

УДК 624.04

ОСОБЕННОСТИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ЦИКЛИЧЕСКИ-СИММЕТРИЧНЫХ РАМНЫХ СИСТЕМ

Шейн 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».

Аннотация

В работе описывается способ анализа собственных форм колебаний циклически-симметричных рамных систем в зависимости от угла наклона пирамидальных систем и углов наклона меридиональных ребер высоких и пологих куполов. Приводится краткий обзор литературы по исследованию прочности, устойчивости и колебаний циклически-симметричных рам.

Ключевые слова: циклически-симметричные рамы, колебания, собственные формы колебаний, углы наклона меридиональных элементов.

FEATURES OSCILLATING MOVEMENTS CYCLICALLY SYMMETRIC FRAME SYSTEMS

Shein Alexander Ivanovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

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

Chumanov Alexander Vasilevich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

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

Annotation

The paper describes a method for analyzing the eigenforms of oscillations of cyclically symmetric frame systems depending on the angle of inclination of the pyramidal systems and the angles of inclination of the meridional edges of high and flat domes. A brief review of the literature on the study of strength, stability and oscillations of cyclically symmetric frames is given.

Keywords: cyclically symmetric frames, oscillations, eigenforms of oscillations, angles of inclination of meridional elements.

Введение. Пространственные каркасы различных зданий и сооружений часто проектируются в виде циклически симметричных рам (купола, башни, градирни, локаторы и т. д.). Циклически-симметричными принято называть рамы, имеющие форму правильного многоугольника и состоящие из жестко связанных между собой в узлах элементов, расположенных в меридиональных и параллельных плоскостях. Будучи повернутыми вокруг своей оси на определенный угол, они совмещаются со своим первоначальным положением. Указанные рамные системы относятся к конструкциям, которые должны обладать высокой степенью безопасности. В то же время эти конструкции могут быть подвергнуты пульсационным, периодическим нагрузкам, такими как ветровые и сейсмические воздействия. Под действием таких нагрузок в циклически-симметричных рамных системах могут развиваться чрезмерные колебания, способные вызвать необратимые пластические деформации элементов каркаса и разрушение ограждающих конструкций. Поэтому разработка способов гашения колебаний циклически-симметричных рамных систем представляет собой актуальную задачу.

Методы расчета циклически-симметричных рамных систем на прочность и устойчивость разрабатывались в работах В.Г. Чудновского [1,2], Д.В. Вайнберга [2], Б.Н. Горбунова, А.И. Стрельбицкой, Ю.В. Кротова, В.А. Лебедева, М.А. Бородянского, О.Н. Токаревой, А.И. Шеина, Б.В. Лабудина [3], Щупикова А.Н, Мисюры С.Ю. [4] и др.

Колебания циклически-симметричных систем рассматривались в работах В.Г Чудновского [1,2], Д.А. Насонова [6], А.А. Ларина [7], О.В. Репецкого [8], О.Ф.Борискина [9] и др.

Вопросы гашения колебаний призматических башен исследовались в работах А.И. Шеина, О.Г. Земцовой, Д.А. Шмелева, А.В. Чуманова [10-20]

Физико-математическая модель. Остановимся на предпосылках, положенных в основу построения математической модели колебаний циклически-симметричных рамных систем, а именно:

