

УДК 699.841

## **ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ГАШЕНИЮ КОЛЕБАНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТЕРЖНЯ РЕАКТИВНЫМИ ГАСИТЕЛЯМИ**

*Шейн Александр Иванович,*

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

*доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе.*

*Чуманов Александр Васильевич,*

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

*аспирант, ассистент кафедры «Механика».*

### **Аннотация**

В статье описано исследование колебаний системы с одним и двумя активными гасителями колебаний при сейсмических воздействиях, смоделированных кинематическим способом. Произведено сравнение перемещений конструкции с двумя одинаковыми гасителями колебаний в зависимости от расположения гасителей колебаний при биениях по первой и второй формам колебаний и для сложной функции перемещений. По результатам исследования определено рациональное расположение гасителей колебаний по высоте конструкции.

**Ключевые слова:** колебания, гашение колебаний, реактивный гаситель колебаний, метод конечных элементов.

## **NUMERICAL EXPERIMENTS ON THE DAMPING OF VIBRATIONS OF VERTICAL ROD BY REACTIVE DAMPERS.**

*Shein Alexander Ivanovich,*

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,*

*Doctor of Sciences, Professor, Vice Rector for Research.*

***Chumanov Alexander Vasilevich,***

*Penza State University of Architecture and Construction, Penza,*

*Post-graduate student, Assistant of the department “Mechanics”.*

## **Abstract**

The article describes the study of vibrations of a system with one and two vibration dampers under the influence of seismic action, modeled by a kinematic method. A comparison of the displacements of the structure with two vibration dampers depending on the location of the vibration dampers for the first and second forms of oscillations and for the complex function of displacements is made. according to the results of the study, the rational arrangement of vibration dampers on the height of the structure is determined.

**Keywords:** vibration, vibration damping, finite element method.

Каркасные здания в период эксплуатации могут быть подвержены экстремальным динамическим нагрузкам из-за ураганных ветровых или сейсмических воздействий, что вызывает колебательное движение каркаса со значительными перемещениями и деформациями колонн и ригелей. Проблема гашения и предотвращения колебаний разрабатывалась в трудах многих российских ученых [1-19]. Ряд работ по различным приемам гашения колебаний опубликовано и учеными кафедры механики ПГУАС [20-29].

Исследование гашения колебаний реактивными гасителями конструкции под воздействием сил, возникающих при перемещении основания конструкции, производилось на примере вертикального стержня с массами, сосредоточенными в узлах стержневых конечных элементов. Перемещение основания задавалось гармонической функцией, зависящей от времени:

$$\Delta(t) = \Delta_0 \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (1)$$

где  $\Delta_0$  – амплитуда колебаний основания стержня;

$\omega$  – частота колебаний основания стержня;

$t$  – момент времени.

Длина каждого конечного элемента 3 метра, количество стержней – 10.

