

УДК 624.04

НОВЫЕ ГАСИТЕЛИ КОЛЕБАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Шеин Александр Иванович,

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

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

Чуманов Александр Васильевич,

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

аспирант, ассистент кафедры «Механика».

Мальков Артем Игорьевич,

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

аспирант кафедры «Механика».

Аннотация

В статье объединены исследования по нескольким новым системам гашения колебаний. Рассмотрены системы демпфирования, обладающие повышенной способностью рассеивания энергии колебаний, или эффектом односторонней (в смысле направления движения) связи, а также имеющие возможность активно управлять динамикой колебательных движений. На этих принципах основаны три абсолютно новых способа гашения колебаний механических систем: демпфирующие пластические накладки, ленточные (тросовые) системы и реактивные системы.

Ключевые слова: гашение колебаний, рассеивание энергии колебаний, пластические накладки, односторонняя связь, ленточно-тросовый гаситель, активный гаситель, реактивный способ гашения колебаний.

NEW VIBRATION DAMPERS FOR BUILDINGS AND STRUCTURES

Shein Alexander Ivanovich,

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,
Doctor of Sciences, Professor, Head of the department “Mechanics”.*

Chumanov Alexander Vasilyevich,

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,
postgraduate student, Assistant of the department “Mechanics”.*

Malkov Artem Igorevich,

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,
postgraduate student of the department “Mechanics”.*

Annotation

The article combines research on several new vibration damping systems. We consider damping systems that have an increased ability to dissipate the energy of vibrations, or the effect of one-way (in the sense of the direction of movement) communication, as well as having the ability to actively control the dynamics of oscillatory movements. These principles are based on three completely new methods of damping the vibrations of mechanical systems: damping plastic pads, tape (cable) systems and reactive systems.

Keywords: vibration damping, vibration energy dissipation, plastic overlays, one-way coupling, belt-cable dampener, active dampener, reactive method of vibration damping.

Стальные симметричные системы в виде куполов и башен широко распространены в практике строительства. Конструкции такого рода могут подвергаться существенным ветровым, сейсмическим и техногенным воздействиям. При этом в деформируемых от этих воздействий элементах могут развиваться недопустимые перемещения и напряжения. Одним из основных направлений повышения динамической прочности, устойчивости, долговечности и надёжности башен и куполов в сейсмических районах

является применение систем и устройств гашения колебаний. Работа этих систем и устройств в значительной степени связана с созданием сил противодействия движению или сил, изменяющих ритм движения. Для создания этих сил обычно используют пассивные управляющие устройства – динамические, маятниковые, ударные или жидкостные (переливные) гасители колебаний. Однако в условиях нестационарных воздействий существующие системы гашения недостаточно эффективны. Целесообразно предложить новые системы гашения колебаний, обладающие повышенной способностью рассеивания энергии колебаний, обладающие эффектом односторонней (в смысле направления движения) связи или имеющие возможность активно управлять динамикой колебательных движений. Внедрение новых систем гашения может существенно повысить безопасность и безаварийность зданий и сооружений.

Основная цель настоящей работы заключается в описании новых эффективных способов гашения колебаний зданий, сооружений и других механических систем. Разрабатываемые системы гашения колебаний должны обладать:

- повышенной способностью рассеивания энергии колебаний;
- эффектом односторонней (в смысле направления движения) связи;
- возможностью активно управлять динамикой колебательных движений.

Для создания таких гасителей потребовалось решить следующие задачи:

1. Предложить и обосновать новые технические решения гасителей колебаний, обладающие научной новизной, т.е. неизвестные из существующего уровня развития систем гашения и для которых будет возможна промышленная применимость.

2. Разработать математические модели сооружения – гаситель.

3. Провести серию численных экспериментов по проверке работоспособности систем сооружения – гаситель в условиях вынужденных колебаний.

4. Выявить рациональное расположение элементов систем гашения для повышения эффекта демпфирования.

5. Оценить эффективность применения новых систем гашения колебаний.

В результате предложено три абсолютно новых способа гашения колебаний механических систем: демпфирующие пластические накладки, ленточные (тросовые) системы и реактивные системы:

1. Пластические накладки на несущие элементы каркаса зданий из материалов, обладающих высокими пластическими свойствами, способны создавать демпфирующий эффект уже при малых деформациях элементов. Хорошо рассеивают потенциальную энергию колебательных движений [1].

2. Ленточный способ заключается в использовании ленточно-катушечных устройств, создающих односторонние связи, препятствующие колебательным движениям несущих конструкций. Важной особенностью ленточных систем является возможность создавать (при необходимости) многоугольные конфигурации, путем установки промежуточных роликовых опор [2].

3. Реактивный способ гашения колебаний основан на использовании реактивных систем, в которых создаётся управляемая сила активного сопротивления движению системы [3], [4].

