывающий влияние возбуждения, управление с наименьшей потребляемой энергией и LQR на короткий промежуток времени при заданной информации о возбуждении, разъясняются роли FB, мгновенной контрреакции и прямой связи (FF). Кроме того, делается вывод о том, что трудно однозначно решить задачи оптимизации с учетом ограничения усилия управления, и уравнения Эйлера для оптимального управления переменными элементами становятся нелинейными. Также показано, что можно построить расширенный закон управления FB, используя модель уравнения состояния для информации о возбуждении. В этом случае ожидается не только дополнительный эффект демпфирования, но и диссонансный эффект при сейсмическом возбуждении. Кроме того, вводятся достаточные условия устойчивости для нелинейных законов управления.

В работах [54..56] рассматривалась работа ленточно-тросового гасителя колебаний с программной и практической точки зрения. В [57] определялось наиболее эффективное направление силы, действующей в тросе на защищаемый узел. В [58] оцениваются оптимальные по величине внешние силовые воздействия через ленточно-тросовую систему на защищаемые узлы с целью подбора параметров гасителей, для генерации внутренних сил противодействия колебательным движениям. В работах [59..64] анализировалась работа реактивных гасителей при сейсмических нагрузках. При этом для решения исходных систем уравнений движения применялись прямые шаговые методы. В исследовании [65] разбирается методика построения, упрощения, а также аналитического и численного решений системы дифференциальных уравнений движения при кинематическом возбуждении колебаний. В статьях [66-67] приведены вывод соотношений МКЭ для композитного стержня с пластическими накладками и иллюстрации гашения колебаний плоских и пространственных стальных стержневых систем, вызванных стационарными и нестационарными воздействиями природного и техногенного характера, включая действие нерегулярных импульсов. При этом практическая борьба с развитием колебаний осуществляется при помощи алюминиевых полосовых накладок - устройств гашения колебаний пассивного типа: генераторов моментов сопротивления движению для гашения и низкочастотных и высокочастотных колебаний. Показано, что данная система гашения работает на всем спектре колебаний. Высокая эффективность разработанных устройств подтверждается данными экспериментальных исследований.

Выводы.

Курильские острова и Сахалин, полуостров Камчатка, Северный Кавказ и побережье Чёрного моря, Забайкалье, Алтай и Тыва, Якутия – сейсмоопасные районы на территории России, т.е. районы где периодически происходят землетрясения. Землетрясения характеризуются мощными колебаниями земной поверхности, вызываемыми внезапным высвобождением значительного количества энергии в недрах планеты, что может повлечь серьезные разрушения зданий и сооружений.

Полноценное решение проблемы сохранности зданий и сооружений может быть достигнуто за счет двух основных направлений: обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений на этапе проектирования, а также неукоснительного соблюдения строительных норм и требований к качеству и содержанию выполнения работ. При этом, на стадии проектирования необходимо не только проводить пространственный сейсмический расчет всех многоэтажных зданий, но и обеспечить их системами гашения колебаний.

Анализ научных исследований в области демпфирования сейсмических колебаний свидетельствует о значительных усилиях, направленных на защиту зданий и сооружений от динамических нагрузок. Однако, по-прежнему остается недостаточно изученным ряд аспектов этой проблемы.

Библиографический список:

1. Ju-Seong Jung. Seismic capacity evaluation of a reinforced concrete frame infilled with precast modular block wall for enhancing the horizontal load / Ju-Seong Jung, Chul-Seung Kwak, Woo-Young Lim, Kang-Seok Lee // Journal of Building Engineering Volume 97, 15 November 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224025294>
2. Mohammad Froozanfar. Review of self-centering rocking systems for earthquake-resistant building structures: State of the art / Mohammad Froozanfar, Saber Moradi, Reza Kianoush, Matthew S. Speicher, Luigi Di Sarno // Journal of Building Engineering. Volume 84, 1 May 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022400175X>
3. Aldo Milone. Seismic upgrade of a non-code compliant multi-storey steel building: A case study /Aldo Milone, Roberto Tartaglia, Mario D'Aniello, Raffaele

Landolfo // Journal of Building Engineering. Volume 95, 15 October 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224017194>

