

УДК 69.07, 69.04, 531.395

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ РЕАКТИВНОГО ГАСИТЕЛЯ КОЛЕБАНИЙ БАШНИ ГРАДИРНИ

Шеин Александр Иванович,

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

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

Зайцев Михаил Борисович,

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

кандидат технических наук, доцент кафедры «Механика».

Аннотация

Рассматривается активное управление динамикой колебательных движений, что позволяет существенно повысить эффективность работы гасителей механических колебаний. Показано, что управляемый реактивный гаситель может рассматриваться как основной способ гашения колебаний конструкций в условиях нестационарных (сейсмических) воздействий. В статье представлены результаты анализа влияния ряда управляемых параметров реактивного гасителя, полученные в численных экспериментах в программном комплексе, разработанном авторами, на эффективность гашения колебаний.

Ключевые слова: математическое моделирование, реактивный гаситель, сейсмическое воздействие, колебательное движение, гашение колебаний, уравнения движения МКЭ, управляемые параметры реактивного гасителя, эффективность гашения колебаний.

MATHEMATICAL MODELING OF THE OPERATION OF A REACTIVE VIBRATION DAMPENER OF A COOLING TOWER

Shein Alexander Ivanovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Doctor of Sciences, Professor, Head of the department "Mechanics".

Zaytsev Mihail Borisovich,

Penza State University of Architecture and Construction, Penza,

Candidate of Sciences, Associate Professor of the department "Mechanics".

Abstract

The active control of the dynamics of oscillatory movements is considered, which makes it possible to significantly increase the efficiency of the dampers of mechanical vibrations. It is shown that a controlled reactive dampener can be considered as the main method of damping vibrations of structures under conditions of non-stationary (seismic) impacts. The article presents the results of the analysis of the influence of a number of controlled parameters of a reactive suppressor, obtained in numerical experiments in a software package developed by the authors, on the effectiveness of vibration damping.

Keywords: mathematical modeling, reactive suppressor, seismic impact, oscillatory motion, vibration damping, equations of motion of the FEM, controlled parameters of the reactive suppressor, vibration damping efficiency.

Для снижения уровня вибраций защищаемой конструкции обычно применяют пассивные управляющие устройства – гасители колебаний различных видов [1-3]. Однако активное управление динамикой колебательных движений может существенно повысить эффективность работы гасителей. Реактивный гаситель может рассматриваться как высокоэффективный способ гашения колебаний конструкций в условиях нестационарных (сейсмических) воздействий. Принцип работы реактивного гасителя состоит в создании

знакопеременной реактивной силы, препятствующей относительным перемещениям сооружения в нужные моменты времени.

Исследуем процесс работы реактивного гасителя колебаний конструкции охладительной башни (градирни) при сейсмическом воздействии.

Форма сооружения представляет собой усеченную правильную пирамиду квадратного сечения, с размерами основания – 9х9 м и верхнего яруса – 6х6 м. Высота сооружения – 21 м.

Конструктивная схема башни – стальной каркас, состоящий из четырех угловых стоек сечением $\square 120 \times 120 \times 4$ мм. Пространственная жесткость каркаса обеспечивается горизонтальными поясами из 4 стержней сечением $\square 120 \times 120 \times 4$ мм, установленными с шагом 3 м (7 ярусов) и системой связей между стойками в виде раскосов сечением $\square 50 \times 50 \times 4$ мм. Все элементы каркаса выполнены из прокатных профилей.

Сейсмическое воздействие моделируется акселерограммой землетрясения, произошедшего в Турции 17 августа 1999. Характеристики воздействия представлены на рис. 1-3.