Описание новых систем гашения колебаний

В качестве гасителей (демпферов) колебаний эффективно можно применять композитные системы «упругий – пластический». К упругому несущему ядру конструкции привариваются, монтируются на заклепках или наклеиваются накладки из материала, отличающегося высокой пластичностью (к примеру, алюминий или медь, эвтектический композит Ni–NbC, специально подобранный углепластик). Принцип гашения колебания основан на идее пластического торможения: при наступлении пластической стадии работы накладок часть энергии колебательного движения данной упругопластической системы затрачивается на изгиб разгиб (растяжение-сжатие) пластических накладок, что и вызывает эффект «торможения». Двухсторонние накладки при

изгибе создают в каждом сечении неупругий момент сопротивления движению [1].

При использовании ленточной системы гашения, полагаем, что в местах крепления к опорам ленты оборудованы катушками, разматывание которых осуществляется при достижении силами натяжения лент некоторых определенных значений. При разматывании ленты в катушках возникают силы сопротивления движению, пропорциональные скорости разматывания, а в месте крепления ленты к защищаемой конструкции действует сила натяжения, работающая как односторонняя связь. Для того, чтобы процесс гашения колебаний начинался моментально, необходимо установить в инерционные катушки преднатяжители, предназначенные для сматывания ленты и её натяжения до тех пор, пока продольная сила в ленте не примет значение заданного значения [2].

При гашении колебаний высокой частоты инерционная катушка не может создать необходимую скорость сматывания ленты. Для обеспечения постоянного натяжения ленты (троса) в механизме инерционной катушки устанавливается электромотор-натяжитель (рис. 1). Получая сигнал от системы управления, электрический натяжитель срабатывает, натягивая ленту или трос, длина ленты уменьшается, создавая предварительное натяжение. Типовой натяжитель обеспечивает сматывание отрезка ленты длиной до 13 см за время 13 мс, т.е. скорость сматывания примерно равна 1 см/мс. Чтобы натяжение не оказалось критически сильным, конструкция натяжителя содержит ограничитель усилий, устройство (например, торсион), который фиксируя превышение нагрузки на ленту (этот параметр зависит от изгибных характеристик, жесткости, защищаемой системы) начинает давать слабину, тем самым ослабляя натяжение ленты. Электрический натяжитель способен многократно выполнять натяжение. Если устройство фиксирует уменьшение натяжения ниже заданной величины, длина ленты (троса) сокращается и действие односторонней связи восстанавливается.

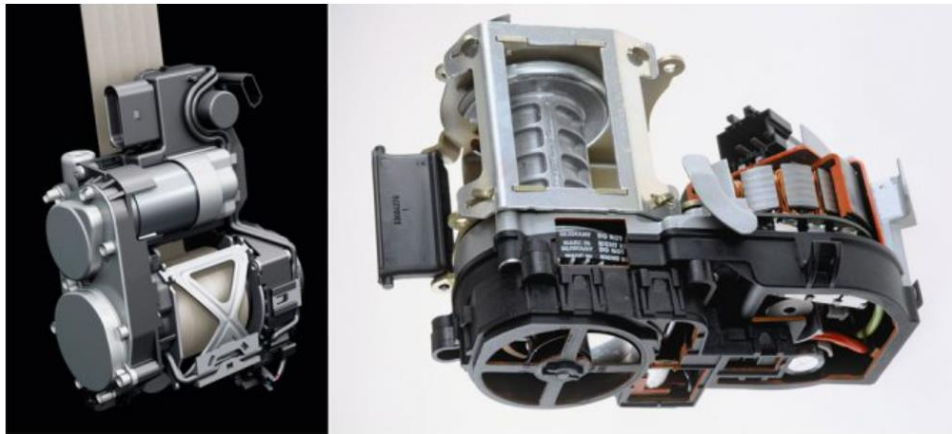


Рисунок 1 - Электрический преднатяжитель

Принцип работы разработанного в ПГУАС активного гасителя состоит в создании знакопеременной реактивной силы, препятствующей относительным (изгибным) перемещениям (колебательным движениям) сооружения. активный гаситель колебаний практически мгновенно включается в работу. Поэтому активный гаситель наиболее эффективен при коротких по продолжительности землетрясениях, когда максимальные перемещения конструкции возникают практически сразу после начала землетрясения [4].

Предлагаемые подходы и методы для создания расчетной модели сооружение-гаситель

Расчет конструкции производится методом конечных элементов. Дифференциальное уравнение движения механической системы имеет вид:

$$M \cdot \ddot{U} + C \cdot \dot{U} + K \cdot U = P, \quad (1)$$

где M – диагональная матрица масс;

U – вектор перемещений узлов механической системы;

C – матрица демпфирования;

K – матрица жесткости всей системы;

P – вектор нагрузок, элементы которого принимают значения, зависящие от вида сейсмического нагружения, в зависимости от заданной акселерограммы землетрясения.

