

На правах рукописи



Чуманов Александр Васильевич

**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ СТАЛЬНЫХ
КУПОЛООБРАЗУЮЩИХ И ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КАРКАСОВ
ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Пенза – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства».

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор
Шеин Александр Иванович

Официальные оппоненты: – **Пшеничкина Валерия Александровна**,
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО
«Волгоградский государственный технический
университет» (ВолгГТУ), заведующий кафедрой
«Строительные конструкции, основания и
надёжность сооружений»

– **Мурашкин Василий Геннадьевич**,
кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО
«Самарский государственный технический
университет», (СамГТУ), доцент кафедры
«Железобетонные конструкции»

Ведущая организация – Акционерное общество «Научно-
исследовательский центр «Строительство»,
г. Москва

Защита состоится 26 мая 2023 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.356.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, дом 28, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/index.php/contact-us/24-2-356-01/120-1702-chumanov-aleksandr-vasilevich>.

Автореферат разослан 25 марта 2023 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Снежкина
Ольга Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования

Опыт строительства каркасных зданий и сооружений в сейсмически опасных районах показывает, что для их защиты от разрушений под воздействием землетрясений необходимо применять меры сейсмической защиты. В качестве защитных устройств широко применяются пассивные динамические гасители колебаний. Однако эти гасители эффективны только в узком диапазоне рабочих частот колебаний. Применение активных гасителей колебаний более результативно, но существенно более дорого и трудоёмко в обслуживании. Поэтому необходима разработка более универсальных в работе, эффективных и относительно недорогих способов гашения колебаний, построение и развитие теории, вычислительных методов расчёта механической безопасности зданий и сооружений.

Помимо этого, здания с различными несущими конструктивными системами нуждаются в специфических системах гашения колебаний. В частности, в связи с ростом количества купольных сооружений и набирающим популярность на территории России купольным жилищным домостроением, такие здания и сооружения нуждаются в специальных гасителях. Здесь снижение размаха колебаний можно обеспечить при помощи системы односторонних связей – ленточно-тросовой системы. В радиолокационной технике крайне важными и необходимыми являются локаторы, представляющие собой открытые купола. Для их стабильной работы в условиях землетрясений и взрывных воздействий можно использовать ленточно-тросовую конструкцию гашения колебаний, обеспечивающую работу локаторов без помех и перебоев.

В строительной практике широко распространены здания с рамным стальным каркасом. Для гашения колебаний таких каркасных зданий целесообразно также использовать специальную конструктивную систему демпфирования – пластические накладки.

При высоких скоростях деформирования прочностные характеристики материалов конструкций изменяются. А при возникновении больших деформаций значения напряжений в элементах конструкций могут превышать предел упругости, а зависимость напряжений от деформаций становится нелинейной. Поэтому, для описания динамики таких конструкций необходим учет нелинейных факторов. Это требует модернизации прямых методов решения дифференциальных уравнений колебательного движения механических систем.

Таким образом, требования безопасной эксплуатации зданий и сооружений делают актуальными и важными разработку новых способов гашения колебаний

стальных куполообразующих и прямоугольных каркасов и точного нелинейного динамического расчета их работы.

Степень разработанности темы исследования

Проблеме гашения колебаний зданий и сооружений посвящены работы многих российских и зарубежных ученых. Значительный вклад в развитие теории гашения колебаний внесли А.М. Алексеев, И.В. Ананьев, Ю.А. Гопп, А.В. Дукарт, В.В. Карамышкин, Б.Г. Коренев, Н.А. Пикулев, А.И. Олейник, Б.В. Остроумов, А.Ф. Потехин, Л.М. Резников, А.К. Сборовский, В.Б. Сегаль, В.П. Терских, Ю.Т. Чернов, J.E. Brock, F.M. Lewis, F.E. Reed, J.C. Snowdon, G.V. Warburton и др. Однако проблема предотвращения развития колебаний стальных куполообразующих и прямоугольных каркасов остается открытой вследствие небольшого количества реально адаптированных решений сейсмической защиты.

Необходима разработка универсальных в работе, эффективных и относительно недорогих способов гашения колебаний, построение и развитие теории вычислительных методов расчёта механической безопасности конструкций и конструктивных систем зданий и сооружений.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка ленточно-тросового и пластически демпфирующего способов гашения колебаний куполов, стальных рамных каркасов и других сооружений.

Разрабатываемые системы гашения колебаний должны обладать:

- эффектом тормозящей или удерживающей связи;
- повышенной способностью рассеивания энергии колебаний.

Для создания таких гасителей потребовалось решить следующие задачи:

1. Разработать ленточно-тросовый способ гашения колебаний зданий и сооружений, для которого будет возможна промышленная применимость.

2. Разработать математические модели и программы расчета «сооружение – гаситель» для решения задач динамики строительных конструкций в условиях нестационарных внешних воздействий.

3. Модернизировать прямые методы решения дифференциальных уравнений колебательного движения механической системы для учета нелинейных факторов.

4. Разработать механическую систему демпфирования колебаний каркасных зданий с помощью пластических накладок.

5. Провести серию численных и натурных экспериментов по проверке работоспособности систем «сооружения – гаситель» в условиях вынужденных колебаний зданий и сооружений.

6. Выявить рациональное расположение элементов систем гашения на каркасах зданий для повышения эффекта демпфирования.

7. Оценить эффективность применения новых систем гашения колебаний строительных конструкций.

Научная новизна исследования

В работе предложены методики расчёта механической безопасности конструкций и конструктивных систем зданий и сооружений при чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях, а именно:

1. Разработан и экспериментально обоснован новый способ гашения колебаний каркасов куполообразных зданий и сооружений ленточно-тросовой системой, создающей дополнительные односторонние силовые воздействия на защищаемые узлы несущих конструкций, препятствующие колебательным движениям этих узлов. Разработана методика нахождения рационального положения такого гасителя.

2. Впервые предложен и численно апробирован способ демпфирования колебаний каркасных зданий с помощью пластических накладок, основанный на непрерывном рассеивании энергии колебаний при пластическом деформировании этих пластин.

3. Предложен и численно проверен модифицированный метод переменных параметров упругости для решения задачи динамики зданий и сооружений с учетом геометрической и физической нелинейностей и высоких скоростей деформирования.

Теоретическая и практическая значимость работы

В работе содержится решение научной задачи развития теории механической безопасности конструктивных систем зданий и сооружений путем гашения колебаний стальных каркасов и изложены новые научно обоснованные технические решения гасителей колебаний, имеющие важное значение для развития строительной отрасли. В частности,

1. разработанные новые способы и теория гашения колебаний могут быть использованы при эксплуатации прямоугольных и куполообразующих каркасов зданий и сооружений для предотвращения развития недопустимых перемещений узлов;

2. на основе новых способов гашения колебаний разработан программный комплекс, предназначенный для динамического определения положения узлов сооружения, реализованный с использованием пакета прикладных программ Matlab;

3. разработанный программный комплекс позволяет проводить вычислительные эксперименты с системами сооружение-гаситель колебаний, что сокращает затраты на проведение опытно-конструкторских работ и натурных испытаний.

Методология и методы диссертационного исследования

Для решения поставленных задач использовались общенаучные и экспериментальные методы исследования, основанные на фундаментальных положениях науки о создании и совершенствовании рациональных типов конструкций, строительной механики, теории математического моделирования, теории и методов оценки напряжённого состояния зданий и сооружений, в том числе при чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях.

Положения, выносимые на защиту

– Способ гашения колебаний куполов ленточно-тросовой системой с преднатяжителями и гидроцилиндром одностороннего действия.

– Модифицированный метод переменных параметров упругости для учета физической и геометрической нелинейностей при высоких скоростях движения механической системы.

– Способ гашения колебаний рамных каркасов с помощью пластических накладок и результаты численных экспериментов.

– Программный комплекс расчета колебаний системы «сооружение–гаситель» и результаты численных исследований.

