



УДК 624.04:519.62

DOI: 10.22227/2949-1622.2023.2.58-64

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/ RESEARCH ARTICLE

Сравнительный анализ применения различных моделей демпфирования при расчете сейсмической реакции сооружений в ПК STARK ES

В.Н. Симбиркин^{1*}, Ю.В. Панасенко¹, В.В. Курнавин¹

¹ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, АО «НИЦ «Строительство», Москва, Российская Федерация

*simbirkin@eurosoft.ru

Ключевые слова: динамический расчет, метод конечных элементов (МКЭ), сейсмостойкость, жидкостно-вязкостный демпфер.

История статьи

Поступила в редакцию: 07.02.2023

Доработана: 15.02.2023

Принята к публикации: 21.02.2023

Для цитирования

Симбиркин В.Н., Панасенко Ю.В., Курнавин В.В. Сравнительный анализ применения различных моделей демпфирования при расчете сейсмической реакции сооружений в ПК STARK ES // Железобетонные конструкции. 2023. Т. 2. № 2. С. 58–64.

Аннотация. При выполнении расчетов на динамические нагрузки, включая сейсмические воздействия, программный комплекс STARK ES позволяет использовать различные способы моделирования демпфирующих устройств. В данной работе выполнен сопоставительный анализ трех вариантов моделирования работы демпферов, используемых для повышения расчетной сейсмостойкости сооружений. Рассмотрены модели нелинейно-вязкостных демпферов, реактивное усилие в которых нелинейно зависит от скорости перемещения штока, эквивалентных (по поглощенной энергии) линейно-вязкостных демпферов и эквивалентных (по максимальному усилию и поглощенной энергии) упругопластических элементов. В качестве примера использована расчетная модель несущей системы каркасного здания на площадке сейсмичностью более 8 баллов.

Analysis of Various Damping Models in The Simulation of the Seismic Response of Structures in the STARK ES Software

Valery N. Simbirkin^{1*}, Yuriy V. Panasenko¹, Victor V. Kurnavin¹

¹TSNIISK n.aft. V.A. Koucherenko of JSC Research Center of Construction, Moscow, Russian Federation

*simbirkin@eurosoft.ru

Валерий Николаевич Симбиркин, кандидат технических наук, зав. сектором Лаборатории автоматизации исследований и проектирования сооружений (ЛАИПС), ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, АО «НИЦ «Строительство», 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д.6; eLIBRARY SPIN-код: 8627-5837, Scopus: 6507837977, E-mail: simbirkin@eurosoft.ru.

Юрий Вячеславович Панасенко, инженер, руководитель группы Лаборатории автоматизации исследований и проектирования сооружений (ЛАИПС), ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, АО «НИЦ «Строительство», 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д.6; E-mail: ranyuriy@eurosoft.ru.

Виктор Владимирович Курнавин, инженер, заместитель заведующего Лаборатории автоматизации исследований и проектирования сооружений (ЛАИПС), ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, АО «НИЦ «Строительство», 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., д.6; E-mail: kv@eurosoft.ru

© Симбиркин В.Н., Панасенко Ю.В., Курнавин В.В., 2023



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Keywords: dynamic analysis, finite element method (FEM), seismic resistance, hydraulic viscous damper

Article history

Received: 07.02.2023

Revised: 15.02.2023

Accepted: 21.02.2023

For citation

Simbirkin V.N., Panasenکو Yu.V., Rurnavin V.V. Analysis of Various Damping Models in The Simulation of the Seismic Response of Structures in the STARK ES Software. *Reinforced concrete structures*. 2023;2(2):58–64.

Abstract. When performing structural calculations for dynamic loads including seismic impacts, the STARK ES software package allows to implement various damping models. In this paper, a comparative analysis of three types of the damping models used to increase the calculated seismic resistance of structures is carried out. These are the models of nonlinear viscous dampers, in which the reactive force depends non-linearly on the velocity of the rod movement, equivalent (for an energy dissipated) linear-viscous dampers and equivalent (for a maximum force and an energy dissipated) elastic - perfectly plastic elements. As an example, an analytical model of the structural system of a projected building on a site with a seismicity of more than 8th intensity level is used.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее эффективных методов защиты несущих систем зданий при сейсмических воздействиях является использование специальных демпфирующих устройств [1-9]. Специальные демпфирующие устройства динамической защиты зданий и сооружений можно моделировать в ПК STARK ES (разработчик – ООО «ЕВРОСОФТ, Москва) тремя способами: нелинейно-вязкостными демпферами, линейно-вязкостными демпферами и упругопластическими элементами. Графическая иллюстрация работы демпферов трех рассматриваемых типов в виде зависимости реакции F_d от хода штока x за один цикл гармонических колебаний представлена на рисунке 1.