Для составления матрицы сопротивления движению самой несущей конструкции C используется демпфирование по Релею [5]:

$$C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K . \quad (2)$$

Авторами проекта разработан численный метод решения уравнений динамического равновесия – метод смещенных разностей, – основанный на модернизации метода центральных разностей, позволяющий повысить устойчивость расчета и сократить затраты времени за счет изменения шага по временной координате в зависимости от кривизны траектории [6].

Строительные конструкции и элементы сооружений под воздействием силовых факторов могут существенно менять свои формы и размеры, из-за чего принцип малых перемещений, на основе которого построены методы линейной строительной механики, может давать заметные погрешности. При возникновении больших деформаций значения напряжений в элементах конструкций могут превышать предел упругости, а зависимость напряжений от деформаций становится нелинейной. Следовательно, для описания реальной работы таких конструкций необходимо учитывать нелинейные факторы. В частности, при сейсмических воздействиях стержневые купола локаторов, антенн и других подобных сооружений могут получать большие изгибные перемещения. Это потребовало модернизации прямых методов решения дифференциальных уравнений колебательного движения механической системы для учета нелинейных составляющих деформаций и напряжений.

Движение здания или сооружения при сейсмических воздействиях можно разделить на переносную и относительную составляющие. При этом деформации сооружения обусловлены относительной составляющей движения. Динамика механической системы с реактивным гасителем, подверженной кинематическим воздействиям, описывается матричным конечно-элементным уравнением колебательного движения:

$$M \cdot \ddot{U} + C \cdot \dot{U} + K \cdot U = -M\ddot{\Delta} + F, \quad (3)$$

где $\ddot{\Delta}$ – переносные (сейсмические) ускорения;

F – вектор реактивных воздействий.

Авторами проекта выведены формулы и разработан алгоритм расчета колебаний стержневых систем методом центральных (смещенных) разностей с учетом геометрической нелинейности и физической нелинейности материала на каждом шаге по времени [7]. Учет геометрической нелинейности произведем за счет построения и введения в расчет геометрической матрицы. При этом матрицу жесткости будем представлять в виде:

$$K = K_n - K^\Gamma, \quad (4)$$

где K^Γ - геометрическая матрица размерам, учитывающая изменение геометрии системы.

Учет физической нелинейности реализуем на основе степенных многочленов зависимости напряжений от относительной деформации элементов:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n A_i \cdot \varepsilon^{k_i} = A_1 \cdot \varepsilon^{k_1} + A_2 \cdot \varepsilon^{k_2} + \dots + A_n \cdot \varepsilon^{k_n}, \quad (5)$$

где A_i - некоторые физические константы, имеющие размерность напряжений;

k_i - безразмерные показатели, которые могут быть любым положительным числом (целым, дробным).

Для практического расчета нелинейных напряжений и деформаций разработан алгоритм модифицированного метода переменных параметров упругости. Метод адаптирован для решения задач динамики прямыми методами. Для этого на каждом шаге по времени принимается, что значения матрицы жёсткости K на каждом шаге по времени итерационно определяются через значения вектора $U_{t-\Delta t}$, полученного на предыдущем этапе упругого решения.

На основе разработанных методов и алгоритмов создан программный комплекс для определения перемещений узловых точек модели сооружения, реализованный в системе компьютерной алгебры MathCAD с использованием специальных библиотек MATLAB, обеспечивает проведение вычислительных

экспериментов с использованием моделей сооружений с гасителями колебаний, что повышает надежность работы конструкций и сокращает затраты на опытно-конструкторские работы и натурные испытания.

Таким образом, авторами проекта создана адекватная, максимально близкая к действительности расчетная математическая модель оборудованного гасителями сооружения.

Численные исследования работы гасителей

Метод пластических накладок основан на том, что при колебательном движении «упругий сердечник» работает в пределах упругости материала, а в «пластических накладках» при сгибании и разгибании стержня создаются силы сопротивления движению, снижающие упругую энергию колебательного движения, что приводит к гашению колебаний. График зависимости времени полного торможения конструкции П-образной рамы, размером 3х6 метров, от толщины накладок изображен на рисунке 2.

Для исключения колебательного движения куполов локаторов (изображены на рис.3) при взрывных воздействиях используем армированные ленточные гасители колебаний. При взрыве противоположные узлы крепления лент гасителя начинают сближаться или, наоборот, удаляться по отношению друг к другу.

Ленточно-тросовый гаситель колебаний можно представить стержневым конечным элементом, работающий только на осевое растяжение на крайнем кольце локатора в 2 перпендикулярных направлениях. Ленты можно располагать, также, от катушек в центре локатора к крайнему кольцу (рис. 4).