Степень достоверности результатов исследования обеспечена комплексом взаимодополняющих методов и результатами экспериментальных исследований, привлечением количественного и качественного анализа результатов экспериментов. Для проверки выдвинутых положений в работе были проведены численные и натурные эксперименты с математическими и физическими моделями способов гашения колебаний. Полученные эмпирические данные позволили сделать оригинальные выводы.

Внедрение результатов исследования

Тросовая система односторонних демпфирующих связей применена в виде связей стального каркаса производственного здания цеха железобетонных изделий в проекте компании ООО «Проект58».

Объектом исследования является конструктивная система «сооружение – гаситель» с ленточно-тросовым демпфером или пластически деформирующимися накладками для гашения колебаний несущих каркасов. Предметом исследования являются демпфирующие свойства конструктивной системы «сооружение – гаситель» с ленточно-тросовым демпфером или пластически деформирующимися накладками, изучаемые на динамических расчетных моделях с помощью численных методов и физического эксперимента.

Апробация работы

Результаты исследований докладывались на международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современного строительства» (г. Пенза, 2017-2019 гг.); II и IV Национальных научно-практических конференциях «Актуальные проблемы науки и практики в различных отраслях

народного хозяйства» (г. Пенза, 2019 г., 2021 г.); Всероссийской (национальной) научно-технической конференции «75 лет высшему строительному образованию Пензенской области» (г. Пенза, 2019 г.).

Публикации

Основные результаты и выводы диссертационной работы изложены в семи научных публикациях, в том числе в четырех работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук; в трех научных работах в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в международной базе данных и системе цитирования SCOPUS.

Структура и объём работы

Диссертация изложена на 155 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 177 наименований, двух приложений (на восьми страницах), содержит 43 рисунка и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна работы и её теоретическая и практическая значимость.

В первой главе рассматривается современное состояние проблемы гашения колебаний для различных типов сооружений и гасителей колебаний, анализируются существующие методики расчета динамического отклика зданий и сооружений на сейсмические, ветровые и специальные воздействия.

В вопросе моделирования устройств по гашению колебаний и виброизоляции различных промышленных объектов современной наукой накоплен значительный потенциал. Значительный вклад в развитие теории динамических гасителей колебаний внесли А.М. Алексеев, И.В. Ананьев, Ю.А. Гопп, А.В. Дукарт, В.В. Карамышкин, Б.Г. Коренев, Н.А. Пикулев, А.И. Олейник, Б.В. Остроумов, А.Ф. Потехин, Л.М. Резников, А.К. Сборовский, В.Б. Сегаль, В.П. Терских, Ю.Т. Чернов, P. Lieber, D.P. Jensen, A.Z. Paget и др.

Моделирование многомассовых гасителей колебаний исследовалось в работах Б.Г. Коренева, А.В. Дукарта, А.И. Олейника, А.И. Шеина.

Ряд работ В.В. Василевского, И.С. Доронина, А.Н. Щербакова, Б.В. Остроумова был направлен на разработку методик и алгоритмов определения оптимальных параметров гасителей колебаний по критерию минимума амплитуды или ускорений.

Большинство гасителей пространственных колебаний сооружений являются нелинейными механическими системами. Теория нелинейных гасителей

колебаний рассматривалась в работах К.В. Аврамова, О.В. Гендельмана, А.В. Дукарта, А.М. Гуськова, Г.Я. Пановко, А.А. Засядко, Б.Г. Коренева, А.Н. Блехермана, А.И. Шеина.

Для численного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений движения механических систем используются методы Рунге-Кутты, метод центральных разностей, метод Ньюмарка, метод линейного ускорения (метод Вилсона), метод Хоболта, метод смещенных разностей и др.

Таким образом, проблеме гашения колебаний зданий и сооружений посвящены работы многих российских и зарубежных ученых. Однако проблема предотвращения развития колебаний стальных куполообразующих и прямоугольных каркасов остается открытой вследствие небольшого количества реально адаптированных решений сейсмической защиты.

Во второй главе предлагается новая инерционно преднатяжительная ленточно-тросовая система гашения колебаний куполов, в частности куполов открытого типа – локаторов. Ленты из полиэстера практически не влияют на «зрение» локатора. Крепление инерционных катушек с преднатяжителями осуществляется в крайних точках контура (обода) циклически симметричной системы несущей конструкции локатора или в крайних и центральной точках.

При взрывной или при сейсмической нагрузке параболоидная поверхность локатора начинает деформироваться, а противоположные узлы крепления лент гасителя начинают сближаться или, наоборот, удаляться по отношению друг к другу. Для снижения уровня колебательного движения локаторов при взрывных воздействиях используем ленточные гасители колебаний.

Лента пассивной системы безопасности, оснащенная инерционными катушками, преднатяжителями и торсионными, предотвращает развитие колебаний. Материал ленты – волокна полиэстера (с возможным армированием волокнами бора или углеволокна). Этот материал отличается высокими показателями на разрыв и способен выдерживать большие нагрузки.

Инерционная катушка с преднатяжителем самостоятельно регулирует натяжение ленты, выбирая лишнюю часть. При ослаблении натяжения (например, взрыв сзади) срабатывают преднатяжители, которые натягивают ленты вместе с тем, как поверхность параболоида вращения совершает движение в сторону от взрыва. Преднатяжители наматывают отрезки ленты длиной 100–150 мм в течение 10–15 мс. Если сила, воздействующая на ленту, больше, чем предельно допустимое усилие натяжения, то процесс натяжения останавливается. Эти устройства работают на опережение и для этого используются датчики ударной волны, подающие сигнал на блок управления. Тот, в свою очередь, задействует исполнительные механизмы, и они мгновенно натягивают ленту. Преднатяжители сматывают и натягивают ленту (трос) до тех пор, пока продольная сила в ленте

(тросе) не примет заданного значения N . Система гашения позволяет осуществлять разматывание ленты (троса) только при действии силы сопротивления, что и создает эффект гашения колебаний.

Такую силу сопротивления движению может, например, создавать поршневой гидроцилиндр одностороннего действия. Характерная особенность такого гидроцилиндра заключается в том, что усилие на выходном штоке, возникающее при нагнетании в рабочую полость жидкости под давлением, может быть направлено только в одну сторону (рабочий ход). В противоположном направлении шток перемещается, вытесняя при этом жидкость из гидроцилиндра, только под влиянием возвратной пружины. Таким образом, гасится накопленная энергия деформации купола.

Расчет открытых куполов производился с учетом физической и геометрической нелинейности при помощи модифицированного метода переменных параметров упругости, алгоритм которого заключается в следующих действиях:

1. Методом центральных разностей определяем перемещения узлов механической системы в моменты времени

$$U_{t+\Delta t} = \left(\frac{M}{(\Delta t)^2} + \frac{C}{2 \cdot \Delta t} \right)^{-1} \cdot \left(P_t - M \cdot \frac{U_{t-\Delta t} - 2 \cdot U_t}{(\Delta t)^2} + C \cdot \frac{U_{t-\Delta t}}{2 \cdot \Delta t} - K(U_{t-\Delta t}) \cdot U_t \right). \quad (1)$$

На первом шаге итерации по параметрам упругости используем упругое решение с начальным модулем упругости E .