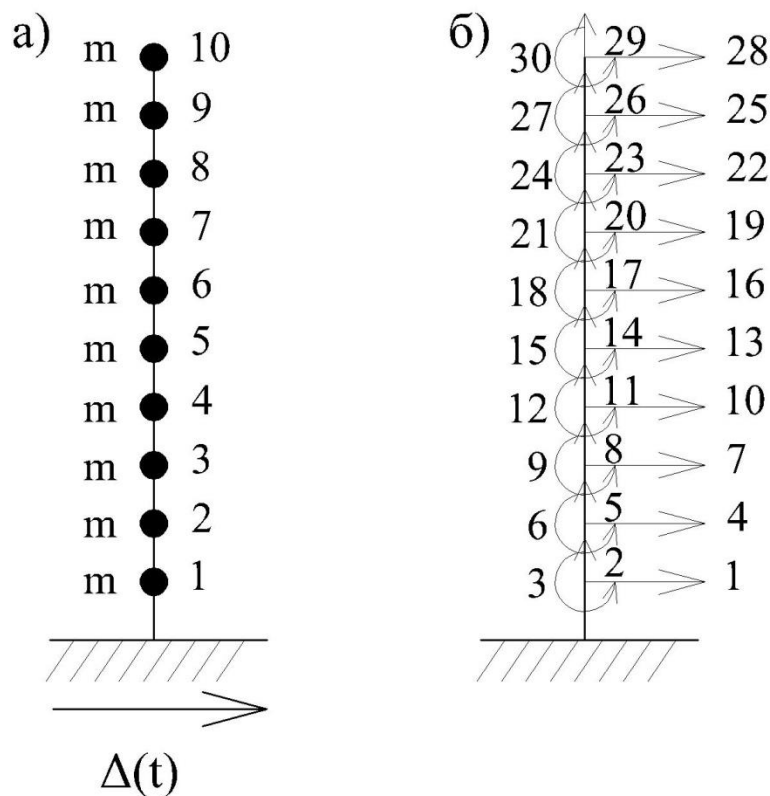


Рисунок 1 – Расчетная схема стержня: а) распределение масс стержня; б) положительные направления перемещений в узлах стержней

Расчеты произведены методом конечных элементов:

$$M\ddot{U} + KU = P + F \quad (2)$$

- где М – матрица масс;  
 $\ddot{U}$  – вектор ускорений;  
 К – матрица жесткости;  
 U – вектор перемещений;  
 P – вектор внешних нагрузок;  
 F – вектор реактивных сил.

Матрица масс имеет вид:

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & \vdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_1 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & & & & \dots & \\ 0 & 0 & 0 & m_{10} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & m_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_{10} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $m_i$  – масса, сосредоточенная в узле  $i$  стержня,  $I_i$  – момент инерции узла  $i$  стержня.

Матрица жесткости составляется из суммы матриц жесткости каждого из стержней:

$$K = \sum K_i. \quad (4)$$

Матрица жесткости одного стержня имеет вид:

$$K_i = \begin{matrix} & i-2 & i-1 & i & i+1 & i+2 & i+3 \\ \begin{bmatrix} \frac{EA_i}{l_i} & 0 & 0 & -\frac{EA_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_{xi}}{l_i^3} & \frac{6EI_{xi}}{l_i^2} & 0 & -\frac{12EI_{xi}}{l_i^3} & \frac{6EI_{xi}}{l_i^2} \\ 0 & \frac{6EI_{xi}}{l_i^2} & \frac{4EI_{xi}}{l_i} & 0 & -\frac{6EI_{xi}}{l_i^2} & \frac{2EI_{xi}}{l_i} \\ -\frac{EA_i}{l_i} & 0 & 0 & \frac{EA_i}{l_i} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_{xi}}{l_i^3} & -\frac{6EI_{xi}}{l_i^2} & 0 & \frac{12EI_{xi}}{l_i^3} & -\frac{6EI_{xi}}{l_i^2} \\ 0 & \frac{6EI_{xi}}{l_i^2} & \frac{2EI_{xi}}{l_i} & 0 & -\frac{6EI_{xi}}{l_i^2} & \frac{4EI_{xi}}{l_i} \end{bmatrix} & \begin{matrix} i-2 \\ i-1 \\ i \\ i+1 \\ i+2 \\ i+3 \end{matrix} \end{matrix} \quad (5)$$

Вектор внешних нагрузок состоит из двух компонентов: по горизонтальному направлению инерционные силы от перемещения основания, по вертикальному направлению силы тяжести.

$$P = \begin{pmatrix} m_1 \cdot \ddot{\Delta}(t) \\ -m_1 g \\ 0 \\ \dots \\ m_{10} \cdot \ddot{\Delta}(t) \\ -m_{10} g \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Элементы вектора реактивных сил зависят от расположения гасителей и направления скорости движения узла конструкции.

Закон перемещения основания в исследовании задавался тремя способами:

- для биений по первой форме:

$$\Delta_1 = -0,02 \cdot \sin(3,3 \cdot t), \text{ м}; \quad (7)$$

- для биений по второй форме:

$$\Delta_2 = -0,005 \cdot \sin(23 \cdot t), \text{ м}; \quad (8)$$

- сложная функция

$$\Delta_2 = -0,03 \cdot \sin(5 \cdot t) - 0,004 \cdot \sin(20 \cdot t), \text{ м} \quad (9)$$