Результаты расчета показывают, что при воздействии воздушной ударной волны на конструкцию локатора с гасителем колебаний значительно уменьшается амплитуда колебаний (до 90 %), начиная еще с фазы воздействия нагрузки (рис.5).

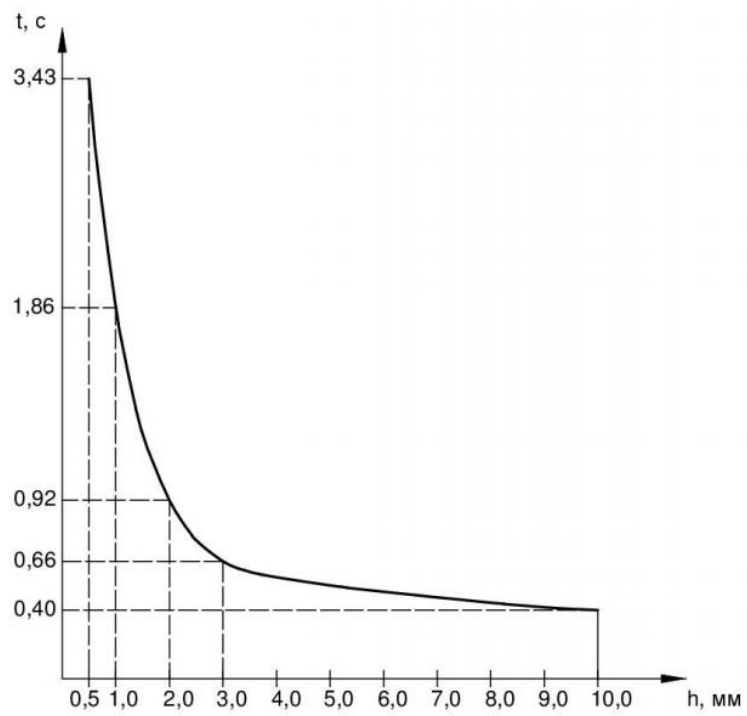


Рисунок 2 - График зависимости времени полного торможения конструкции рамы от толщины накладок

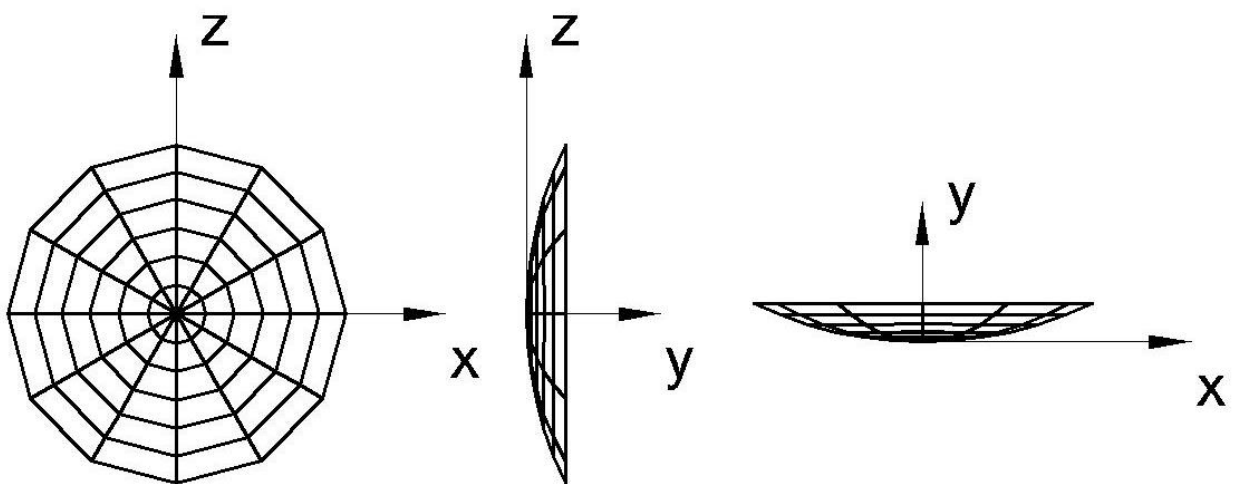


Рисунок 3 – Схема конструкции локатора (открытый купол)