2. По значениям перемещений (направление перемещений показано на рисунке 1) определяем составляющие деформации ε_x :

$$u_i' = \frac{u_{i7} - u_{i1}}{l_i}; \quad (2)$$

$$w_i'' = \left(2 \cdot \frac{-3 \cdot u_{i3} - 2 \cdot u_{i5} \cdot l_i + 3 \cdot u_{i9} - 3 \cdot u_{i11} \cdot l_i}{(l_i)^2} + 3 \cdot \frac{2 \cdot u_{i3} + u_{i5} \cdot l_i - 2 \cdot u_{i9} + u_{i11} \cdot l_i}{(l_i)^3} x \right); \quad (3)$$

$$v_i'' = \left(2 \cdot \frac{-3 \cdot u_{i2} - 2 \cdot u_{i6} \cdot l_i + 3 \cdot u_{i8} - 3 \cdot u_{i12} \cdot l_i}{(l_i)^2} + 3 \cdot \frac{2 \cdot u_{i2} + u_{i6} \cdot l_i - 2 \cdot u_{i8} + u_{i12} \cdot l_i}{(l_i)^3} x \right); \quad (4)$$

$$w'_i = u_{i5} + 2 \cdot \frac{-3 \cdot u_{i3} - 2 \cdot u_{i5} \cdot l_i + 3 \cdot u_{i9} - 3 \cdot u_{i11} \cdot l_i}{(l_i)^2} x + 3 \cdot \frac{2 \cdot u_{i3} + u_{i5} \cdot l_i - 2 \cdot u_{i9} + u_{i11} \cdot l_i}{(l_i)^3} x^2; \quad (5)$$

$$v'_i = u_{i6} + 2 \cdot \frac{-3 \cdot u_{i2} - 2 \cdot u_{i6} \cdot l_i + 3 \cdot u_{i8} - 3 \cdot u_{i12} \cdot l_i}{(l_i)^2} x + 3 \cdot \frac{2 \cdot u_{i2} + u_{i6} \cdot l_i - 2 \cdot u_{i8} + u_{i12} \cdot l_i}{(l_i)^3} x^2; \quad (6)$$

$$\varepsilon_{x,i} = u'_i - y \cdot v''_i + z \cdot w''_i + \frac{1}{2} \cdot (v'_i)^2 + \frac{1}{2} \cdot (w'_i)^2. \quad (7)$$

Деформации целесообразно определять в наиболее удаленных точках сечения.

Например, для прямоугольного сечения $z = \pm \frac{b}{2}$, $y = \pm \frac{h}{2}$; где b и h – ширина и высота прямоугольного сечения,

3. Определяем напряжения:

$$\sigma_{x,i} = E \cdot \varepsilon_{x,i} - E_3 \cdot (\varepsilon_{x,i})^3. \quad (8)$$

Параметр E_3 зависит от предела прочности, который в соответствии с моделью Купера-Саймондса зависит от скорости деформирования.

4. Определяем секущие модули упругости для элементов конструкции:

$$E_i = \frac{\sigma_{x,i}}{\varepsilon_{x,i}}. \quad (9)$$

5. Выполняем проверку:

$$|E_i - E_{i-1}| \leq \delta. \quad (10)$$

Алгоритм апробирован на серии численных экспериментов при ударном внешнем воздействии. Модель ударного воздействия воздушной волны представляет собой сосредоточенные силы, приложенные к узлам стержневой системы, направленные перпендикулярно плоскости внешнего кольца локатора. При этом, в связи с природой возникновения данного воздействия, величина нагрузки от ударной волны является переменной величиной, которая уменьшается с течением времени и достигает нуля через определенный отрезок времени после достижения фронтом воздушной ударной волны защищаемой конструкции. Узловая нагрузка формируется от избыточного давления во фронте воздушной ударной волны и времени действия ударной волны.

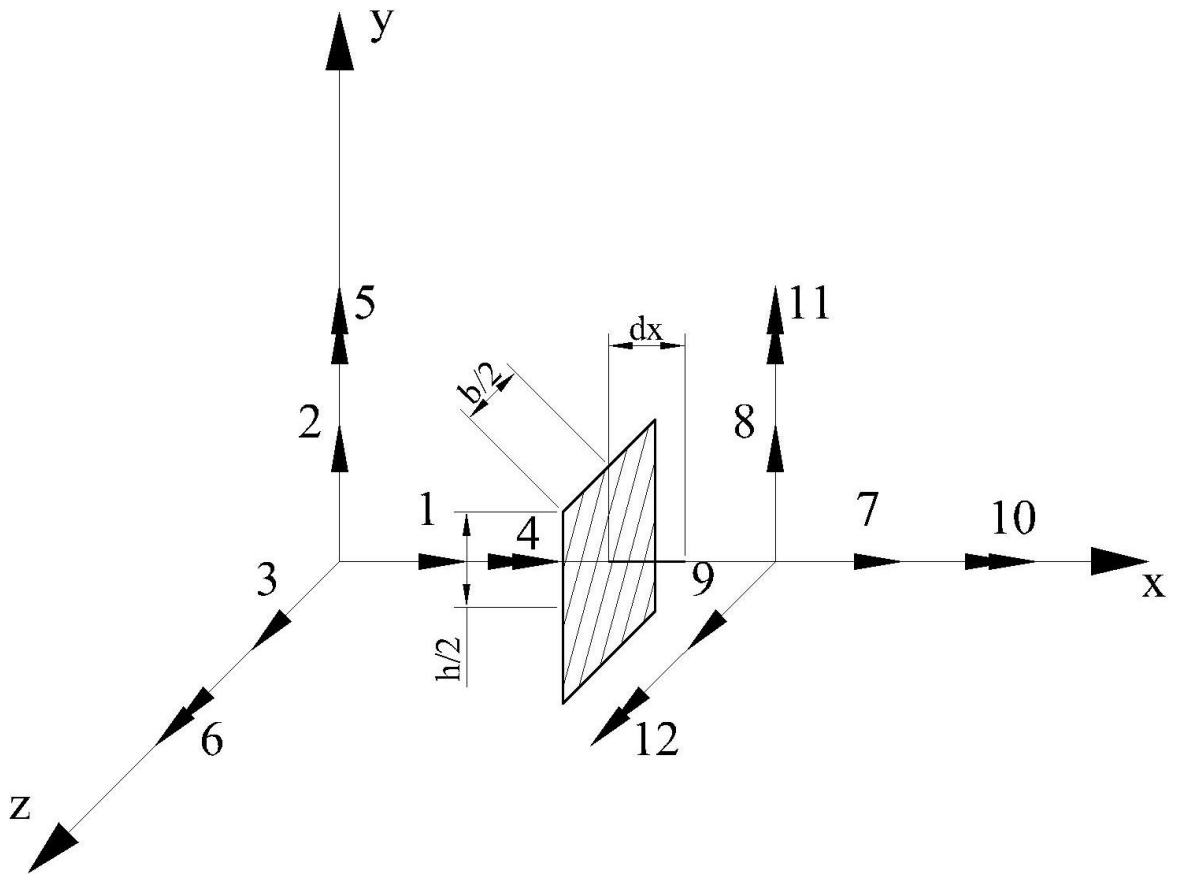


Рисунок 1 – Направление перемещений и деформаций в узлах стержня

Произведен расчет локатора на нагрузку от наземного взрыва 15 т тротилового эквивалента, произведенного на расстоянии 200 м от локатора. Радиус крайнего кольца локатора 10 м, высота стрелы подъема 2,3 м.

Для демпфирования колебаний введена модель предложенного выше гасителя колебаний, представляющая собой стержневой конечный элемент, работающий только на осевое растяжение (рисунок 2,б) на крайнем кольце локатора в двух перпендикулярных направлениях. При этом этот конечный элемент вводится только при условии:

$$|\bar{a}_i| - |\bar{a}_j| > a_0, \quad (11)$$

где a_0 – ускорение, при котором лента перестает разматываться.

$$\text{При } |\bar{v}_j| - |\bar{v}_i| \geq 0 \quad (12)$$

гаситель выводится из расчета.

Результаты расчета (рисунок 3) показывают, что при воздействии воздушной ударной волны на конструкцию локатора с гасителем колебаний амплитуда колебаний значительно уменьшается (до 90 %), начиная еще с фазы воздействия нагрузки. Но на уровнях других колец наблюдается незначительное уменьшение амплитуды колебаний. Следовательно, для более эффективного использования

данного гасителя необходимо устанавливать его на нескольких уровнях конструкции.