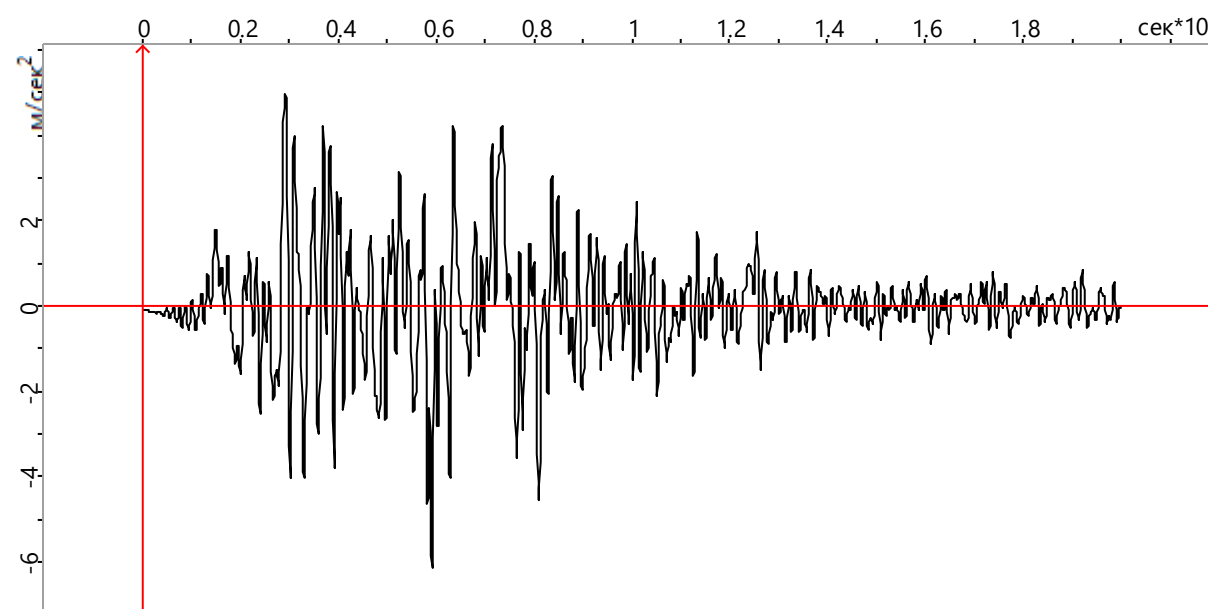


Рисунок 1 – Акселерограмма землетрясения

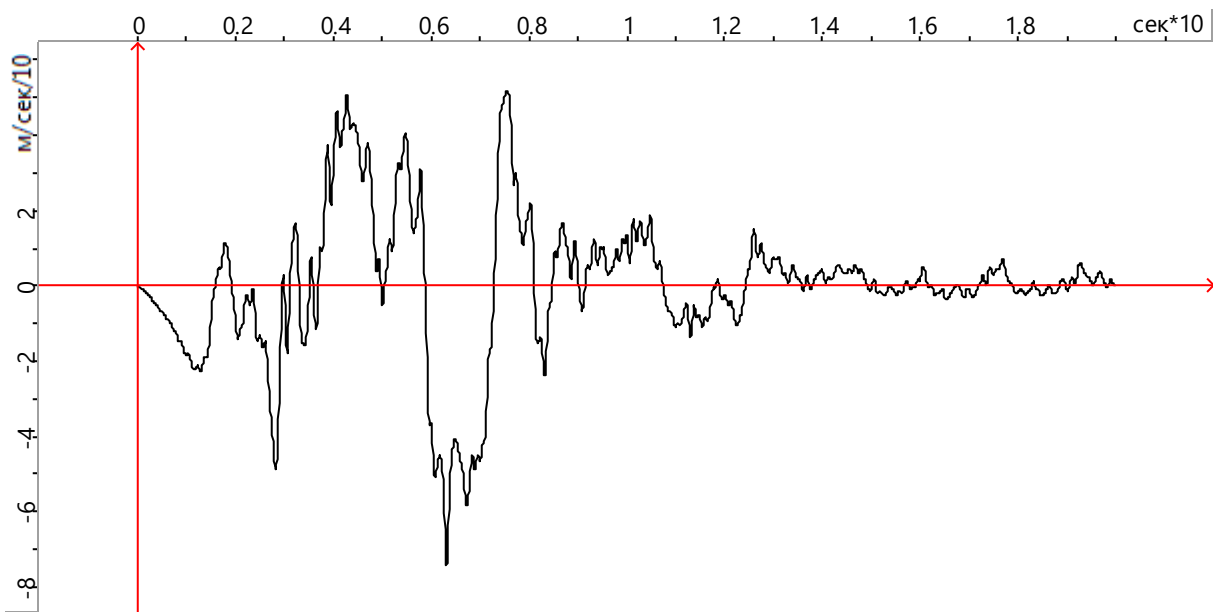


Рисунок 2 – Велосигграмма землетрясения

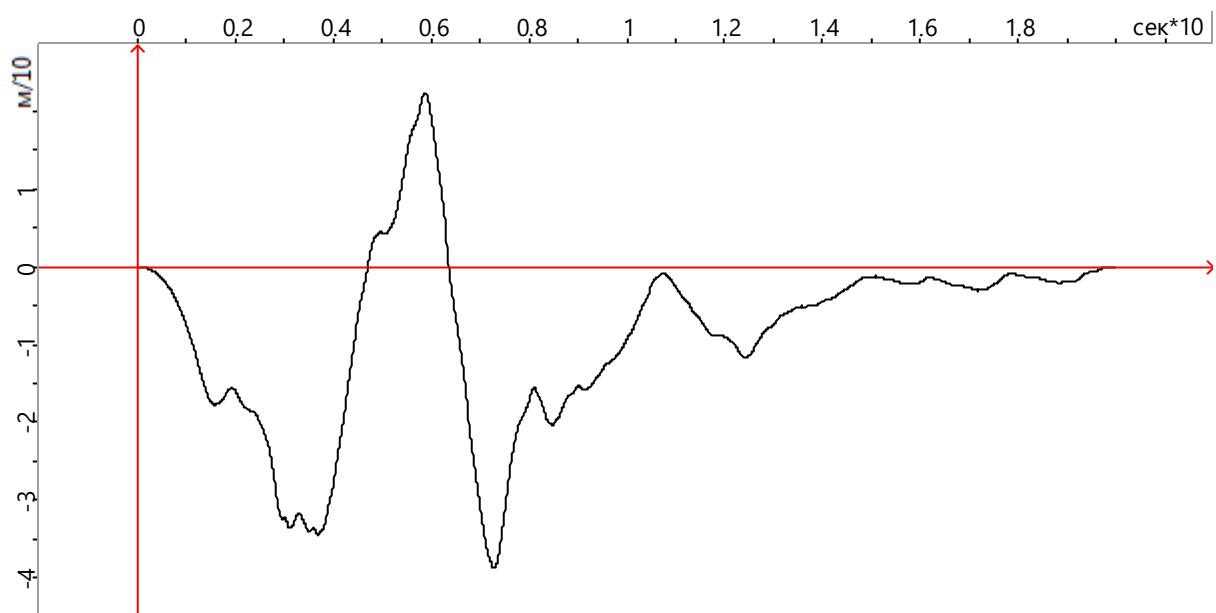


Рисунок – 3. Сейсмограмма землетрясения

Максимальное ускорение – $6,159 \text{ м/сек}^2$ достигается в момент времени $t = 5,92 \text{ сек}$, максимальная скорость – $0,743 \text{ м/сек}$ в момент времени $t = 6,32 \text{ сек}$, максимальное перемещение – $0,387 \text{ м}$ в момент времени $t = 7,29 \text{ сек}$.

Для выполнения исследования авторами разработано программное средство «Fluctuations» в среде «MatLab», и модуль «Active dampfering», реализующий интегрирование системы дифференциальных уравнений демпфируемого движения стержневой системы в форме МКЭ.

Стержневой пространственный КЭ, используемый для расчёта произвольной пространственной стержневой системы, имеет три линейных и три угловых перемещения в узле.

Ориентация вектора однокомпонентного сейсмического воздействия выбрана вдоль горизонтальной оси OY глобальной системы координат (рис.4).

Сейсмическая нагрузка на сооружение моделируется заданным смещением опор, согласно сейсмограмме (рис. 3). Дифференциальное уравнение движения имеет вид

$$M\ddot{U} + KU = P, \quad (1)$$

где

$$M = \text{diag} [M_1 \ M_2 \ \dots \ M_i + m_{i,t+\Delta t} \ \dots \ M_n], \quad (2)$$

$$P = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_i - V_{gas} (m_{i,t+\Delta t} - m_{i,t}) / (\Delta t) \ \dots \ P_n]^T, \quad (3)$$

а в вектор перемещений U , в вектор нагрузок P , в матрицу жесткости K и матрицу масс M добавлены компоненты движущихся опорных узлов. Здесь индекс i соответствует узлу с гасителем, $m_{i,t+\Delta t}$ – масса гасителя, V_{gas} – скорость выбрасываемой струи гасителя.