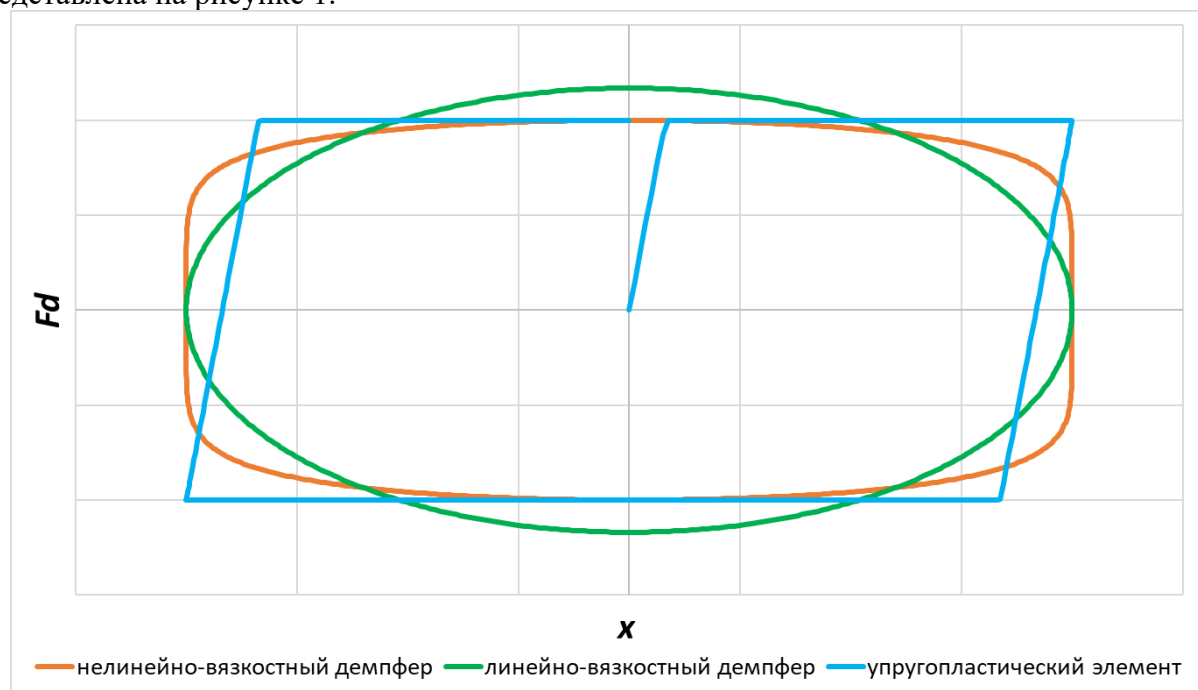


Рис. 1. Диаграммы работы демпферов при гармоническом колебании
Figure 1. Diagrams of the operation of dampers during harmonic oscillation

Valery N. Simbirkin, Candidate of Technical Sciences, Head. sector of the Laboratory for Automation of Research and Design of Structures (LAIPS), TsNIISK im. V.A. Kucherenko, JSC "Research Center" Construction ", 109428, Moscow, 2nd Institutskaya st., 6; eLIBRARY SPIN-code: 8627-5837, Scopus: 6507837977, E-mail: simbirkin@eurosoft.ru.

Yury V. Panasenکو, engineer, head of the group of the Laboratory for Automation of Research and Design of Structures (LAIPS), TsNIISK im. V.A. Kucherenko, JSC "Research Center" Construction ", 109428, Moscow, 2nd Institutskaya st., 6; E-mail: panyuriy@eurosoft.ru.