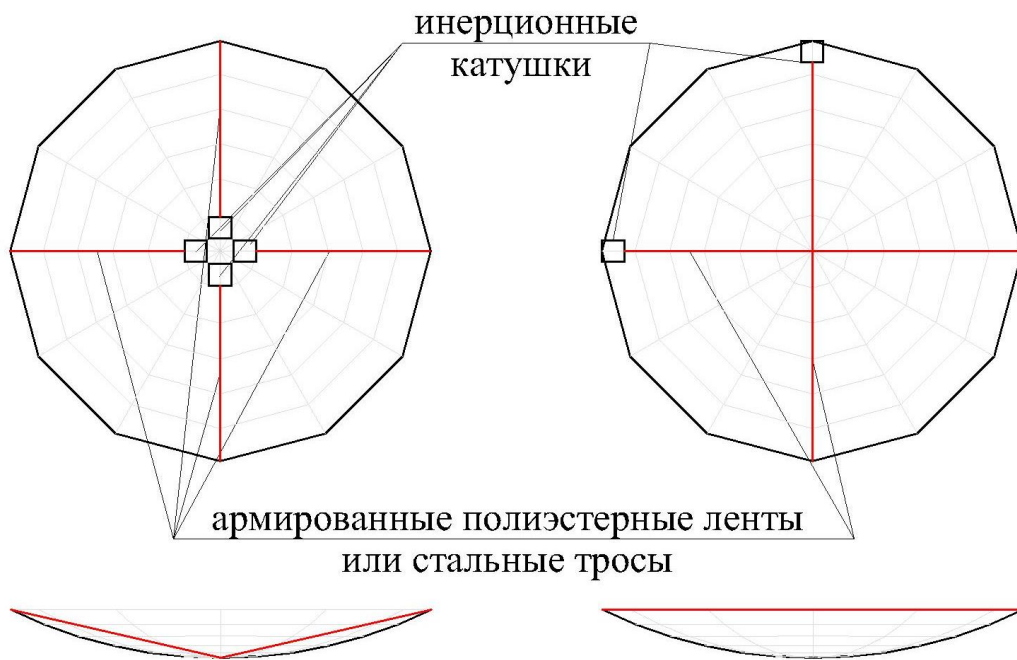


Рисунок 4 – Схема установки гасителя в конструкцию купола локатора

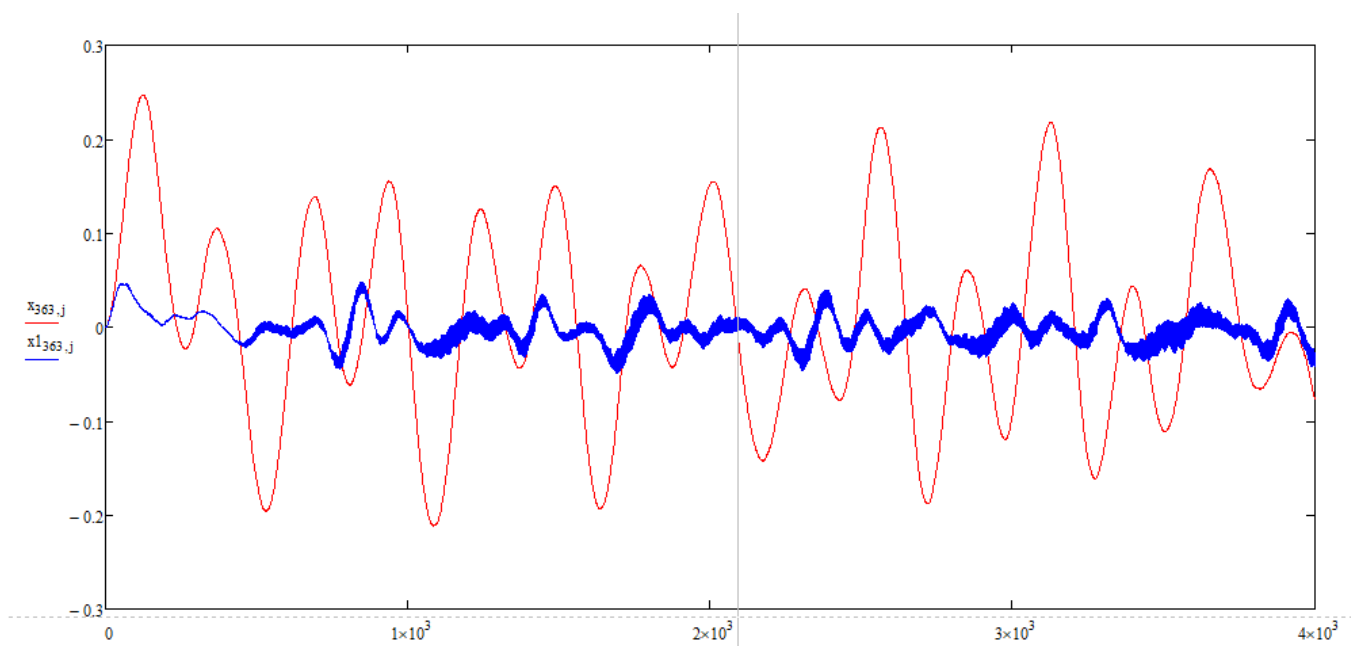


Рисунок 5 – Графики перемещений узлов локатора, в которых установлен гаситель колебаний

Но на уровнях других колец наблюдается незначительное уменьшение амплитуды колебаний. Следовательно, для более эффективного использования данного гасителя необходимо устанавливать его на нескольких уровнях конструкции.