Конечно-элементная модель и результаты расчета в виде графиков линейных перемещений вдоль оси Y (U_y) характерных узлов стержневой системы представлены на рис. 4-5.

Основными характеристиками реактивного гасителя, обеспечивающими эффективное гашение колебаний, являются:

- скорость выбрасывания реактивной струи V_{gas} , м/с;
- время выбрасывания реактивной струи за одно включение T_{gas} , м/с;
- величина предельно допустимого относительного отклонения точек защищаемой механической системы δ_{max} , м.

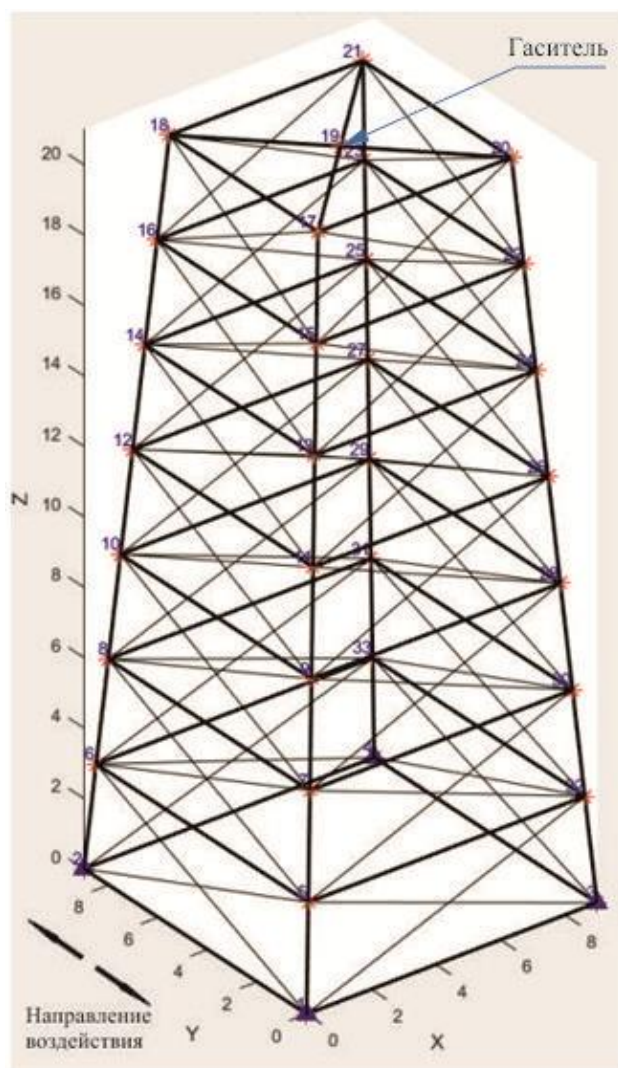


Рисунок 4 – Конечно – элементная модель стержневой системы

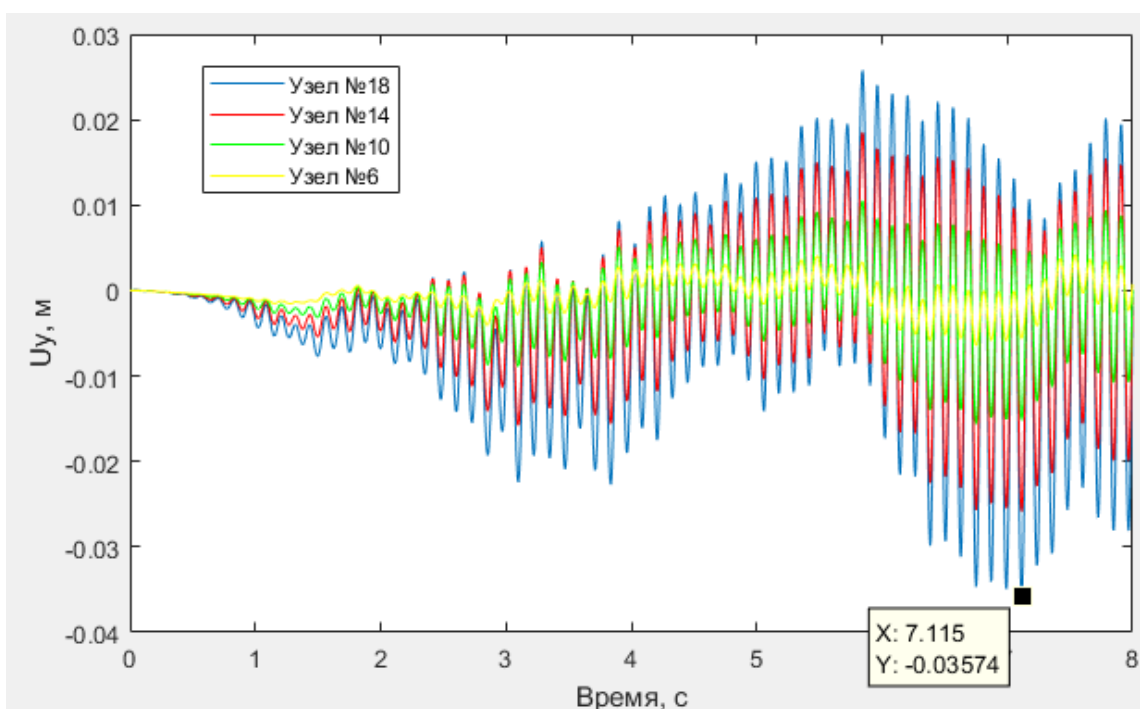


Рисунок 5 – Перемещения характерных узлов без гашения колебаний

Гаситель включается в том случае, когда контролируемое относительное перемещение какого-либо узла достигнет значения δ_{max} . Направление воздействия гасителя определяется направлением вектора относительной скорости этого узла, т.е. противоположно ему.

Например, при $V_{gas} = 1500$ м/с, $T_{gas} = 0,02$ с, $\delta_{max} = 0,005$ м получены результаты, представленные на рис.6.