4. Jiajun Tan. Evaluation of wind-induced effect on seismically isolated super high-rise building based on integrated seismic isolation design method: A case study / Jiajun Tan, Ping Tan, Jiurong Wu, Demin Feng // Journal of Building Engineering. Volume 76, 1 October 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223014559>

5. Younes Achaoui. Seismic waves damping with arrays of inertial resonators / Younes Achaoui, Bogdan Ungureanu, Stefan Enoch, Stéphane Brûlé, Sébastien Guenneau // Extreme Mechanics Letters. Volume 8, September 2016 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352431616300281>

6. Kai Yang. Frame jack-enhanced viscous damping approach for efficient seismic response mitigation of airport control towers / Kai Yang, Zhenhua Xu, Yijia Ma, Minjun Wu, Zhipeng Zhao, Chao Luo // Structures. Volume 66, August 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012424010117>

7. Ruisheng Ma. Inerter-based damping isolation system for vibration control of offshore platforms subjected to ground motions / Ruisheng Ma, Kaiming Bi, Haoran Zuo, Xiuli Du // Ocean Engineering. Volume 280, 15 July 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801823011101>

8. O.A. Burtseva. Roller Seismic Impact Oscillation Neutralization System for High-rise Buildings / O.A. Burtseva, A.N. Tkachev, S.A. Chipko // Procedia Engineering. Volume 129, 2015. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815039302?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8d74c92eac29e313

9. Stefano Sorace. Seismic assessment and dissipative bracing retrofit-based protection of infills and partitions in RC structures / Stefano Sorace,

Iacopo Costoli, Gloria Terenzi // *Engineering Structures*. Volume 281, 15 April 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029623001955>

10. Zengshun Chen. Machine-learning prediction of aerodynamic damping for buildings and structures undergoing flow-induced vibrations / Zengshun Chen a, Likai Zhang, Ke Li, Xuanyi Xue, Xuelin Zhang, Bubryur Kim, Cruz Y. Li // *Journal of Building Engineering*. Volume 63, Part A, 1 January 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710222013808>

11. Olga Poddaeva. Damping capacity of materials and its effect on the dynamic behavior of structures. Review / Olga Poddaeva, Anastasia Fedosova // *Energy Reports*. Volume 7, Supplement 5, November 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484721005849>

12. O. Casablanca. Periodic foundation piles for the seismic protection of structures / O. Casablanca // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Volume 182, July 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026772612400294X>

13. L. Zoccolini. Fluid Viscous Dampers for seismic protection of bridges: a State of the Art / L. Zoccolini, E. Bruschi, C. Pettoruso, D. Rossi, V. Quaglini // *Procedia Structural Integrity*. Volume 62, 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321624006784>

14. Bingzhe Zhang. Seismic damage assessment of bonded versus unbonded laminated rubber bearings: A deep learning perspective / Bingzhe Zhang, Guanya Lu, Cancan Yang, Mingsai Xu, Kehai Wang // *Engineering Structures*. Volume 321, 15 December 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S014102962401558X>

15. Pi-Guang Wang. Experimental and numerical investigations on seismic responses of wind turbine structures with amplifying damping transfer system / Pi-Guang Wang, Hai-Qiang Lu, Meng Wang, Satish Nagarajaiah, Xiu-Li Du // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Volume 175, December

2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0267726123005225>

16. Jiang Yi. Effect of damping on the seismic response of long-period structures considering crossover phenomena / Jiang Yi, WenJing Xu // *Engineering Structures*. Volume 293, 15 October 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029623010428>

17. Yunjia Tong. Damping evaluation of an eight-story steel building with nonlinear oil damper under strong earthquakes / Yunjia Tong, Songtao Xue, Liyu Xie, Hesheng Tang // *Journal of Building Engineering*. Volume 67, 15 May 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223001833>

18. Lin Chen. Vibration mitigation of long-span bridges with damped outriggers / Lin Chen, Zhanhang Liu, Satish Nagarajaiah, Limin Sun, Lin Zhao, Wei Cui // *Engineering Structures*. Volume 271, 15 November 2022. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029622009506>

19. Meng Wang. Damping dissipation analysis of damped outrigger tall buildings with inerter and negative stiffness considering soil-structure-interaction / Meng Wang, Chao Liu, Mi Zhao, Fei- Fei Sun, Satish Nagarajaiah, Xiu-Li Du // *Journal of Building Engineering*. Volume 88, 1 July 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710224007939>