Viktor V. Kurnavin, engineer, deputy head of the Laboratory for Automation of Research and Design of Structures (LAIPS), TsNIISK named after A.I. V.A. Kucherenko, JSC "Research Center" Construction ", 109428, Moscow, 2nd Institutskaya st., 6; E-mail: kv@eurosoft.ru

МЕТОД

Нелинейно-вязкостные демпферы

Реактивное усилие, развиваемое в нелинейно-вязкостных демпферах, нелинейно зависит от скорости перемещения штока и выражается формулой [10]:

$$F_{d,nl}(t) = -C|V(t)|^\alpha \text{знак}(V(t)), \quad (1)$$

где: C – коэффициент демпфирования;

α – степенной показатель демпфера;

$V(t)$ – скорость перемещения штока демпфера в момент времени t .

Энергия, поглощаемая в демпфере, составляет:

$$W = \left| \int F_{d,nl} dx \right|. \quad (2)$$

Учитывая, что $dx = V(t)dt$, подставив (1) в (2), для одного цикла колебаний с периодом T получим:

$$W = \int_0^T |F_{d,nl} V(t)| dt = C \int_0^T |V(t)|^{\alpha+1} dt. \quad (3)$$

Скорость перемещения штока при гармонических колебаниях равна

$$V(t) = x_{max} \cdot \frac{d}{dt} \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right) = x_{max} \frac{2\pi}{T} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right). \quad (4)$$

Подставив (4) в (3) и выполнив упрощения, получим:

$$W = C \left[x_{max} \frac{2\pi}{T} \right]^{\alpha+1} \int_0^T \left| \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \right|^{\alpha+1} dt. \quad (5)$$

Линейно-вязкостные демпферы

Реактивное усилие в линейно-вязкостных демпферах определяют по формуле:

$$F_{d,l}(t) = -C_l \cdot V(t).$$

Энергию, поглощенную в линейном демпфере за один цикл гармонических колебаний, определим, приняв $\alpha = 1$ в формуле (5):

$$W_l = C_l \left[x_{max} \frac{2\pi}{T} \right]^2 \int_0^T \cos^2\left(\frac{2\pi}{T}t\right) dt. \quad (6)$$

Значение интеграла в формуле (6) можно определить аналитически. В результате получим:

$$W_l = 2 \frac{C_l}{T} (\pi \cdot x_{max})^2. \quad (7)$$

При заданном значении W_l эквивалентный коэффициент демпфирования C_l определим по формуле, следующей из формулы (7):

$$C_l = \frac{W_l \cdot T}{2(\pi \cdot x_{max})^2}. \quad (8)$$

Упругопластические элементы

Поглощение энергии за один цикл гармонических колебаний упругопластическим элементом вычисляется по формуле:

$$W_{ep} = 4F_{d,max} \left(x_{max} - \frac{F_{d,max}}{k} \right), \quad (9)$$

где k – жесткость упругопластического элемента в упругой стадии его работы,

x_{max} – максимальное перемещение штока демпфера,

$F_{d,max}$ – максимальное усилие в устройстве.

При заданном значении поглощенной энергии W_{ep} значение жесткости k определяется по формуле:

$$k = F_{d,max} / \left(x_{max} - \frac{W_{ep}}{4 \cdot F_{d,max}} \right). \quad (10)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Пример проверочного расчета конструкций здания

Проверочный расчет несущих строительных конструкций здания при сейсмических воздействиях выполнен во временной области с использованием нескольких расчетных наборов акселерограмм. Расчетные акселерограммы были синтезированы по результатам сейсмического микрорайонирования и подготовлены при помощи программы «Одиссей» (разработчик – ООО «ЕВРОСОФТ, Москва).

Методика выполнения динамического расчета, реализованная в программном комплексе STARK ES, описана в статьях [11, 12]. Решение поставленной задачи было получено с использованием метода разложения динамической реакции конструкции по формам ее собственных колебаний. При этом был учтен вклад в динамическую реакцию отброшенных и ненайденных высших форм собственных колебаний по методике [13].

На рисунке 2 показаны результаты линейно-упругого расчета модели здания в виде зависимостей компонент перемещения во времени одного из узлов колонны каркаса здания.