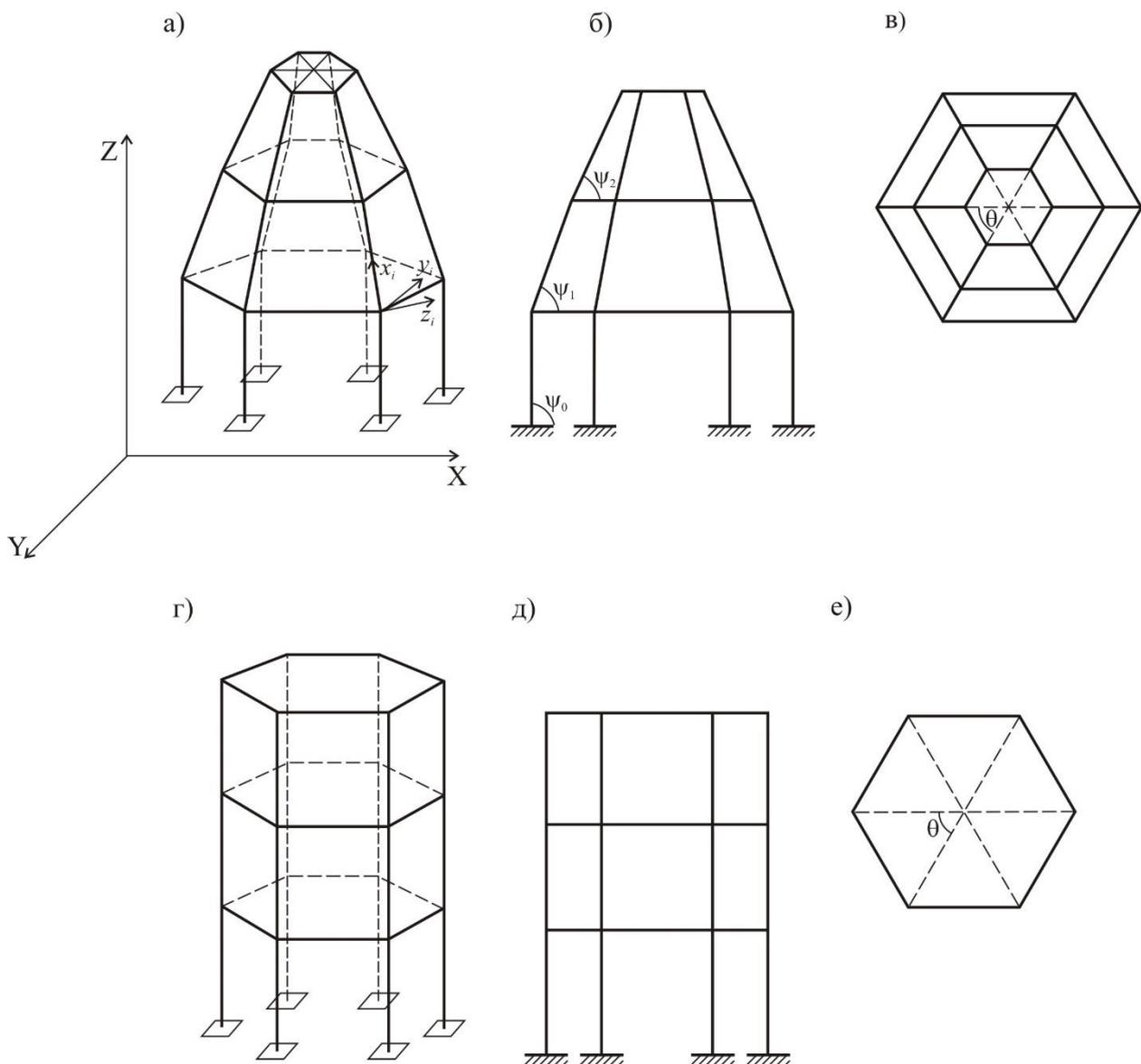
- конфигурация рам задается линиями, совпадающими с центрами тяжести составляющих их элементов;
- под циклической симметрией понимается как геометрическая, так и физическая симметрия;
- все стержни, входящие в состав рамы прямолинейны и имеют постоянное поперечное сечение;
- в основу построения математических моделей рам положен метод конечных элементов;
- все инерционные характеристики и внешние нагрузки сосредоточены в узлах рамы;
- все элементы рам выполняются из однородных материалов;
- все элементы одного яруса, лежащие в данной параллельной плоскости имеют одинаковые сечения;
- все стойки данного этажа имеют одинаковые сечения.