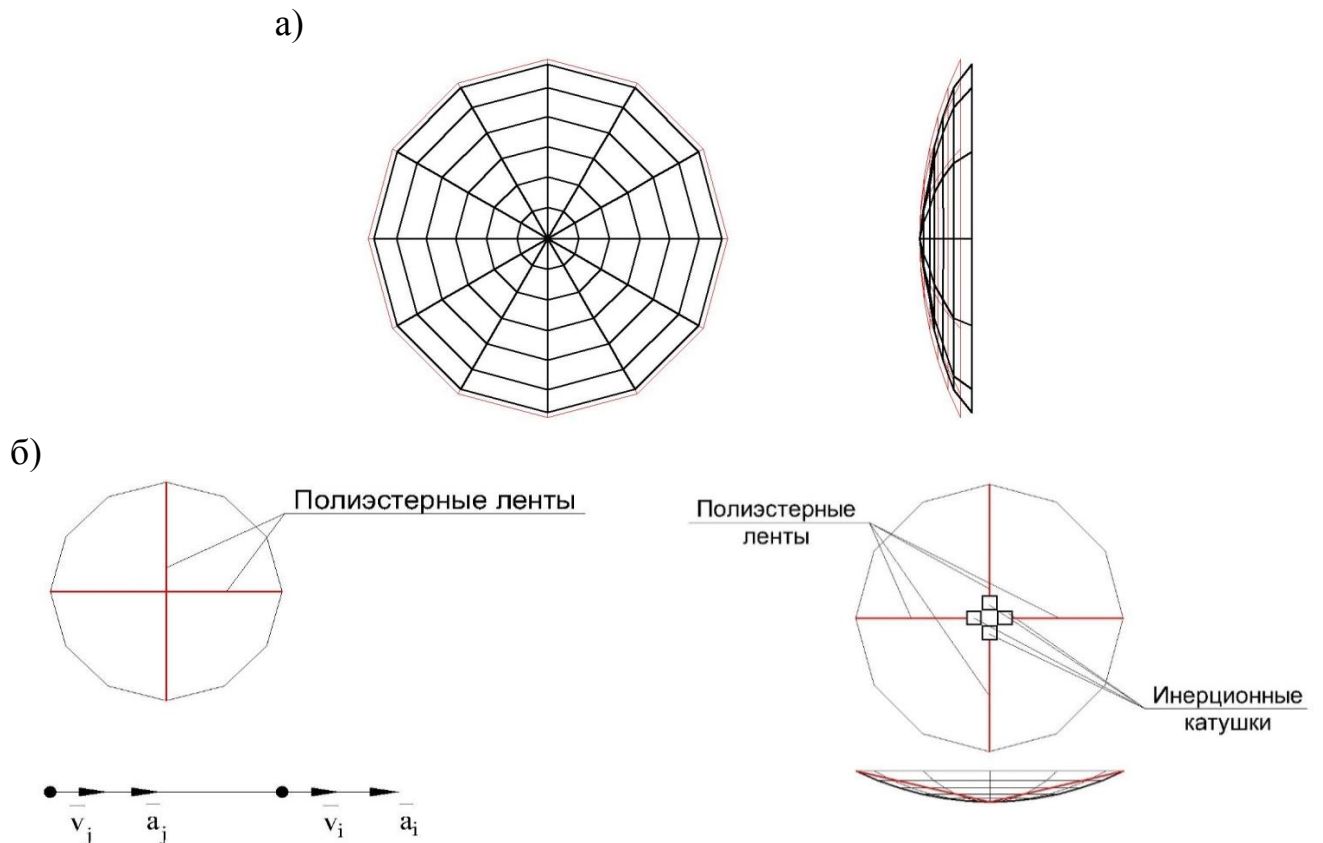


Рисунок 2 – а) Форма колебаний открытого купола под воздействием воздушной ударной волны; б) Схемы установки лент и катушек

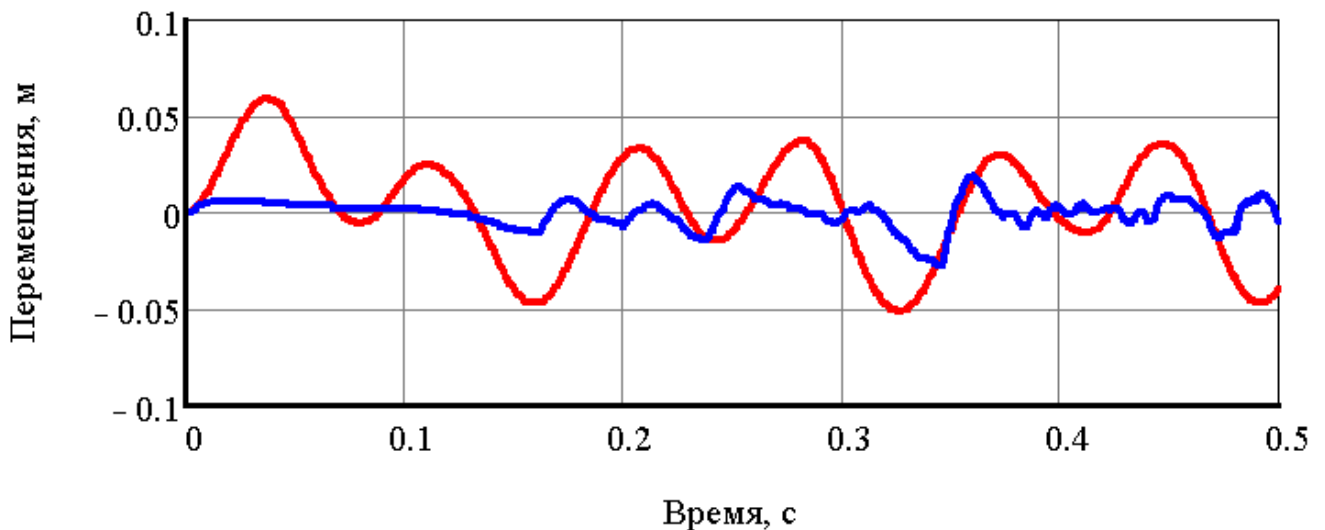


Рисунок 3 – Гашение колебаний локатора

При расчете открытого локатора на сейсмические воздействия по акселерограмме землетрясения делается переход к другой модификации алгоритма работы ленточной системы – алгоритму, который обеспечит затухающие колебания. Будем полагать, что при увеличении расстояния между

точками крепления ленты механизм разматывания ленты не включается в работу до тех пор, пока усилие в ленте не достигнет определенной величины N . Для того чтобы процесс гашения колебаний начинался моментально, необходимо задействовать инерционные катушки с электрическими преднатяжителями, предназначенные для сматывания ленты и её натяжения до тех пор, пока продольная сила в ленте не примет значение N . Во время разматывания (вытягивания) ленты возникает дополнительная сила сопротивления движению, пропорциональная скорости изменения расстояния между противоположными точками крепления ленты (коэффициент пропорциональности b).

Результаты расчета показали эффективность данного принципа работы гасителя. Наибольший вклад в гашение колебаний вносит параметр N , при возрастании которого наблюдается значительное снижение величины амплитуды колебаний.

Для подтверждения результатов численных экспериментов был разработан и проведен натурный эксперимент. При воссоздании возмущающей (сейсмической) нагрузки взят принцип действия кривошипно-шатунного механизма (рисунок 4).