20. Pao-Chun Lin. Optimal design of multiple damped-outrigger system incorporating buckling- restrained braces / Pao- Chun Lin, Toru Takeuchi, Ryota Matsui // *Engineering Structures*. Volume 194, 1 September 2019. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029619303438>

21. Ayman Abd-Elhamed. Tuned liquid damper for vibration mitigation of seismic- excited structures on soft soil / Ayman Abd- Elhamed, Mohamed Tolan / *Alexandria Engineering Journal*. Volume 61, Issue 12, December 2022. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016822002253>

22. Zhenfeng Lai. Numerical simulation and experimental verification of a velocity-squared damping hybrid mass damper for vibration control of high-rise buildings / Zhenfeng Lai, Yanhui Liu, Zhipeng Zhai, Huating Chen, Jianhui Wang // Engineering Structures. Volume 312, 1 August 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029624007818>

23. Mao Li. A variable damping viscous damper for control of buildings under wind loading / Mao Li, Mingmei Shi, Weiqing Fu // Journal of Building Engineering. Volume 97, 15 November 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710224025282>

24. Wei Liu. Seismic control of base-isolated structures using rate-independent damping devices / Wei Liu, Yi-Qing Ni, Kohju Ikago, Wai Kei Ao // Journal of Building Engineering. Volume 78, 1 November 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223019241>

25. Шаленный В.Т. Кинематическая трубобетонная сейсмоизолирующая опора на монолитном железобетонном фундаменте / Шаленный В.Т., Андронов А.В., Семенов С.Ю., Жаринов В.Д. // Патент на изобретение №2773487. 2022. URL: <https://science.cfuv.ru/wp-content/uploads/2022/07/Буклет-Строительные-тех.-№-13-2022.pdf>

26. Денисов Е.В. Динамический гаситель колебаний длинномерных конструкций балочного типа / Е.В. Денисов, С.А. Фоменко. // Механика. Научные исследования и учебно-методические разработки. Выпуск 8. 2014. URL: <http://elib.bsut.by/bitstream/handle/123456789/3488/Денисов%20Е.%20В.%20Динамический%20гаситель%20колебаний.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

27. Мкртычев О.В. Железобетонные здания с сейсмоизолирующим скользящим поясом в уровне фундамента/ Олег Вартанович МКРТЫЧЕВ , Салима Рафиловна МИНГАЗОВА //Промышленное и гражданское строительство, 2023, №4 с. 9-15 УДК 624.012.4:624.92:699.841 doi: 10.33622/0869-7019.2023.04.09-15

28. Шепитько Е.С. Калибровка модели нелокального демпфирования материала с использованием данных численного эксперимента // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №3,

<https://t-s.today/PDF/16SATS319.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI:10.15862/16SATS319A

29. Петраков Егор Владимирович. Оптимальное гашение колебаний механических систем с распределенными параметрами // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. 01.02.06 - Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

30. Катпин А. Краткий обзор устройств гашения колебаний / Катпин А., Мойзес //XX Международная научно-практическая конференция «Современные техника и технологии».-Томский политехнический университет, г. Томск

31. Федотов Александр Васильевич. Гашение колебаний в распределенных упругих системах с использованием пьезоэлектрических сенсоров и актуаторов // Диссертация на соискание уч. степени к.т.н. по специальности 05.11.16, - Санкт- Петербург.- 2020

32. Федорещенко Н. В. Гашение колебаний груза подъемно-транспортных механизмов // iPolytech Journal.- 2023

33. Елисеев Андрей Владимирович Динамическое гашение колебаний в структуре системы возбуждения вибраций / Елисеев Андрей Владимирович, Каимов Евгений Витальевич, Нгуен Дык Хуинь, Выонг Куанг Чык //Информационные и математические технологии в науке и управлении/ - 2016.