Конфигурация циклически-симметричной рамы обусловлена следующими параметрами: числом меридиональных ребер; числом ярусов; углами наклона элементов меридионального ребра ψ_i (рис. 1а,б,с).

При $\psi_i = Const$ (рис.1ж,з,и) получим циклически-симметричную раму пирамидального типа. При $\psi_i = Const = 90^\circ$ получим призматическую раму (рис. 1 г, д, е). При изменении угла ψ_i получим куполообразные рамы (рис. 1 а, б, в).

При закреплении за кольцо ближайшее к вершине купола получаем циклически-симметричную рамную систему антенны или локатора (рис. 1 к, л, м).

Цель исследований. При решении задачи гашения колебаний механической системы необходимо знать собственные частоты и собственные формы колебаний конструкции, поскольку именно на этих частотах возможны резонансные явления. Гаситель колебаний должен иметь возможность (настройки) полезно работать на этих частотах. Поэтому, в первую очередь, определим собственные частоты и собственные формы колебаний циклически симметричных рам. Кроме того, постараемся выявить те геометрические особенности, конфигурации пирамидальных рам и куполов, при которых происходит качественные изменения в формах колебаний этих систем.



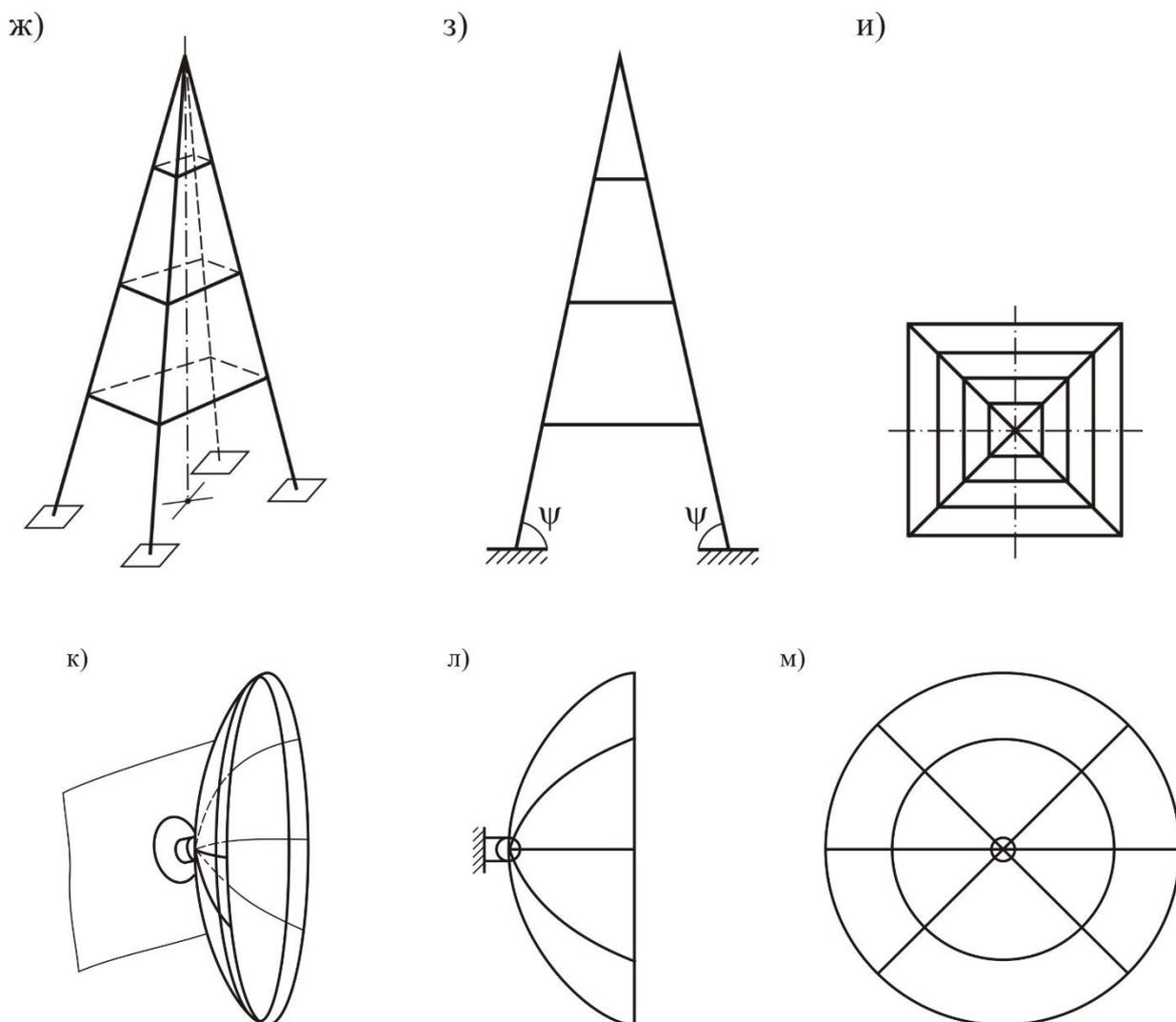


Рисунок 1 – Циклически-симметричные рамы

Результаты исследования. При определении форм колебаний циклически-симметричных рам рассматривали первые три формы собственных колебаний. У рам призматического типа обнаружены следующие формы колебаний: при первых двух формах колебаний узлы конечных элементов перемещаются в плоскостях ZOX и ZOY соответственно (рис. 2а, 2б), при третьей форме колебаний перемещения узлов происходят в плоскости XOY таким образом, что правильный многоугольник, образованный стержневыми конечными элементами яруса, поворачивается относительно центра описанной окружности многоугольника (рис. 2в). Полученные первые три формы для призматических рам выявлены при любых изменениях начальных параметров

(погонные жесткости конечного элемента при изгибе и кручении, количество этажей, количество углов правильного многоугольника).