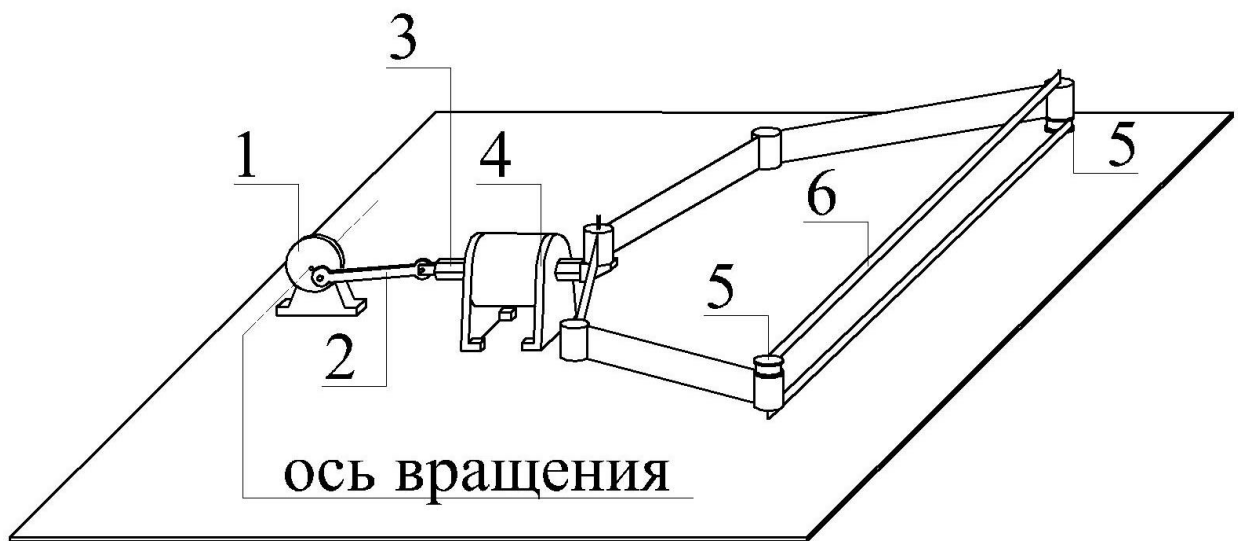


Рисунок 4– Схема экспериментальной установки

Кривошип 1, приводимый в движение двигателем, шарнирно соединен с шатуном 2, который передает движение на направляющий блок (ползун), состоящий из опорной части 4 и направляющей движения (ползуна) 3, жестко соединенной с конструкцией; 5 – инерционная катушка с преднатяжителем (в виде пружинного механизма), 6 – ленты гасителя колебаний. Защищаемая конструкция представляет собой арку ломаного очертания, элементы которой жестко соединены в узлах с сосредоточенными массами (металлические цилиндры).

При свободных колебаниях теоретическая частота первой формы колебаний составляла $3,11 \text{ с}^{-1}$. Экспериментальная конструкция совершала свободные колебания с частотой $2,99 \text{ с}^{-1}$ (погрешность 4,7 %).

При вынужденных колебаниях амплитуда колебаний внешних узлов конструкции достигала 10–11 см. При установке и включении в работу гасителя колебаний значение амплитуды не превышало 2 см.

Таким образом, результаты физического эксперимента показывают хорошую согласованность с результатами численного эксперимента и доказывают эффективность ленточно-тросового гасителя колебаний.

В третьей главе описаны вычислительные эксперименты по гашению колебаний закрытых куполов ленточно-тросовой системы гашения колебаний. Для того чтобы определить наиболее рациональное расположение лент (тросов), рассмотрено четыре варианта его установки (рисунок 5).

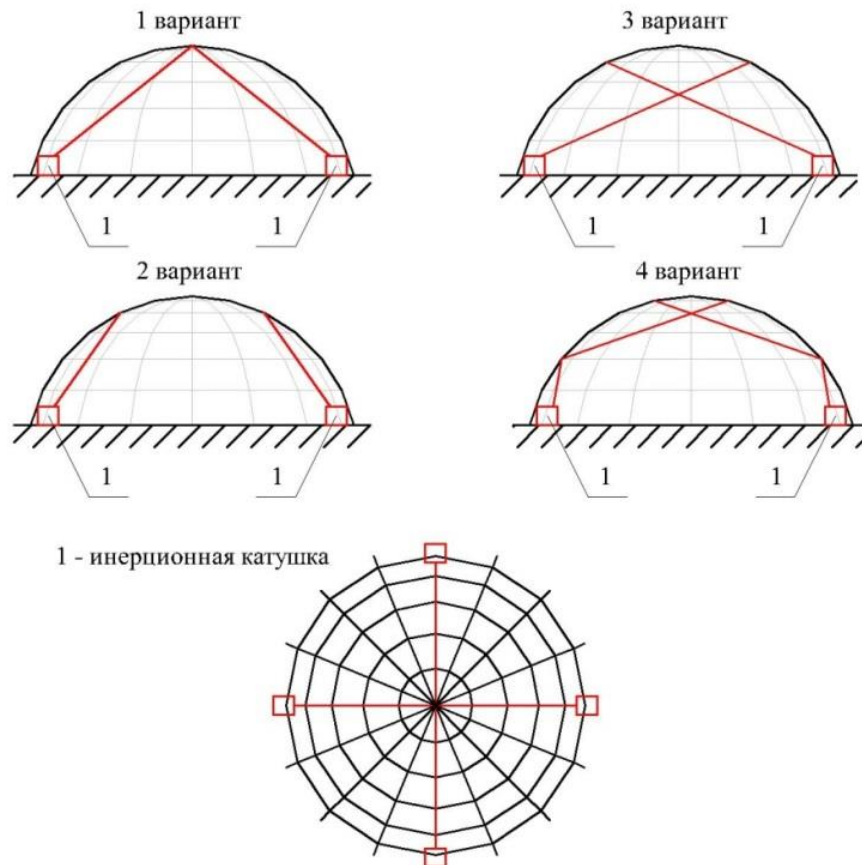


Рисунок 5 – Варианты расположения гасителя

Первый вариант установки был взят из расчета открытых куполов. Выбор трех других вариантов основан на следующем принципе: одну из точек крепления необходимо установить в опорном узле стержня, а вторая точка крепления определяется по принципу максимального отклонения узлов от начального

положения после динамического анализа перемещений узлов системы. Также были рассмотрены варианты установки гасителя на основе определения наиболее податливого к перемещениям направления движения узла. Направление троса находится из сопоставления перемещений, определенных двумя способами: методом оценки податливости конструкции в защищаемом узле перемещениям от сил, прикладываемых последовательно в трех взаимно перпендикулярных плоскостях (рисунок 6), и на основе анализа смещения узла по собственному вектору перемещений при основной форме колебаний конструкции.

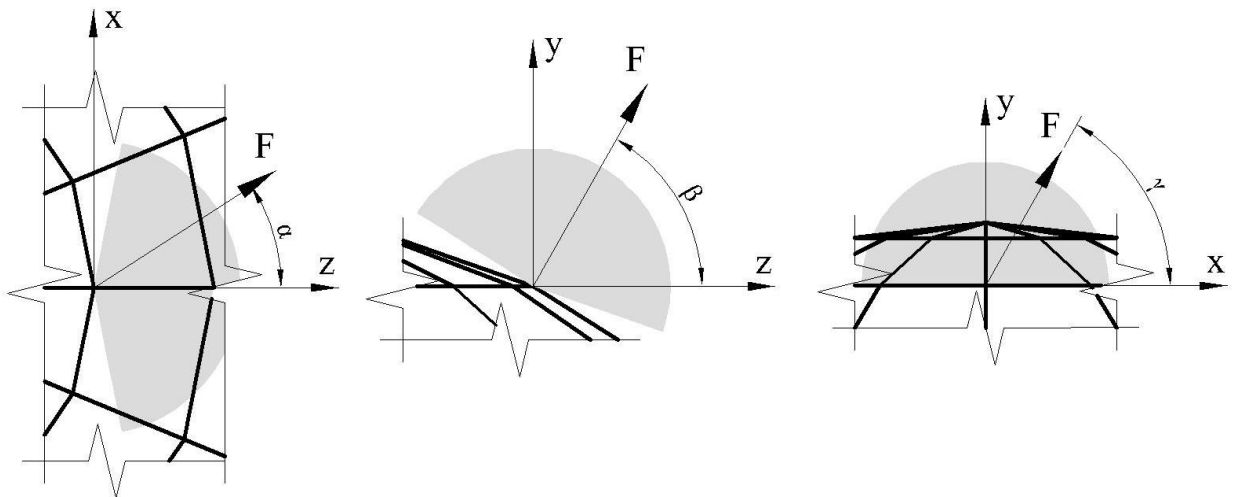


Рисунок 6 – Расчетная схема приложения сосредоточенной нагрузки в узел конструкции (серым цветом обозначен сектор приложения нагрузки)