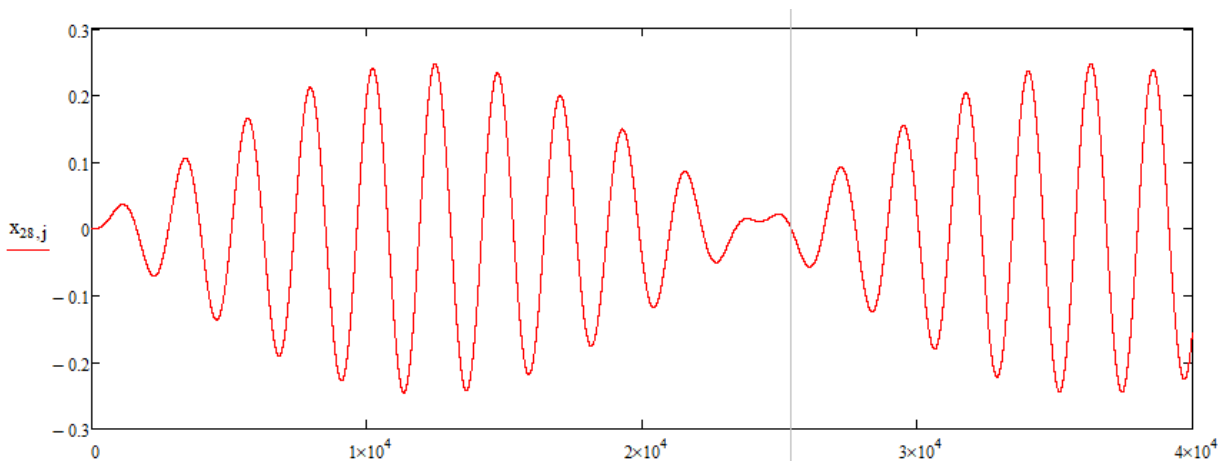


Рисунок 2 – График перемещений верхнего конца стержня при первой форме колебаний, максимальное перемещение 247 мм

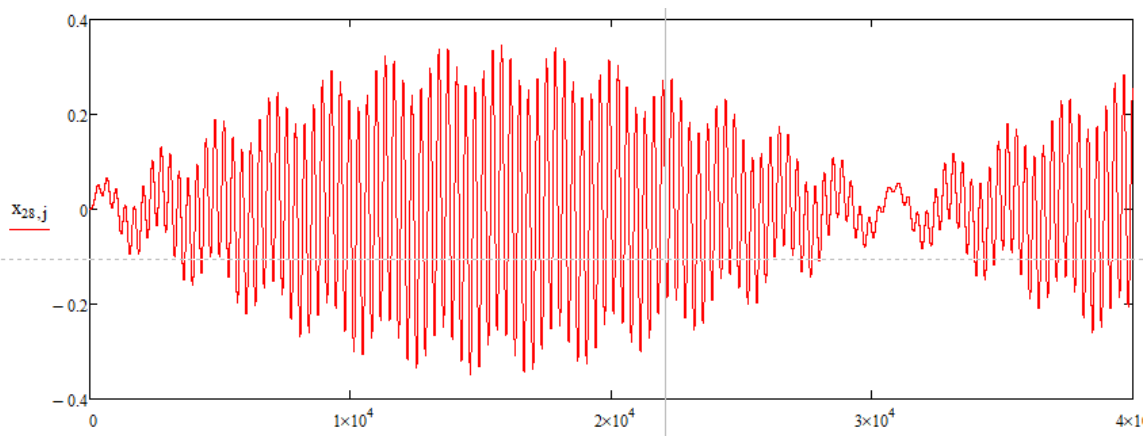


Рисунок 3 – График перемещений верхнего конца стержня при второй форме колебаний, максимальное перемещение 347,1 мм