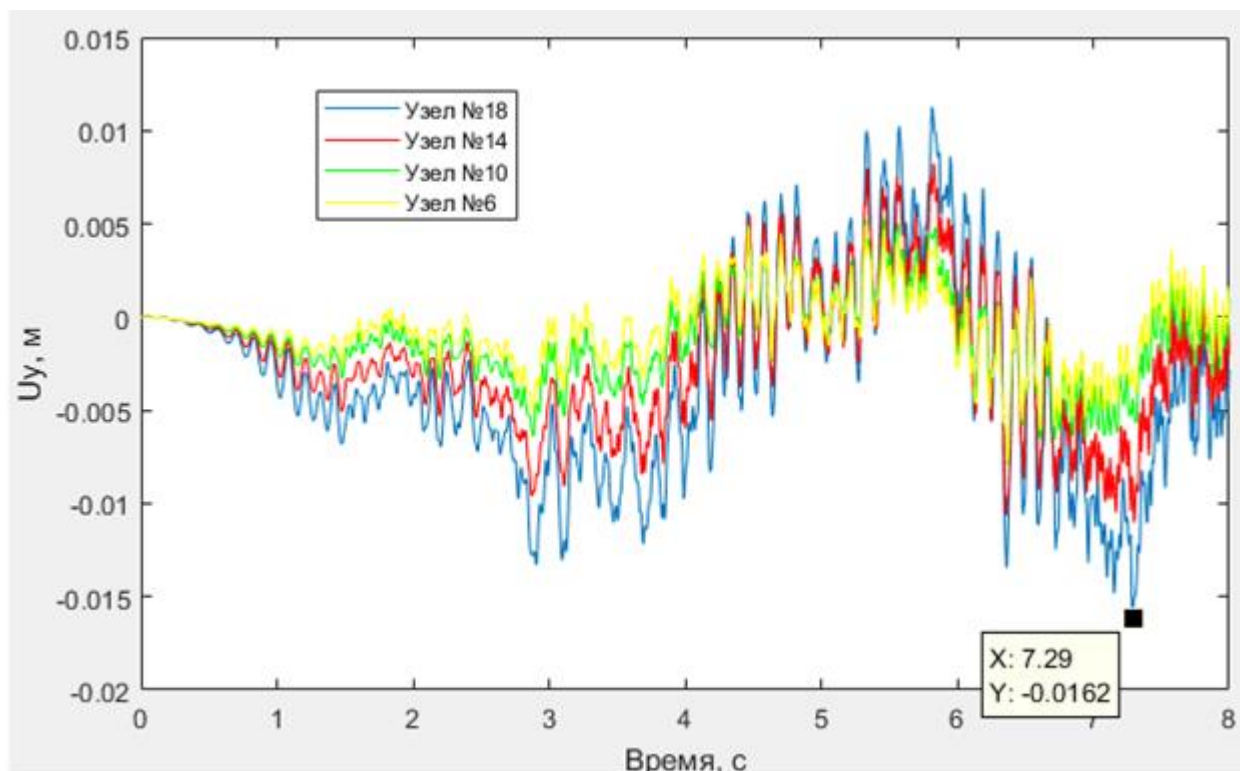


Рисунок 6 – Перемещения характерных узлов при работе гасителя

Расчет показал, что при работе гасителя максимальное относительное перемещение 18-го узла уменьшилось в 2,2 раза.

Представляет интерес, как влияют основные параметры реактивного гасителя на эффективность гашения колебаний.