На рисунке 7(а) представлен вариант ленточно-тросовой системы гашения колебаний с торсионом и инерционно катушечным устройством (2). На рисунке 7(б) представлена ленточно-тросовая система с гидроцилиндрами (5) одностороннего действия для колебаний сооружений, работающая как система односторонних силовых гашения воздействий на защищаемые узлы несущих конструкций (4), образованная ленточно-тросовыми элементами (1), оснащенными инерционными ленточно-катушечными устройствами (6) с преднатяжителями и гидроцилиндрами одностороннего действия, закрепленная к защищаемым узлам и опорам (в том числе в промежуточных точках крепления (3) лент), создающая совокупные односторонние силовые воздействия на защищаемые узлы несущих конструкций, препятствующие колебательным движениям этих узлов.

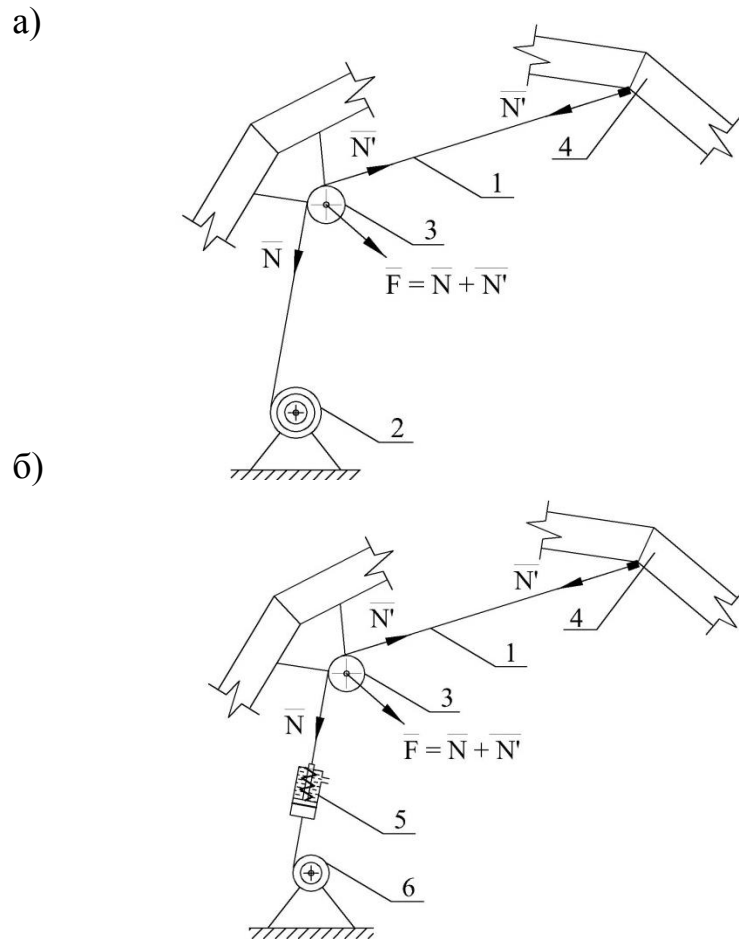


Рисунок 7 – Установка гасителя с промежуточной точкой крепления
а) с торсионом; б) с гидроцилиндром

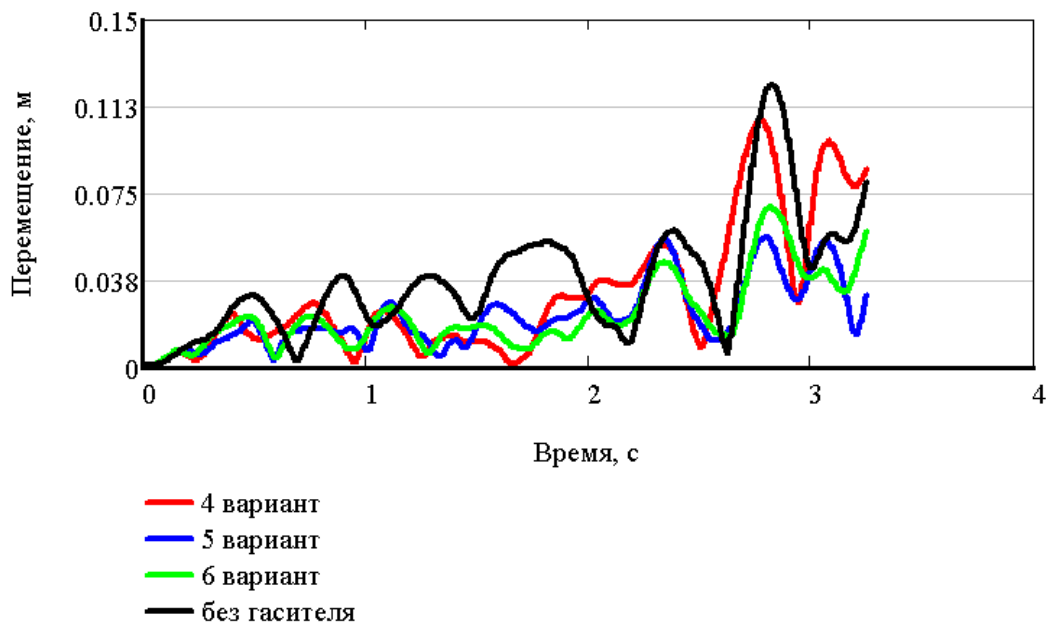


Рисунок 8 – График абсолютных перемещений защищаемого узла закрытого купола (5 вариант из метода оценки податливости конструкции в защищаемом узле перемещениям от сил, 6 вариант из анализа смещения узла по собственному вектору перемещений)

При анализе результатов численных экспериментов (рисунок 8) выявлено, что для пологих куполов наилучшим расположением является вариант с перекрестной системой, определенный методом приложения силы, но его использование нерационально из-за уменьшения полезного объема подкупольного пространства. Поэтому для пологих куполов осуществлен переход к трехточечной системе крепления ленточно-тросового гасителя (рисунок 7), который по сравнению с двухточечной системой на 4 % менее эффективен, но и здесь уменьшение амплитуды колебаний в сравнении с конструкцией без гасителя составляет до 50 %.

Четвёртая глава посвящена разработке метода гашения колебаний рамных каркасов зданий при помощи пластических накладок.

Для гашения колебаний и предотвращения резонансных перемещений элементов каркаса зданий в данной главе предлагается использовать систему защиты «упругий сердечник (собственно каркас) – пластические накладки».

Положим, что упругой основой колонны служит профилированный или сконструированный стальной стержень, а пластические накладки могут быть выполнены из материалов, отличающихся высокой пластичностью. Применение биметаллических элементов позволяет создать принципиально новые виды конструкций, ранее не применявшиеся, например, колонны «сталь – медный сплав», «сталь – алюминиевый сплав», или «сталь – сплав цинка».

При колебательном движении такого стержня в идеально жесткопластических накладках возникают постоянные по величине, но переменные по направлению силы сопротивления движению. Эти силы создают постоянный по модулю момент сопротивления движению. При симметричных сечениях и постоянных по толщине накладках (рисунок 9) величина этого момента равна

$$M_{pl} = 2 \cdot \sigma_T \cdot A_H \cdot h_H. \quad (13)$$

Здесь A_H – площадь сечения накладки;

h_H – расстояние от центра тяжести сечения до центра накладки;

σ_T – предел текучести материала накладок.