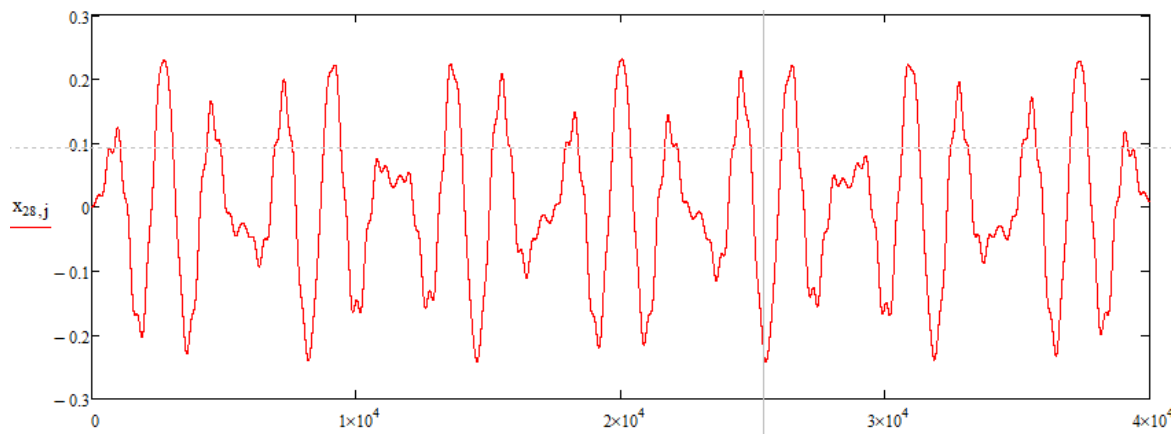


Рисунок 4 – График перемещений верхнего конца стержня при перемещении основания стержня по сложной функции, максимальное перемещение 230,2 мм

Проведем исследование колебаний при различном расположении двух гасителей колебаний. Один из гасителей установлен на верхнем ярусе (на уровне десятой массы), второй гаситель колебаний устанавливался на различных ярусах. Результаты приведены в таблице 2.

Вектор реактивных сил, например, для расположения гасителей на уровнях шестой и десятой масс имеет вид.

$$F = \begin{pmatrix} 0 \\ \dots \\ \pm F_{\Gamma} \\ \dots \\ \pm F_{\Gamma} \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} 1 \\ \\ 16 \\ \\ 28 \\ \\ 30 \end{matrix} \quad (10)$$

Значения сил реактивного гашения, используемых в расчете: для первой формы  $F_{\Gamma}=120$  Н, для второй формы и сложной функции  $F_{\Gamma}=700$  Н.

Таблица 1

Расположение второго гасителя колебаний, ярус	Максимальные перемещения, мм		
	Первая форма колебаний	Вторая форма колебаний	Сложная функция
9	0,24	89,4(90)	52,6(26)
8	0,19	139,5(137,8)	40,1(20,3)
7	0,75	93,4(92,9)	39,9(19,4)
6	4	57,9(57,4)	37,5(18,2)
5	34,2	41,4(41,5)	31,8(15,9)
4	61,7	112,1(112,5)	41,5(18,6)

Примечание: в скобках указаны максимальные перемещения пятого яруса стержня; при размещении второго гасителя ниже 4 яруса максимальные перемещения значительно увеличиваются.

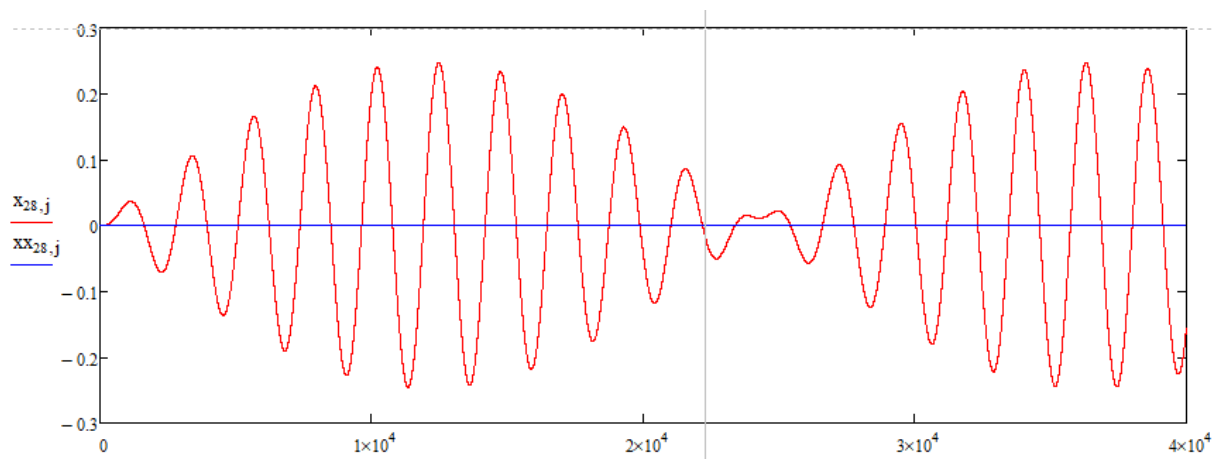


Рисунок 5 – Гашение колебаний первой формы, второй гаситель на 8 ярусе  
(синим цветом – с гасителем, очень высокая эффективность)