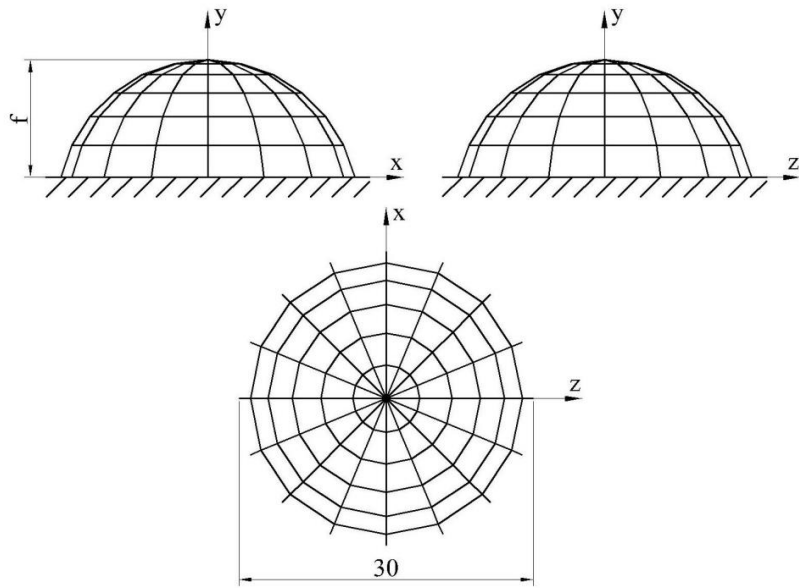


Рисунок 6 - Расчетная схема закрытого купола

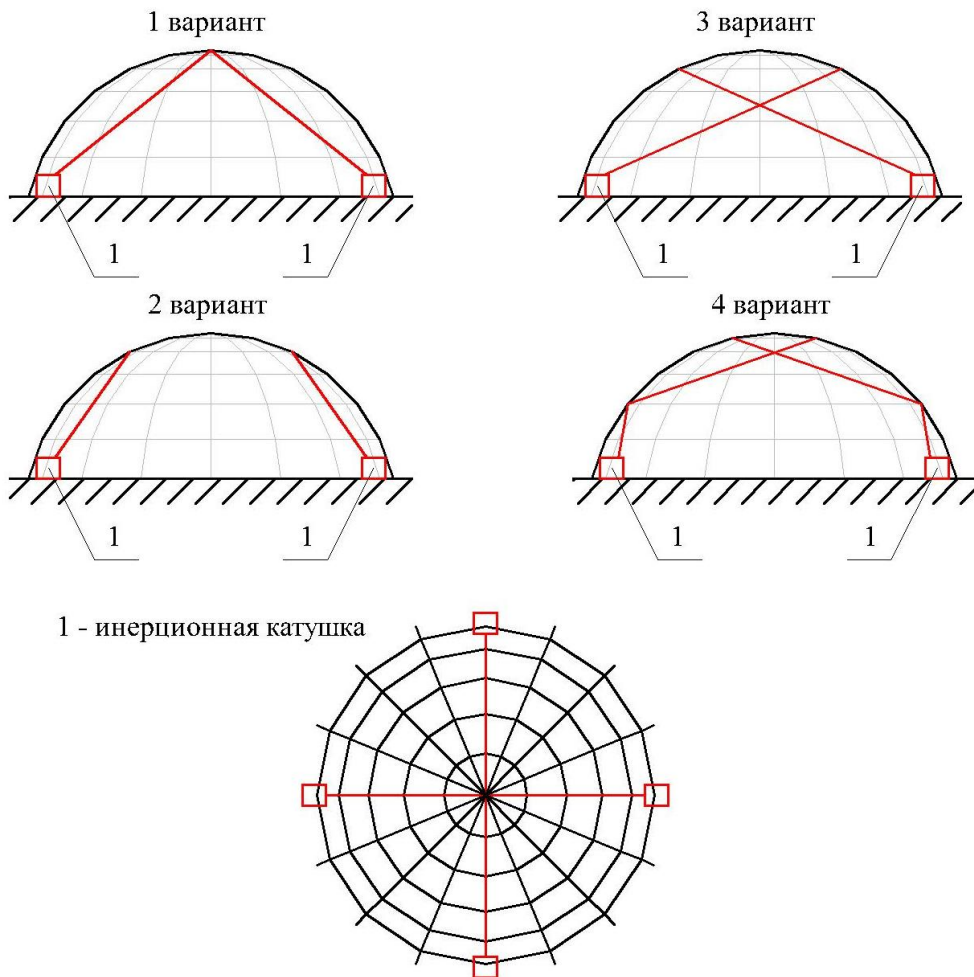


Рисунок 7 - Схемы установки лент (тросов) Добавить схемы с промежуточной точкой

Для испытания ленточно-тросовых систем гашения колебаний рассматривался закрытый купол в виде циклически симметричной конструкции, составленной из жестко закрепленных между собой стальных стержневых элементов (рис.6).