Работа внутренних сил, затраченная на изгиб или разгиб композитного стержня, равна:

$$W = \int_0^l \left(0,5 \cdot E \cdot I \cdot w'' \pm 2 \cdot A \cdot h_H \cdot \sigma_H^T \right) \cdot w'' \cdot dx. \quad (14)$$

Здесь $E \cdot I$ – жесткость упругой части сечения стержня;

w'' – кривизна оси стержня.

Аппроксимируя прогиб кубическим полиномом:

$$w = w_1 + \varphi_1 x + \frac{-3w_1 - 2\varphi_1 l + 3w_2 - \varphi_2 l}{l^2} \cdot x^2 + \frac{2w_1 + \varphi_1 l - 2w_2 + \varphi_2 l}{l^3} \cdot x^3; \quad (15)$$

и используя свойства энергии деформации, приходим к матричному уравнению равновесия при изгибе вида:

$$KU = P \pm F_H. \quad (16)$$

Здесь K – матрица жесткости изгиба упругого сердечника стержня;

F_H – вектор сил пластического сопротивления накладок при изгибе стержня

$$F_H = \begin{pmatrix} 0 \\ \mp M_{pl} \\ 0 \\ \pm M_{pl} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

$U = (w_1 \ \varphi_1 \ w_2 \ \varphi_2)$ – вектор узловых перемещений стержня;

P – вектор внешних узловых сил.

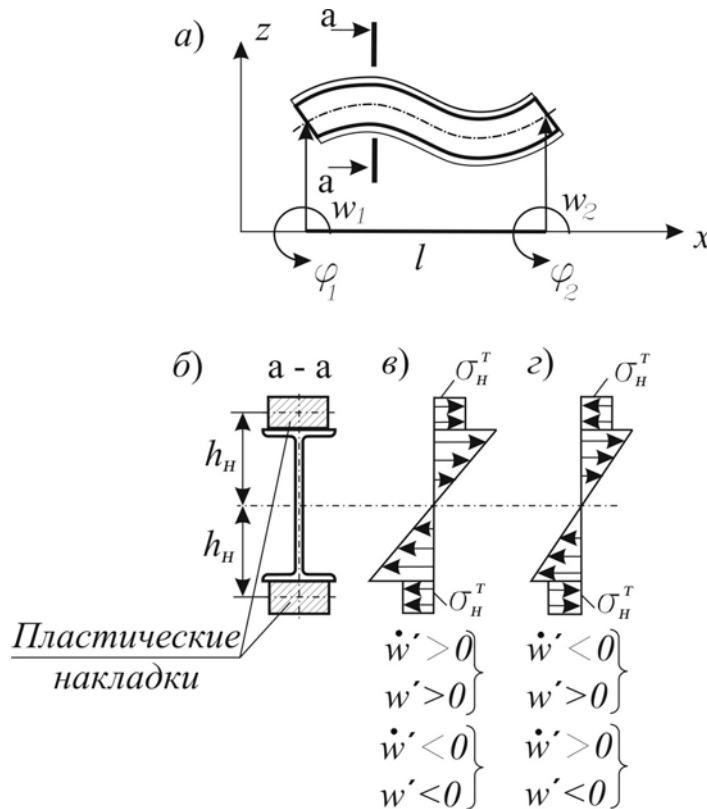


Рисунок 9 – Композитное сечение стержня

Переходя к механической системе и к динамической задаче вынужденных колебаний, приходим к дифференциальному уравнению движения

$$M\ddot{U} + KU = P \mp F, \quad (18)$$

где M – матрица масс, K – матрица жесткости упругой системы.

Здесь матрицы масс

$$M = \text{diag}[m_1, m_2, I_m, \dots, m_n]. \quad (19)$$

Для оценки демпфирующего эффекта системы с жесткими узлами крепления стержневых элементов были проведены численные эксперименты:

1. П-образные рамы разной этажности (от одного до пяти этажей) высотой этажа 3 метра и пролетом 6 метров, выполненные из стальных двутавров № 30 с пластическими накладками, подвергли статическому нагружению горизонтальной узловой силой $P=50000$ Н в верхний узел конструкции, т.е. смоделировали перемещения в раме, соответствующие нагрузке P , а затем внезапно сняли эту нагрузку, вызвав свободные колебания рамы. По результатам вычислений наблюдается существенное уменьшение времени полного гашения колебаний (рисунок 10), что позволяет использовать накладки небольшой толщины (3–4 мм).

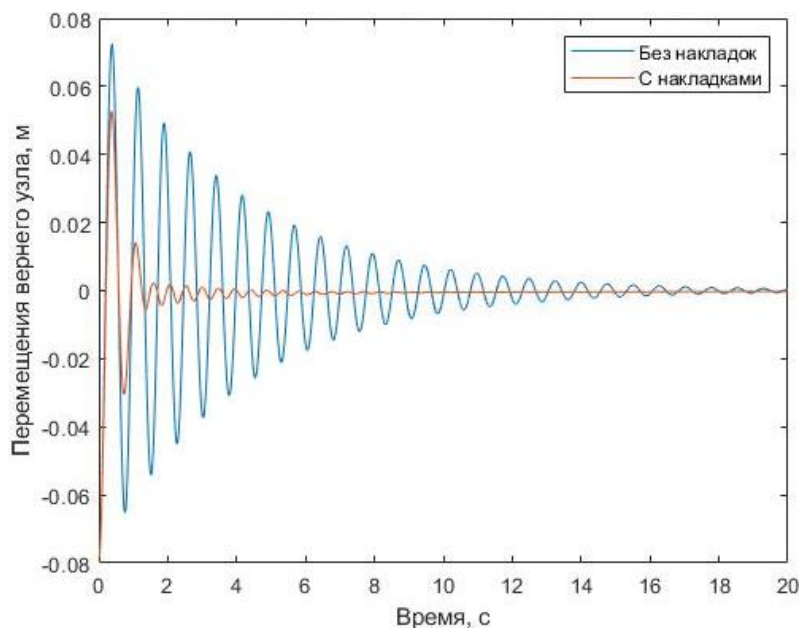


Рисунок 10 – Графики колебаний верхнего узла трехэтажной рамы после снятия нагрузки (толщина накладок 4 мм)

2. При выполнении расчетов каждый стержень рамы делился на шесть элементов. Исходя из эпюр изгибающих моментов, образующихся во время колебания рамы, было выдвинуто предположение, что накладки, находящиеся в зонах наибольших изгибающих моментов (у опор рамы и узлов), больше участвуют в гашении колебаний, чем накладки, находящиеся в зонах изгибающих моментов небольшого значения (на средних участках стержней).

Однако по результатам численных экспериментов самым эффективным способом использования материала является расположение накладок по всей длине стержня.

3. Для исследования поведения рамы (рисунок 11) с пластическими накладками во время резонанса задаём периодическую функцию перемещения

основания, с частотой изменения, близкой к собственной частоте колебаний рамы, тогда вектор нагрузок принимает вид:

$$P = -M \cdot \begin{pmatrix} \ddot{\Delta}(t) \\ g \\ 0 \\ \dots \\ \ddot{\Delta}(t) \\ g \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (20)$$

где $\Delta(t)$ – функция перемещения основания; t – время; M – матрица масс; g – ускорение свободного падения.

В итоге явление биений рамы с гасителем колебаний (сглаженное, рисунок 12) наблюдается только в самом начале колебательного движения, в следующей фазе движения механической системы амплитуда колебаний становится практически постоянной величиной.