34. Юрий Михайлович Замурагин. Гашении колебаний посредством системы с большим числом свободных соударяющихся магнитных элементов / Юрий Михайлович Замурагин, Александр Михайлович Гуськов, Виталий Львович Крупенин //Bulletin of Science and Technical Development., www.vntr.ru № 10 (146), 2019 16 DOI: 10.18411/vntr2019-146-3 УДК 534.015 О

35. Сафаров И. И. Динамическое гашение колебаний твёрдого тела, установленного на вязкоупругих опорах / Сафаров И. И., Тешаев М. Х. // Известия вузов. ПНД. 2023. Т. 31, вып. 1. С. 63-74. DOI: 10.18500/0869-6632-003021, EDN: BGFGGN

36. Виталий Сергеевич Щербаков. Гашение маятниковых колебаний груза мостового крана с релейным приводом при минимальном числе включений / Виталий Сергеевич Щербаков, Михаил Сергеевич Корытов, Елена Олеговна Шершнева//Научный рецензируемый журнал "Вестник Сибади". [https://doi.org/10.26518/2071-7296-2015-4\(44\)-38-45](https://doi.org/10.26518/2071-7296-2015-4(44)-38-45)

37. Sudip Chowdhury Enhancing seismic resilience of nonlinear structures through optimally designed additional mass dampers / Sudip Chowdhury, Arnab Banerjee, Sondipon Adhikari // International Journal of Non-Linear Mechanics.- June 2024

38. Khalil Yahya Mohammed Almajhali Review on passive energy dissipation devices and techniques of installation for high rise building structures //Structures.-May 2023

39. Hao-ding Sun Theoretical and experimental research on vibration control of the tuned liquid damper with damping net and sloped-bottom/ Hao-ding Sun, Hao-xiang He, Qing Cao //Journal of Building Engineering.- January 2024.

40. Shivam Shukla Experimental and numerical Comparison of traditional spring DVA and shape memory alloy actuated DVA for fixed beam vibration control / Shivam Shukla, Rahul Barjibhe// Materials Today: Proceedings.Available online 26 February 2023

41. A. K. Kazantzi. Seismic performance of a steel moment-resisting frame subject to strength and ductility uncertainty/ A. K. Kazantzi, D. Vamvatsikos, D. G. Lignos// Engineering Structures1 November 2014

42. Susmita Panda Design and optimization of inertial amplifier for enhanced vibration control of bridges under moving loads/ Susmita Panda, Arnab Banerjee, Bappaditya Manna// Applied Mathematical Modelling January 2025

43. Alireza Tabrizikahou. Application and modelling of Shape-Memory Alloys for structural vibration control: State-of-the-art review/ Alireza Tabrizikahou, Mieczysław Kuczma, Shaofan Li// Construction and Building Materials1 August 2022
44. Vin Nguyen-Thai, An effective optimum design for passive viscous damping control using FVDs/VWDs in multi-story buildings // Vin Nguyen-Thai, Duy-Khuong Ly, T. Nguyen-Thoi // Structures.- September 2024
45. M. R. Machado. Wind turbine vibration management: An integrated analysis of existing solutions, products, and Open-source developments / M. R. Machado, M. Dutkiewicz // Energy Reports.- June 2024
46. Grigorios M. Chatziathanasiou, A semi-active shunted piezoelectric tuned-mass-damper for multi-modal vibration control of large flexible structures/ Grigorios M. Chatziathanasiou, Nikolaos A. Chrysochoidis, Dimitris A. Saravanos// Journal of Sound and Vibration.-27 October 2022
47. H. R. Owji, A Comparison between a New Semi-Active Tuned Mass Damper and an Active Tuned Mass Damper / H. R. Owji, A Hossain Nezhad Shirazi, H. Hooshmand Sarvestani// Procedia Engineering.-2011
48. Dawei Gu, Chen Chu, Bangchun Wen A nonlinear vibration model of fiber metal laminated thin plate treated with constrained layer damping patches
49. Kui Yang, Improved response spectrum analysis procedure for an adaptive variable friction pendulum isolated structure considering frictional dependency/ Kui Yang, Ping Tan, Yafeng Li //Soil Dynamics and Earthquake Engineering.-April 2024
50. A. Carotti Phasors-techniques design of inertial passive dampers for tower buildings. Stability and performance evaluations/ A. Carotti, E. Turci// Soil Dynamics and Earthquake Engineering.-June 1998
51. Hengyuan Zhang, Modification technologies and constitutive models of viscoelastic damping materials: Progress and future trends/ Hengyuan Zhang, Aiqun Li, Tao Liu// Construction and Building Materials.-30 August 2024

52. Shivani Verma, Vulnerability analysis of earthquake-driven blast load on a reinforced concrete structure/ Shivani Verma, Manmohan Dass Goel, Nikhil Ninad Sirdesai // Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings.-13 December 2022