На рис. 7-10 представлены графики изменения максимальных относительных перемещений характерных узлов в зависимости от изменения отдельных параметров гасителя.

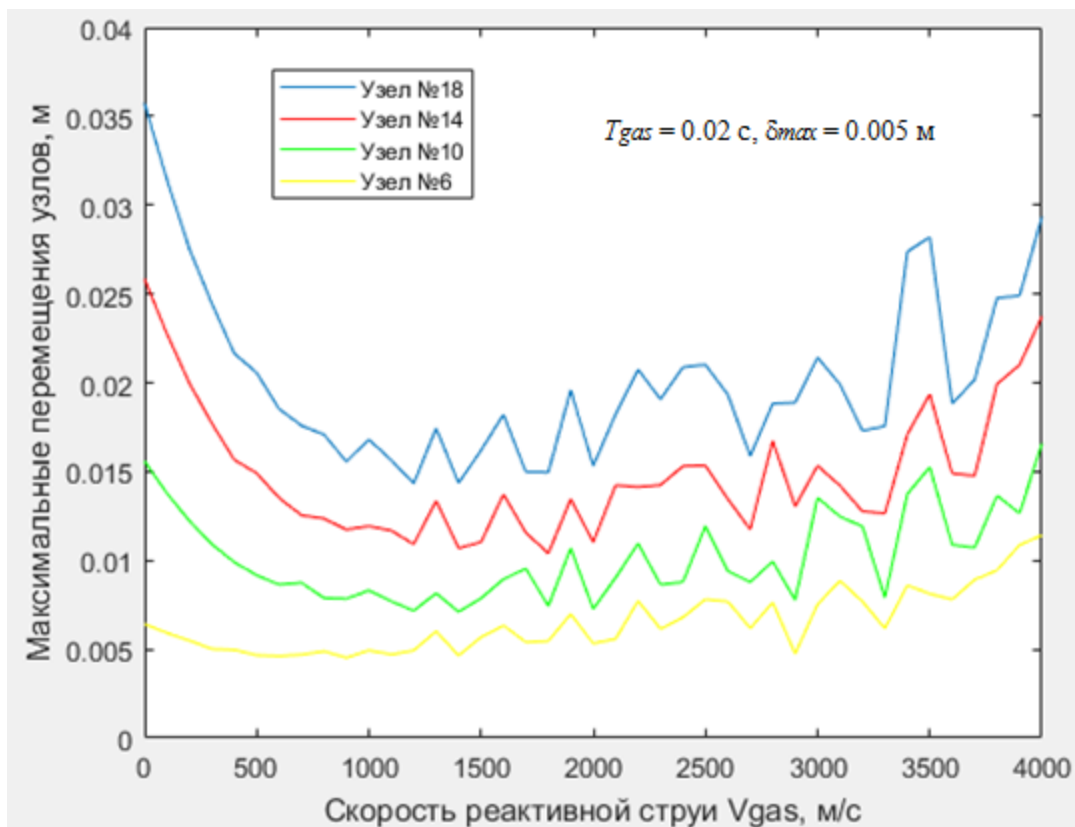


Рисунок 7 – Зависимость перемещений характерных узлов от скорости реактивной струи V_{gas}