Для того чтобы определить наиболее рациональное расположение предлагаем три варианта его установки (рис.7). Первый вариант крепления гасителя к полюсу закрытого купола был выбран по следующей причине: узел наиболее удален от всех опорных точек конструкции, к тому же обладающий максимальной массой. Варианты 2 и 3 выбраны исходя из предварительно проведенного динамического анализа движения конструкции, были выбраны узлы с максимальной величиной отклонения от точки равновесия.

Наиболее рациональным вариантом выглядит третий, поскольку максимальное перемещение (наблюдается значительное, более 50%, снижение максимальных амплитуд колебаний куполов) среди первых трех вариантов минимальное (график перемещения полюса показан на рис. 8). Однако для рационального использования подкупольного пространства более подходящим вариантом расположения гасителя является четвертый вариант. При четвертом варианте расположения гасителя по сравнению с третьим значения максимальных отклонений узлов на 4-10% больше [].

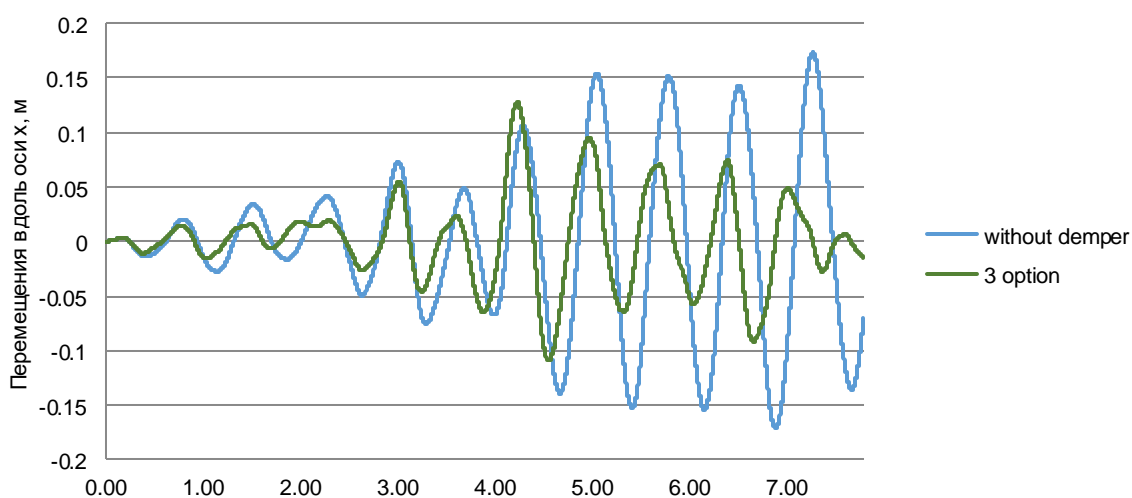


Рисунок 8 – График перемещения полюса закрытого купола вдоль оси x при 3 варианте установки гасителя