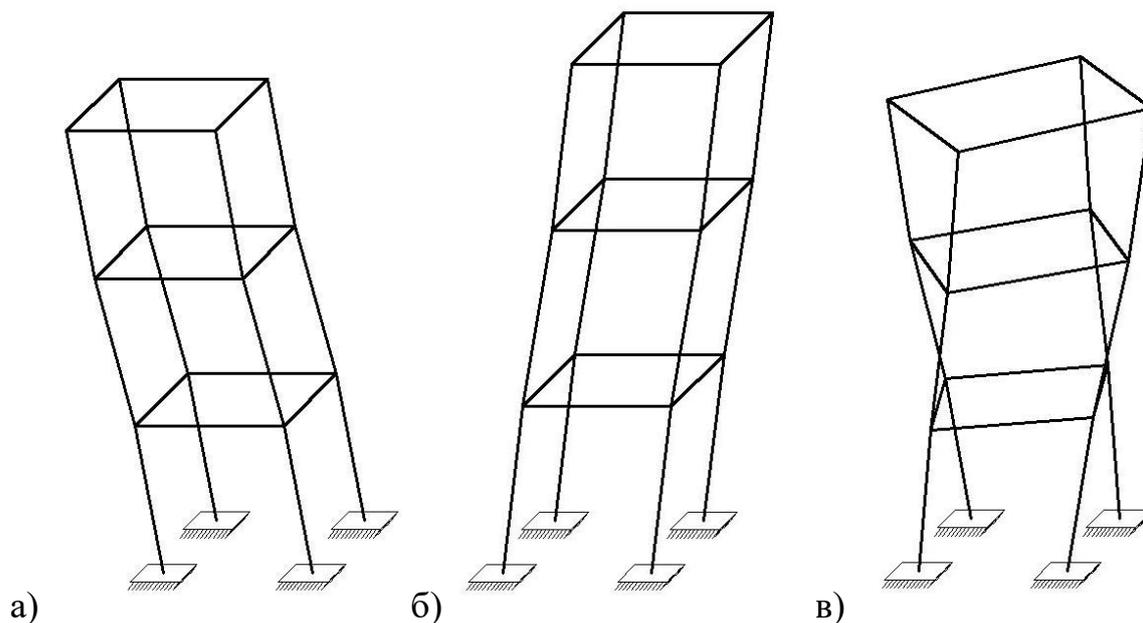


Рисунок 2 – Формы колебаний циклически-симметричных рам призматического типа

При исследовании колебаний пирамидальных рам вывалены аналогичные формы колебаний, однако при некоторых параметрах исходной схемы и геометрических характеристик наблюдается рокировка форм колебаний, т.е. первая форма колебаний крутильная (рис. 3в), а вторая и третья формы колебаний – изгибные (рис. 3а, 3б). Расчеты проводились на примере пирамиды, основание которой правильный шестиугольник.

Изучая параметры, при которых первая форма колебаний является крутильная, получили значения приведенные в таблице 1.

В данном исследовании установлены следующие закономерности:

- при уменьшении погонной жесткости при изгибе и кручении увеличивается диапазон угла ψ , при котором первая форма колебаний – крутильная;
- при большом количестве ярусов (более 10) первая форма колебаний пирамидальных рам всегда изгибная;
- при $\text{tg}\psi > 7$ первая форма колебаний изгибная.

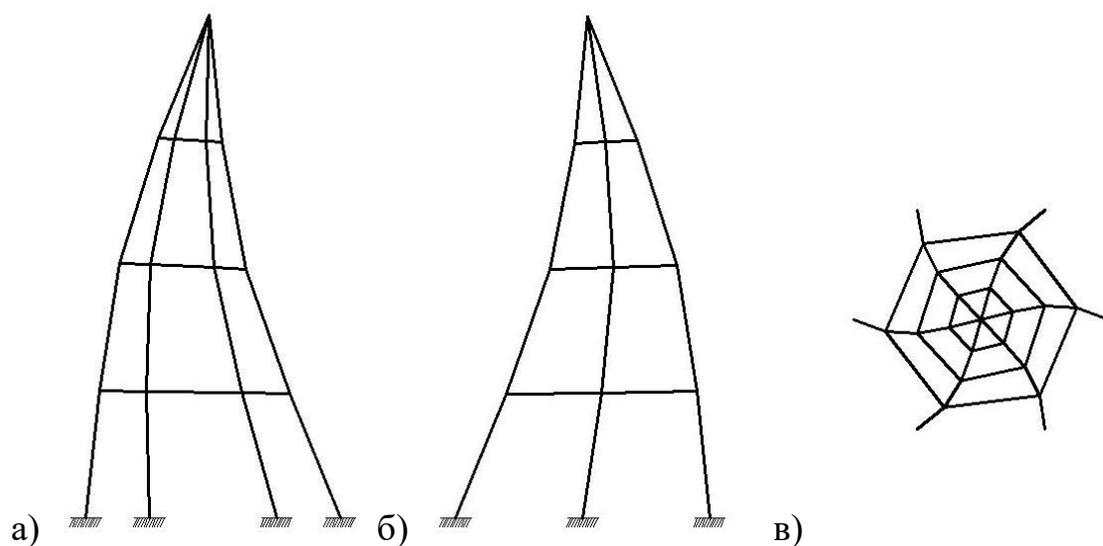


Рисунок 3 – Формы колебаний циклически-симметричных рам пирамидального типа:

- а) форма колебаний в плоскости ZOX ;
- б) форма колебаний в плоскости ZOY ;
- в) Форма колебаний в плоскости XOY