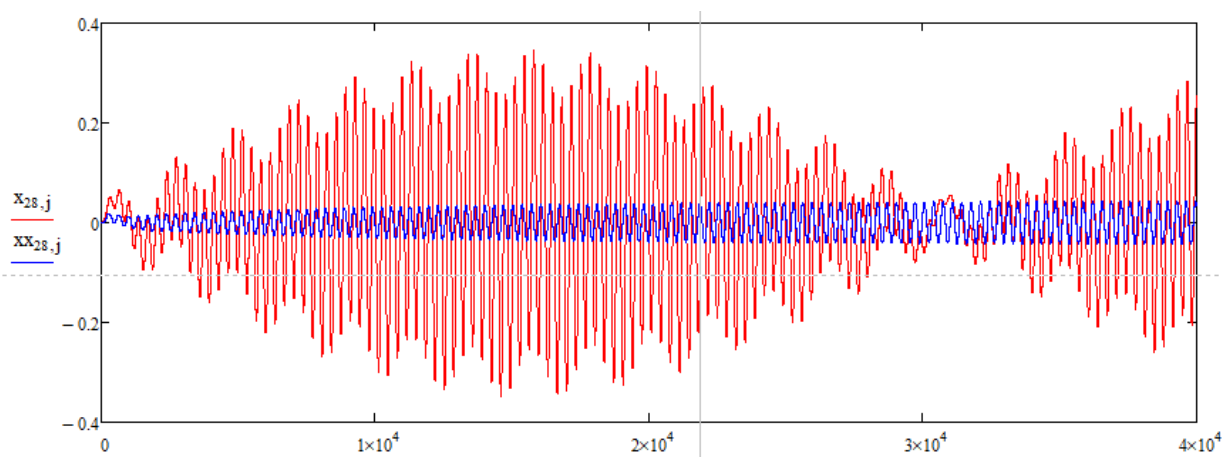


Рисунок 6 – Гашение колебаний второй формы, второй гаситель на 5 ярусе

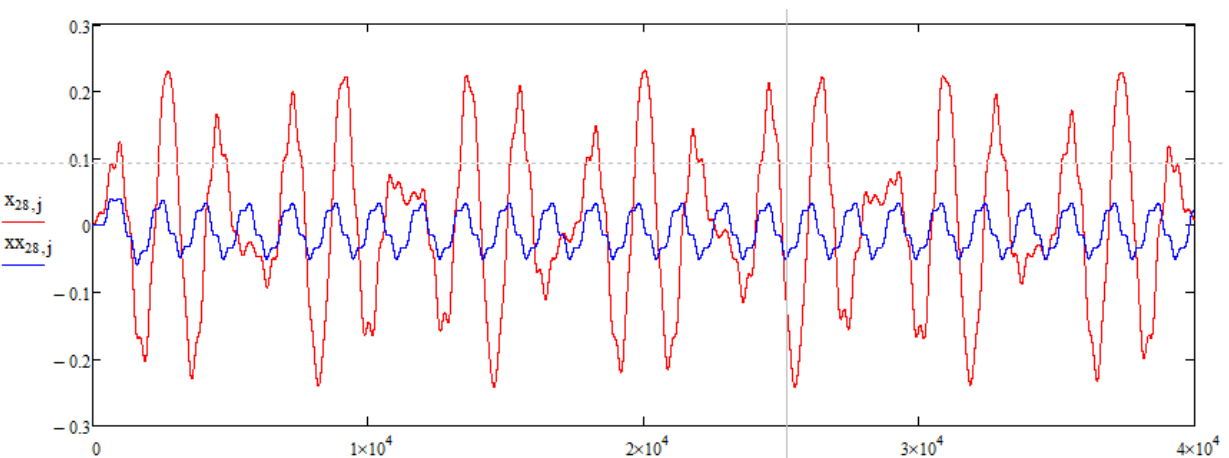


Рисунок 7 – Гашение колебаний сложной функции, второй гаситель на 5 ярусе



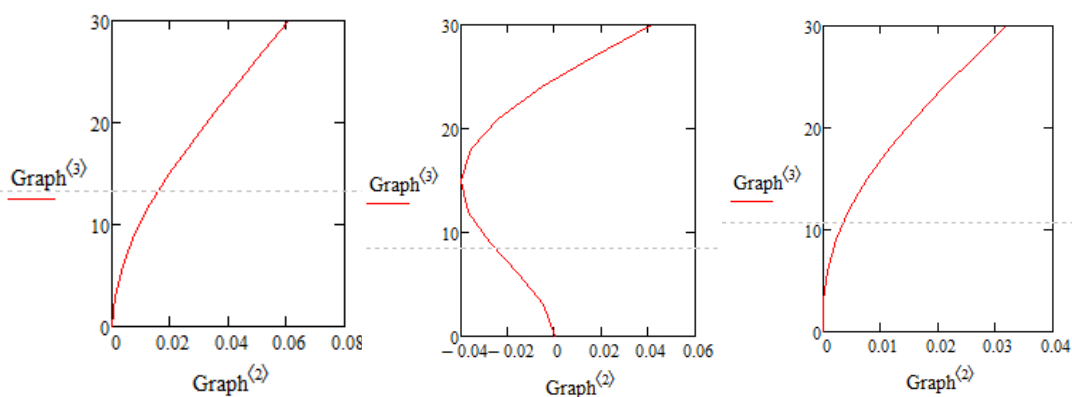


Рисунок 8 – Изогнутая ось стержня при первой форме, втором форме колебаний и сложной функции соответственно

Эффективность каждого варианта расположения гасителей оценим по отношению максимального перемещения с гасителями колебаний к максимальным перемещениям без гасителей. Затем по минимальному среднему значению отношений определим наиболее рациональное расположение гасителей колебаний.

Таблица 2

Расположение второго гасителя колебаний, ярус	Первая форма колебаний	Вторая форма колебаний	Сложная функция	Среднее значение
9	0,001	0,258	0,229	0,163
8	0,0008	0,402	0,174	0,192
7	0,003	0,269	0,173	0,148
6	0,016	0,167	0,163	0,115
5	0,138	0,119	0,138	0,132
4	0,25	0,323	0,18	0,251

По результатам исследования наиболее рациональное расположение 2 гасителей колебаний для равноценного гашения колебаний, как первой, так и второй формы колебаний следующее: один из гасителей должен быть

расположен в верхней точке конструкции, второй гаситель – на высоте 60 % от высоты всей конструкции.

### **Библиографический список:**

1. Дукарт А.В., Олейник А.И. Мультиконтинуальный гаситель колебаний цилиндрической оболочки // Известия вузов. Строительство. 2007. № 12. С. 10-18.

2. Дукарт А.В. Об эффективности двух массового динамического гасителя колебаний с ударным звеном и частотно-независимым трением при гармонических воздействиях // Известия вузов. Строительство. 2009. № 1. С. 7-28.