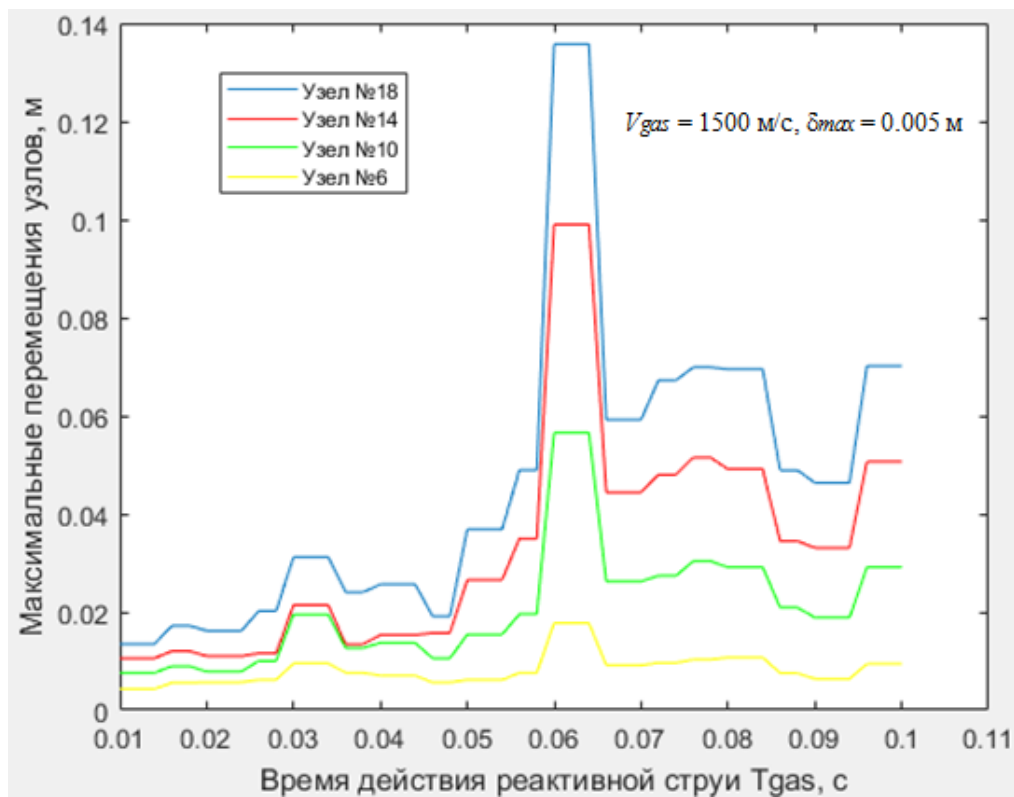


Рисунок 8 – Зависимость перемещений характерных узлов от времени действия реактивной струи T_{gas}