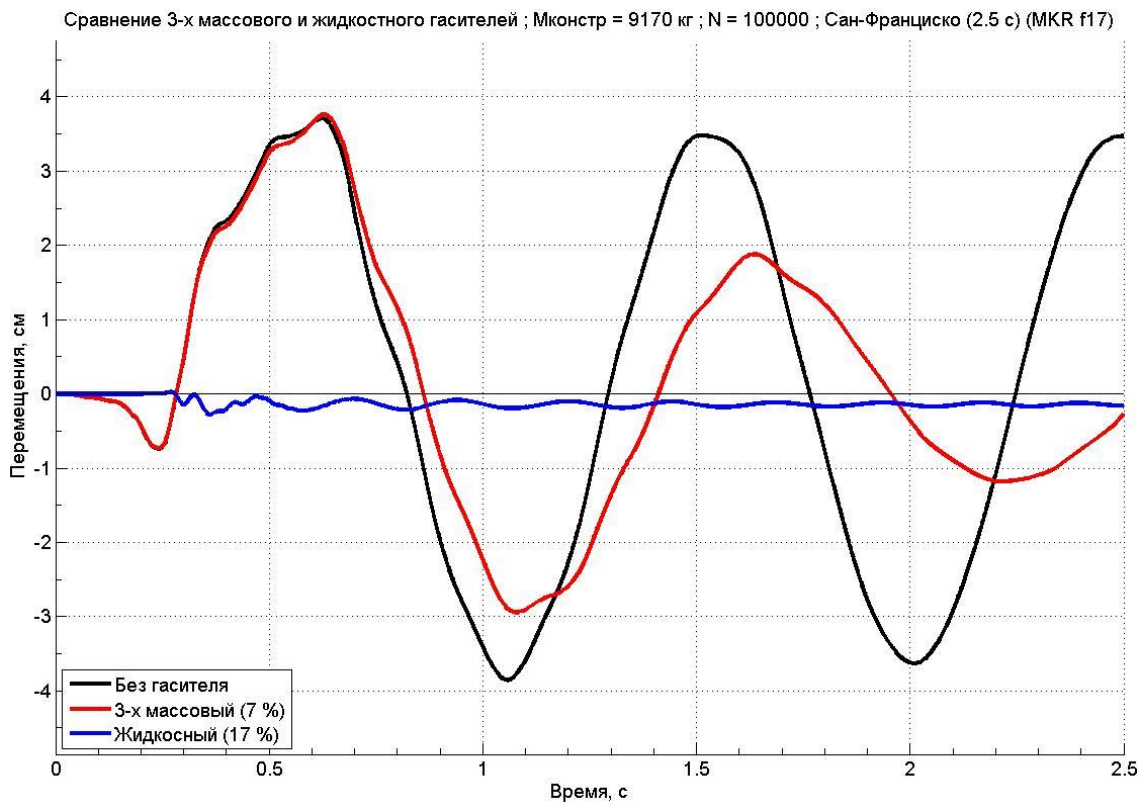


Рисунок 9 - Сравнение эффективности пассивного и активного гасителей колебаний по акселерограмме землетрясения в Сан-Франциско

Эффективность работы реактивного гасителя была оценена в сравнении с работой пассивного динамического трехмассового гасителя. Численный эксперимент был произведен по акселерограмме землетрясения в Сан-Франциско продолжительностью 2,5 секунды (рис.9). Из результатов исследования видно, что максимальные перемещения конструкции без гасителя колебаний доходят до 4 см. А установленные гасители колебаний уменьшают эти перемещения. При этом активный жидкостный гаситель колебаний работает значительно эффективнее пассивного трёхмассового динамического гасителя колебаний. Он мгновенно включается в работу и практически сводит к нулю перемещения конструкции. При этом пассивный гаситель уменьшает максимальные перемещения конструкции максимум в два раза. Пассивный гаситель включается в работу после первого значительного колебания, и его работа становится эффективной перед завершением землетрясения. Можно сделать вывод, что для борьбы с данным видом землетрясения больше

подходит активный гаситель колебаний.

Заключение.

Показано, что гашение колебаний каркасных зданий при помощи пластических накладок - весьма эффективный способ демпфирования. Эффект гашения наблюдается уже при малой толщине накладок. Накладки целесообразно располагать по всей дине элементов каркаса. Применение накладок позволяет избегать резонансных колебаний и более чем в два раза снижать амплитуду колебаний.

Установлено, что ленточные гасители являются эффективным средством гашения колебаний. Их легко можно смонтировать в существующих сооружениях. Показано, что при трапециевидном варианте (4 вариант) расположения гасителя для $f/L > 0,25$ наблюдается значительное (более 50%) снижение максимальных амплитуд колебаний куполов. Причем в проведенном численном исследовании для других пиковых значений перемещений эффект гашения колебаний достигает 80 % (в период времени 4,31-7,8 с).

Установлено, что активный гаситель существенно эффективнее пассивных гасителей при всех использованных акселерограммах. Активный гаситель колебаний практически мгновенно включается в работу. Поэтому активный гаситель наиболее эффективен при коротких по продолжительности землетрясениях, когда максимальные перемещения конструкции возникают практически сразу после начала землетрясения.

Библиографический список:

1. Шейн А.И., Чуманов А.В. Конструктивные способы гашения колебаний зданий и сооружений [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2017. №6. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no6/stroitel'naya-mehanika/6.7/at_download/file

2. Шейн А.И., Чуманов А.В. Инерционно преднапряжительная полиэстерно-ленточная система гашения колебаний циклически симметричных конструкций

купольного типа [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2019. № 10. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no8/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/10.1/at_download/file

3. Жидкостный гаситель колебаний зданий и сооружений: патент на полезную модель RU 132463 U1: МПК E04B 1/98 / Шеин А.И., Шмелёв Д.А.. № 2013115953/03, заяв. 09.04.2013, опубл. 20.09.2013. Бюл. № 26. 4 с.

4. Шеин А.И., Шмелёв Д.А. Оценка эффективности активного жидкостного гасителя колебаний высотных сооружений при нестационарных воздействиях // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 1. С. 96-103.

5. Барабаш М.С., А.В. Пикуль. Материальное демпфирование при расчете конструкций на динамические воздействия // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017. № 13 (2). С. 13-18.

6. Шеин А.И., Зайцев М.Б. Метод смещенных разностей для решения систем дифференциальных уравнений движения механических систем // Строительная механика и расчет сооружений. 2012. № 2. С. 38-41.

7. 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.