53. Kazuhiko Yamada, Takuji Kobori Fundamental dynamics and control strategies for aseismic structural control/ Kazuhiko Yamada, Takuji Kobori// International Journal of Solids and Structures. -August 2001

54. Шеин А.И. Инерционно преднатяжительная полиэстерно-ленточная система гашения колебаний циклически симметричных конструкций купольного типа [Электронный ресурс] / А.И. Шеин, А.В. Чуманов // Моделирование и механика конструкций. – 2019. – № 10. URL: <http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no-10-nov-2019/matematiceskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/10.1/view>

55. Шеин, А.И. Ленточная система гашения колебаний для закрытых куполов / А.И. Шеин, А.В. Чуманов, В.А. Монахов // Региональная архитектура и строительство. – 2021. – № 1 (46). – С. 122-129.

56. Шеин, А.И. Колебания закрытых куполов с ленточной системой гашения колебаний [Электронный ресурс] / А.И. Шеин, А.В. Чуманов // Моделирование и механика конструкций. – 2020. – №12. URL: <http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no12-noyabr-2020/matematiceskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/12.1/view>

57. Шеин, А.И. Эффективное расположение ленточно-тросового гасителя колебаний [Электронный ресурс] / А.И. Шеин, А.В. Чуманов // Моделирование и механика конструкций. – 2021. – №14. URL: <http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no14-dekabr-2021/stroitel'naya-mehanika/14.2/view>

58. Шеин А.И. Определение параметров ленточно-тросового гасителя с торсионом или гидроцилиндром одностороннего действия /

Шеин А.И., Чуманов А.В., Земцова О.Г. //Региональная архитектура и строительство. 2023. № 2 (55). С. 69-76.

59. Шеин, А.И. Оценка эффективности активного жидкостного гасителя колебаний высотных сооружений при нестационарных воздействиях / А.И. Шеин, Д.А. Шмелев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2014. – №1.

60. Шеин, А.И. Сравнительная оценка работоспособности реактивного жидкостного гасителя колебаний при сейсмических колебаниях башен, заданных акселерограммами / А.И. Шеин, Д.А. Шмелев // Актуальные проблемы механики в современном строительстве: сборник трудов Международной конференции. – Пенза, 2013. – С.175-185.

61. Шеин, А.И. Активный жидкостный гаситель колебаний высотных сооружений при сейсмических воздействиях / А.И. Шеин, О.Г. Земцова, Д.А. Шмелев, Р.Х. Рахматуллин //Актуальные проблемы современного строительства: сборник трудов Международной конференции. – Пенза, – 2013. – С.365-367.

62. Alexander Shein. Damping vibrations of a hyperbolic cooling tower using a reactive damper /Alexander Shein, Olga Zemtsova, Alexander Chumanov, Mikhail Frolov// E3S Web of Conferences", "Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies EMMFT 2023". – Volume 458– //doi.org/10.1051/e3sconf/202345808014. – 2023 г.

63. Шеин А.И. Математическое моделирование работы реактивного гасителя колебаний башни градирни / Шеин А.И., Зайцев М.Б. [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2023. №17. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no17/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/17.01/at_download/file.

64. Shein Alexander Ivanovich, Damping of seismic vibrations of towers using a controlled reactive dampener. / Shein Alexander Ivanovich, Zaitsev Mikhail Borisovich, Tamrazyan Ashot Georgievich and Matseevich Tatiana

Anatolyevna. //Journal of Structural Engineering. – Vol. 50, –No. 3, – August - September 2023, pp. 177-183.

65. Shein A. Equations of motion of the system “structure – reactive vibration dampener”/ Shein A.// E3S Web of Conferences. 2024. T. 549. С. 01006.

66. Шейн А.И., Чуманов А.В. Численные эксперименты по гашению колебаний рамных каркасов с помощью пластических накладок, установленных на элементы каркаса // Моделирование и механика конструкций. 2018. № 7. С. 2.

67. Шейн А.И. [Три новых способа гашения колебаний зданий и сооружений](#) / Шейн А.И., Чуманов А.В., Зайцев М.Б. // [Региональная архитектура и строительство](#). 2024. [№ 3 \(60\)](#). С. 81-89.