Таблица 1 – Результаты вычислений

Количество этажей	Отношение высоты пирамиды к радиусу описанной окружности шестиугольника, $\text{tg}\psi$		
	$EI_x/L=1,297 \cdot 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}^2,$ $GI_{кр}/L=1,559 \cdot 10^4 \text{ Н}\cdot\text{м}^2,$	$EI_x/L=2,594 \cdot 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}^2,$ $GI_{кр}/L=3,118 \cdot 10^4 \text{ Н}\cdot\text{м}^2,$	$EI_x/L=0,649 \cdot 10^5 \text{ Н}\cdot\text{м}^2,$ $GI_{кр}/L=0,755 \cdot 10^4 \text{ Н}\cdot\text{м}^2,$
2	0...5,24	0...5,08	0...5,29
3	0...5,76	0...5,25	0...5,29
4	0,98...5,5	0,98...4,8	0,98...5,75
5	2,24...4,38	2,48...3,3	2,2...4,68
6	-	-	-

EI_x/L – погонная жесткость вертикального конечного элемента при изгибе;

$GI_{кр}/L$ – погонная жесткость вертикального конечного элемента при кручении.

Зависимость между количеством углов многоугольника и отношением высоты пирамиды к радиусу описанной окружности, при которой первая форма колебаний крутильная показана в таблице 2 (при двухэтажной схеме).

Таблица 2

Количество углов	6	8	10	12	14	16	18	20	22
$\text{tg } \psi <$	5,24	4,87	4,61	4,39	4,23	4,1	4	3,92	3,84

Следовательно, при стремлении формы яруса к окружности, диапазон угла ψ , при котором первая форма колебаний – колебания в плоскости XOY , уменьшается.

Заключение. Основными формами колебаний в призматических циклических конструкциях являются колебания вдоль вертикальных плоскостей. В циклических конструкциях пирамидального типа в качестве первой формы колебаний могут быть и изгибные, и крутильные колебания, что должно быть учтено при обеспечении мер по их гашению.

Библиографический список:

1. Вайнберг Д.В., Чудновский В.Г. Расчет пространственных рам. Киев: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуры УССР, 1964. 308 с.
2. Уманский А.А. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический. Т.1., М.: Стройиздат, 1972. 600 с.
3. Лабудин Б.В. Совершенствование деревянных клееных конструкций с пространственно-регулярной структурой. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Архангельск, 2006. 310 с.
4. Щупиков А.Н, Мисюра С.Ю. Расчет напряжений циклически-симметричных пространственных конструкций. Вісник НТУ «ХП». 2013. № 63 (1036).

5. Чудновский В.Г. Методы расчета колебаний и устойчивости стержневых систем. Киев, 1952 г.

6. Насонов Д. А. Моделирование собственных колебаний циклически симметричных систем на базе конечных элементов со смешанной аппроксимацией перемещений полиномами высших порядков. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Калуга, 2001. 197 с.

7. Ларин А.А. Собственные колебания циклически-симметричных систем с расстройкой. Харьков, Системи обробки інформації, 2005, выпуск 7 (47).

8. Репецкий О.В., До М.Т. Математическое моделирование и численный анализ колебаний идеальных циклически-симметричных систем методом конечных элементов. Известия Байкальского государственного университета. Иркутск, 2012. № 3 (83)

9. Борискин О.Ф. Суперэлементный расчет циклически-симметричных систем Калуга: Эйдос, 1999. 230 с.,

10. 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-kolebaniy-vysotnyh-sooruzhenii/at_download/file.

11. 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.

12. 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.

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

14. 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.

15. 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 .

16. 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.

17. Шеин 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

18. Шеин 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

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

20. Шейн А.И., Чуманов А.В. Численные эксперименты по гашению колебаний вертикального стержня реактивными гасителями [Электронный ресурс] // Моделирование и механика конструкций. 2018. №8. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://mechanicspguas.ru/Plone/nomera-zhurnala/no8/matematicheskoe-modelirovanie-chislennye-metody-i-kompleksy-programm/8.2/at_download/file