3. Дукарт А.В. Об эффективности одно массового динамического гасителя колебаний при негармонических периодических возмущающих нагрузках // Известия вузов. Строительство. 2010. № 2. С. 80-90.

4. Дукарт А.В. Оптимальные параметры и эффективность динамического гасителя с частотно-независимым трением в режиме основного импульсного резонанса // Известия вузов. Строительство. 2010. № 7.

5. Дукарт А.В. О переходных режимах колебаний одно массовой системы с ударным гасителем при заданных начальных условиях // Известия вузов. Строительство. 2011. № 6. С. 16-23.

6. Дукарт А.В. О переходных режимах колебаний защищаемого объекта с гасителем, расположенного на поддерживающей конструкции, при действии на неё одиночного импульса // Известия вузов. Строительство. 2012. № 5. С. 117-127.

7. Дукарт А.В. Параметры и эффективность ударного гасителя колебаний для локальной виброзащиты гибких элементов, опирающихся на массивную конструкцию при действии на неё периодических импульсов // Известия вузов. Строительство. 2012. №8. С. 12-21.

8. Дукарт А.В., Олейник А.И. О влиянии нелинейности параметров построечного звена двух массового динамического гасителя на его

эффективность при гармоническом воздействии с нестабильной частотой // Известия вузов. Строительство. 2013. №8. – С. 13-22.

9. Дукарт А.В., Олейник А.И. Об эффективности динамических гасителей при пусковом режиме прохождения виброизолированной конструкции через резонанс // Известия вузов. Строительство. 2014. № 4. С. 13-23.

10. Дукарт А.В., Олейник А.И. Двухслойный континуальный гаситель колебаний // Известия вузов. Строительство. – 2014. - № 8.- С. 5-14.