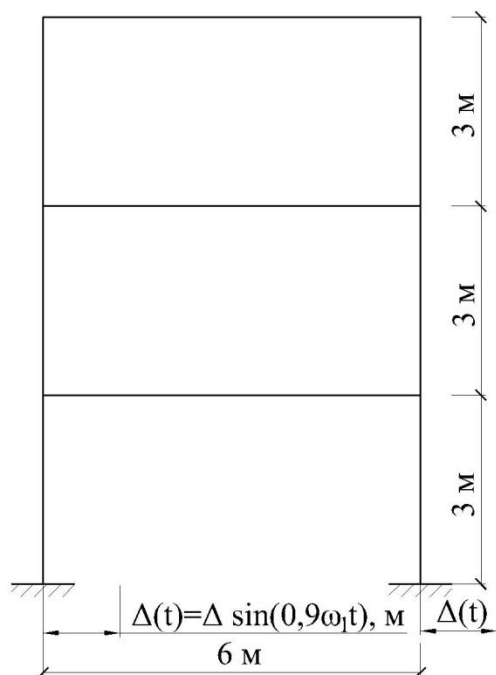


Рисунок 11 – Расчетная схема рамы

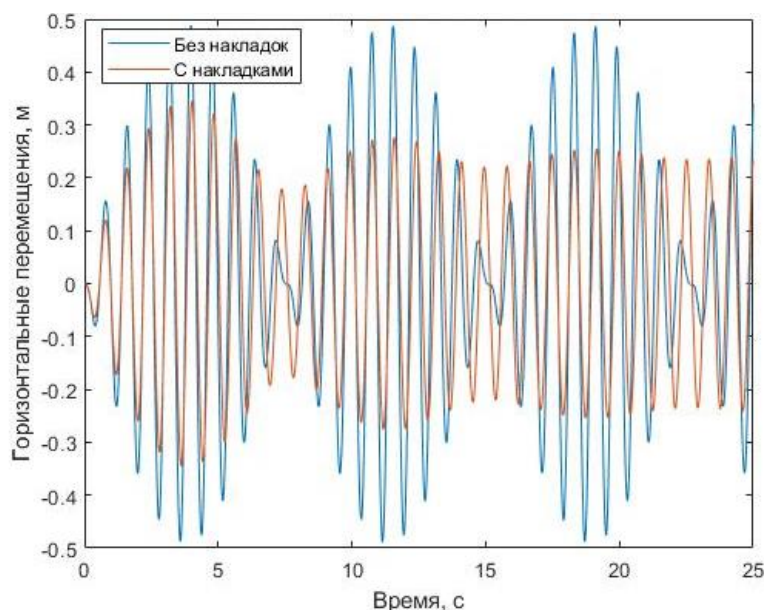


Рисунок 12 – Графики вынужденных колебаний трехэтажной рамы

Таким образом, метод пластического торможения, применительно к прямоугольным каркасам зданий, является эффективным способом гашения колебаний. Эффективность данного способа можно существенно повысить, если в

качестве накладок применить новые материалы, у которых диаграмма растяжения близка к модели идеально жестко-пластического материала.

В пятой главе описаны программные комплексы для П-образных рам и для расчета купольных сооружений с учетом физической и геометрической нелинейностей. В качестве исходных данных для динамического расчета выступают: геометрические характеристики поперечных сечений стержневых элементов конструкции и лент (тросов) (геометрические размеры поперечных сечений h , b и t , площадь поперечного сечения F , моменты инерции относительно главных центральных осей сечения I_y и I_z , момент кручения I_x), механические характеристики материалов стержневых элементов и лент (тросов) гасителя (погонная масса стержня, предел прочности (текучести) материала стержней $\sigma_{\text{тп}}$, модуль упругости материалов E и $E_{\text{л}}$, модуль сдвига материала стержней G), количество углов в правильном многоугольнике n (основание купола), количество ярусов купола (количество элементов в каждой полуарке) z , радиус описанной окружности (вокруг правильного многоугольника) r , отношение высоты стрелы подъема f_1 купола к радиусу r , алгоритм динамического расчета на основе метода центральных разностей. Выходными данными расчета служат: перемещения в узлах системы, напряжения в элементах конструкции и модуль упругости в каждый момент времени.

Программный комплекс выполнен при помощи пакета прикладных программ Matlab. Он включает организацию матричных операций метода конечных элементов, динамический расчет на основе метода центральных разностей, модифицированный метод переменных параметров упругости, численное моделирование работы гасителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

Поставленные в диссертационной работе задачи выполнены, а поставленные цели достигнуты. В работе получено решение научной задачи развития теории механической безопасности конструктивных систем зданий и сооружений путем гашения колебаний стальных каркасов и изложены новые научно обоснованные технические решения гасителей колебаний, имеющие важное значение для развития строительной отрасли. В частности,

1. Разработаны новые технические решения гасителей колебаний:

– ленточно-тросовая система гашения колебаний открытых и закрытых куполов, основанная на принципе действия односторонней связи;

– демпфирующая система в виде пластических накладок, закрепленных к элементам каркаса здания, которая при колебательном движении создает силы пластического торможения.

2. Выявлено эффективное расположение гасителей в куполообразных сооружениях в зависимости от их конфигурации.

3. Разработан новый метод динамического расчета сооружений, учитывающий физическую и геометрическую нелинейности, реализованный в программном комплексе расчета колебательного движения открытых и закрытых куполов.

4. Создан программный комплекс расчета колебаний механических систем при наличии возмущающих и демпфирующих воздействий.

5. Проведена серия численных экспериментов, которые показали эффективность разработанных систем гашения колебаний.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Дальнейшее развитие темы планируется осуществлять по следующим направлениям:

1. Произвести натурную проверку ленточно-тросового гасителя для гашения колебаний купола с использованием электронатяжителей и, в том числе, при пластической работе односторонней связи.

2. Исследовать эффективность демпфирующих свойств пластических накладок из различных материалов.

Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в следующих научных изданиях:

в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук:

1. Шеин А.И., Чуманов А.В. Ленточная система гашения колебаний локатора при сейсмических воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. 2020. № 3 (290). С. 62-67. DOI: 10.37538/0039-2383.2020.3.62.67 (ИФ РИНЦ – 0,361; 0,525/0,265 печ.л.).

2. Шеин А.И., Чуманов А.В. Колебания стержневых систем с учетом физической и геометрической нелинейности // Строительная механика и расчет сооружений. 2020. № 4 (291). С. 54-60. DOI: 10.37538/0039-2383.2020.4.54.60 (ИФ РИНЦ – 0,361; 0,613/0,310 печ.л.).

3. Чуманов А.В., Шеин А.И., Монахов В.А. Ленточная система гашения колебаний для закрытых куполов // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 1 (46). С. 122-129 (ИФ РИНЦ – 0,279; 0,933/0,315 печ.л.).

4. Шеин А.И., Чуманов А.В. Определения рационального направления лент (тросов) крепления ленточно-тросового гасителя колебаний сооружений // Региональная архитектура и строительство. 2022. № 1 (50). С. 44-50. DOI: 10.54734/20722958_2022_1_44 (ИФ РИНЦ – 0,279; 0,817/0,41 печ.л.).

в рецензируемых научных изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus:

5. Shein A.I., Chumanov A.V. Belt vibration damping system for closed-type domes // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Т. 160. С. 245-252. DOI: 10.1007/978-3-030-75182-1_33.

6. Shein A., Chumanov A. Modified method of variable elasticity parameters for solving problems of dynamics of rod systems taking into account physical and geometric nonlinearities // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 5th World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium, WMCAUS 2020 – Vol. 4. 2020. С. 042066. DOI:10.1088/1757-899X/960/4/042066.

7. Shein A., Chumanov A., Malkov A., Laskov N. New vibration dampers for buildings and structures // AIP Conference Proceedings. Vol. 2503. 2022. С. 050065. DOI:10.1063/5.0100292.

Чуманов Александр Васильевич

**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ СТАЛЬНЫХ
КУПОЛООБРАЗУЮЩИХ И ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КАРКАСОВ
ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 21.03.2023. Объем 1,2 п.л.

Тираж 100 экз. Заказ № 128.

Печатный дом «Инженер»

г. Пенза, ул. Пушкина, 7