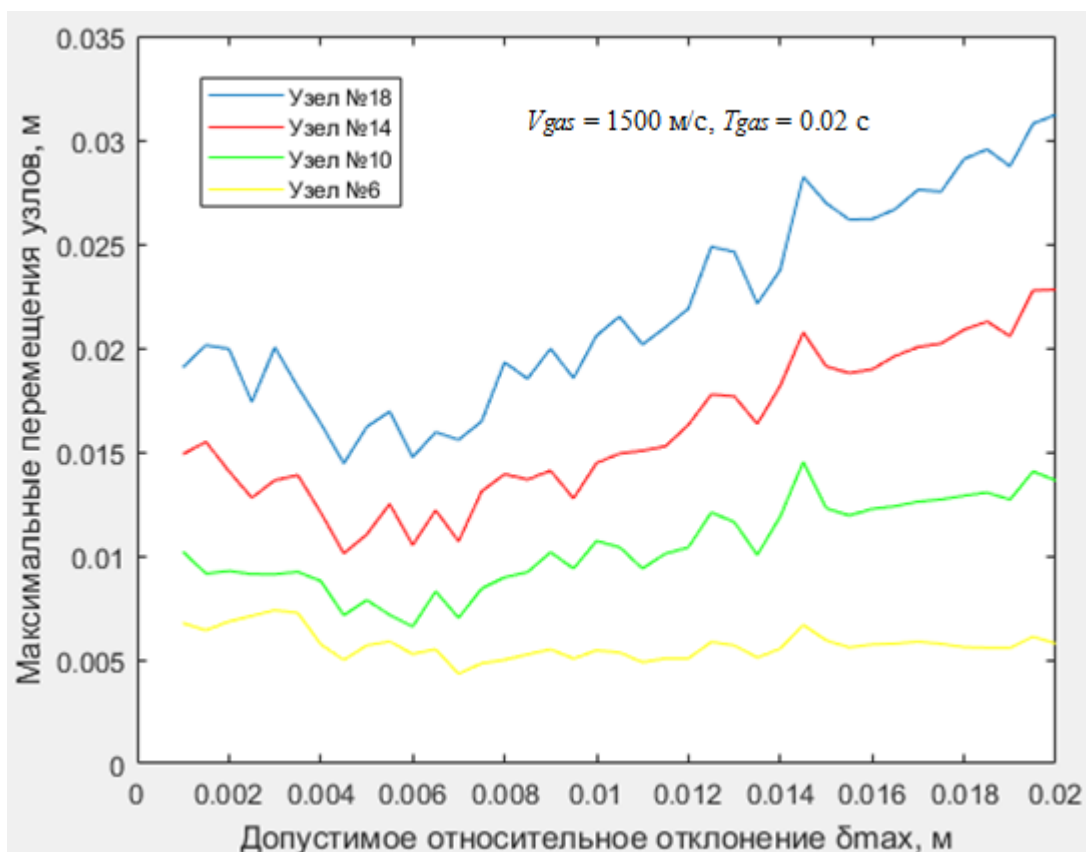


Рисунок 9 – Зависимость перемещений характерных узлов от величины предельно допустимого относительного отклонения δ_{max} .

Выводы. Представленные результаты анализа влияния ряда управляемых параметров реактивного гасителя, полученные в численных экспериментах в программном комплексе, разработанном авторами, показывают высокую эффективность реактивного гасителя в условиях нестационарных воздействий и возможность оптимизации его настроек.

Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ № 23-29-00653 «Разработка способов гашения колебаний куполообразующих и прямоугольных каркасов зданий и сооружений».

Библиографический список:

1. Шейн А.И. Гашение колебаний высотных сооружений. Часть 1. Современное состояние проблемы [Текст] / А.И. Шейн, С.В. Бакушев, М.Б. Зайцев, О.Г. Земцова. – Пенза: Изд-во ПГУАС, 2011. – 234 с.
2. Шейн А.И., Земцова О.Г. Гашение колебаний высотных сооружений,

ч. 2. Математическое моделирование объектов с гасителями при ветровой нагрузке. Пенза, ПГУАС, 2012, 131 с.

3. Шейн А.И. Снижение уровня колебаний системы «упругое основание – высотное сооружение» с помощью нелинейного динамического гасителя [Текст] / А.И. Шейн, О.Г. Земцова // Региональная архитектура и строительство. – 2011. — №2(11). – С. 83-91.

4. Стрелков С.П. Механика. М.: Наука, 1975, 560 с.

5. Уздин А.М. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. – С.-Петербург: Изд-во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1993, 176с.

6. Шейн А.И. Выбор расчетной модели для динамических испытаний гасителей колебаний высотных сооружений. [Текст] / А.И. Шейн, Д.А. Романков // Сборник трудов международной конференции «Актуальные проблемы механики в современном строительстве». – Пенза, 2013. – С.185-194.

7. Шейн А.И. Активный жидкостный гаситель колебаний высотных сооружений при сейсмических воздействиях [Текст] / А.И. Шейн, О.Г. Земцова, Д.А. Шмелёв, Р.Х. Рахматуллин // Сборник трудов международной конференции «Актуальные проблемы современного строительства». – Пенза, 2013. – С. 365-367.

8. Шейн А.И. Оценка эффективности активного жидкостного гасителя колебаний высотных сооружений при нестационарных воздействиях. [Текст] / А.И. Шейн, Д.А. Шмелев // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. №1.

9. Шейн А.И. Сравнительная оценка работоспособности реактивного жидкостного гасителя колебаний при сейсмических колебаниях башен, заданных акселерограммами. [Текст] / А.И. Шейн, Д.А. Шмелев // Сборник трудов международной конференции «Актуальные проблемы механики в современном строительстве». – Пенза, 2013. – С.175-185.

10. Шейн, А.И. Метод смещенных разностей для решения дифференциальных уравнений движения механической системы.

[Текст] / А.И. Шейн, М.Б. Зайцев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – №2. – С. 38-41.