11. Остроумов Б.В. Воплощение идей Б.Г. Коренева в области оснащения высотных сооружений динамическими гасителями колебаний // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 11. С. 13-46.

12. Шермухамедов У.З. Влияние точности настройки динамических гасителей колебаний на сейсмостойкость строительных конструкций // Сейсмостойкое строительство. 2011. №2. С. 55-57.

13. Жгутова Т.В. К вопросу использования двух пролетных строений для гашения сейсмических колебаний опор мостов // Сейсмостойкое строительство. 2011. №2. С. 64-67.

14. Ленковский Г.Ф., Севастьянов В.В. Сейсмоизоляция здания с динамическим гасителем колебаний // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2013. № 3. С. 77-80.

15. Остроумов Б.В. Особенности «работы» высотных сооружений с установленными на них динамическими гасителям колебаний // Строительная механика и расчёт сооружений. 2013. № 4. С. 56-58.

16. Коренев Б.Г. ,Резников Л.М. Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения.-М.:Наука,1988.-303с.:ил.-Библиогр.:с.292-303.

17. Джинчвелашвили Г.А., Мкртычев О.В. Эффективность применения сейсмоизолирующих опор при строительстве зданий и сооружений // Транспортное строительство. 2003. №9. С. 15-19.

18. Черепинский Ю.Д., Гусев М.Н. Проблемы сейсмостойкости зданий с использованием сейсмоизолирующих конструктивных решений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2006. №5. С.53-55

19. Соболев В.И. Дискретно-континуальные модели в процессах динамического взаимодействия виброактивного оборудования и конструкций здания // Сейсмостойкое строительство и безопасность сооружений. М., 2003. № 4. С. 3.

20. Шеин А.И. Математическое моделирование механических систем на примере задачи гашения колебаний высотных сооружений [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2015. №1. Системные требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no1/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/matematicheskoe-modelirovanie-mehanichestskih-sistem-na-primere-zadachi-gasheniya-kolebanii-vysotnyh-sooruzhenii/at\\_download/file](http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no1/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/matematicheskoe-modelirovanie-mehanichestskih-sistem-na-primere-zadachi-gasheniya-kolebanii-vysotnyh-sooruzhenii/at_download/file).

21. Шеин А.И., Шмелев Д.А. Оценка эффективности активного жидкостного гасителя колебаний высотных сооружений при нестационарных воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. №1(252). С. 59-63.

22. Шеин А.И., Бакушев С.В., Зайцев М.Б., Земцова О.Г. Гашение колебаний высотных сооружений: в 3-х ч. Ч.1. Современное состояние проблемы : монография. Пенза: ПГУАС, 2011. 235с.

23. Шеин А.И., Земцова О.Г. Схемы и теория гасителей пространственных колебаний сооружений // Региональная архитектура и строительство. 2010. №1. С. 45-52.

24. Шеин А.И., Земцова О.Г. Снижение уровня колебаний системы «упругое основание – высотное сооружение» с помощью нелинейного динамического гасителя // Региональная архитектура и строительство. 2011. №2. С. 83-90.

25. Шеин А.И., Бочкарев Р.В. Использование композитных систем типа «упругий-пластический» для гашения колебаний конструкций [Электронный

ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2015. №2. Системные требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no2/stroitel'naya-mehanika/2.4/at\\_download/file](http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no2/stroitel'naya-mehanika/2.4/at_download/file)

26. Шейн 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.

27. Шейн А.И., Земцова О.Г. Методика математического моделирования маятникового гасителя пространственных колебаний для сооружений башенного типа [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2016. №3. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no3/matematiceskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/3.3/at\\_download/file](http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no3/matematiceskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/3.3/at_download/file)

28. Шейн А.И., Кузнецов А.Н., Чуманов А.В. Моделирование ветровых воздействий на высотные сооружения [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2016. №4. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: [http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no4/matematiceskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/4.1/at\\_download/file](http://mechanics.pguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no4/matematiceskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/4.1/at_download/file)

29. Шейн Александр Иванович, Земцова О. Г. Гашение колебаний высотных сооружений [Текст]: монография. Ч.2: Математическое моделирование объектов с гасителями при ветровой нагрузке / А.И. Шейн, О.Г. Земцова. Пенза: Изд-во ПГУАС, 2012. 131 с.