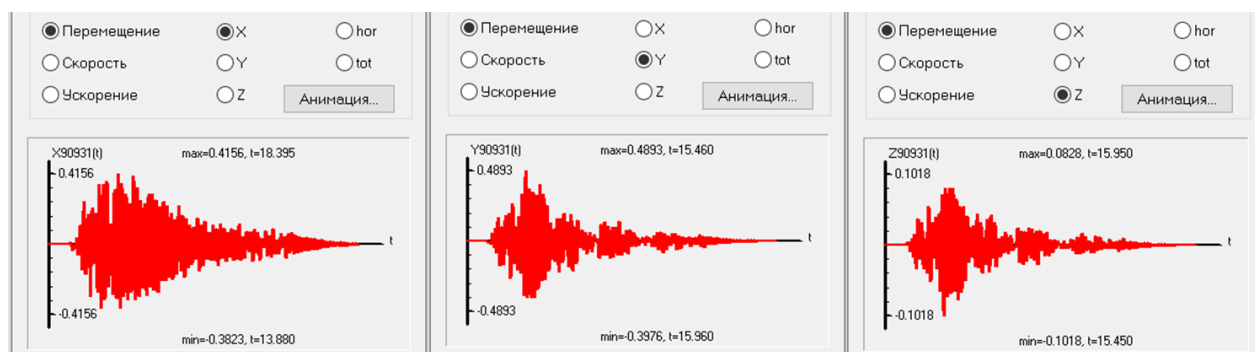


Рис.2. Результаты линейно-упругого динамического расчета модели. Перемещение узла колонны каркаса здания
Figure 2. Results of linear-elastic dynamic calculation of the model. Moving a Building Frame Column Node

Нелинейно-вязкостные демпферы

Путем итерационных расчетов были подобраны нелинейно-вязкостные демпферы с максимальным усилием $F_{(d,max)}=2000$ кН, $C=2285$ кН(с/м) $^\alpha$, $\alpha=0.3$ и наибольшим ходом штока $x_{max}=100$ мм. Энергия, поглощаемая таким демпфером за один цикл гармонических колебаний с периодом $T=0.98$ с, равном основному периоду собственных колебаний конструкции, вычисленная по формуле (5), составляет $W=735$ кДж.

На рисунке 3 показаны результаты динамического расчета перемещений колонны каркаса здания с нелинейно-вязкостными демпферами.

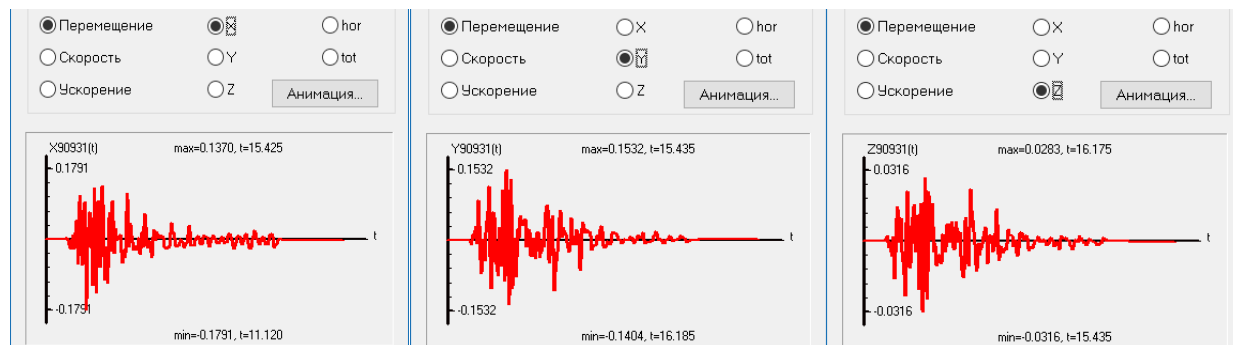


Рис. 3. Результаты динамического расчета модели с учетом работы нелинейно-вязкостных демпферов. Перемещение узла колонны каркаса здания

Figure 3. Results of the dynamic calculation of the model taking into account the operation of nonlinear-viscous dampers. Moving the node of the building frame column

Линейно-вязкостные демпферы

Подставив в формулу (8) приведенные выше значения, получаем эквивалентный коэффициент демпфирования, обеспечивающий то же поглощение энергии за цикл, что и в предыдущем случае:

$$C_l = 735 \cdot 0,98 / (2 \cdot 0,01^2) = 3602 \text{ кНс/м.}$$

На рисунке 4 показаны результаты динамического расчета перемещений колонны каркаса здания с линейно-вязкостными элементами.

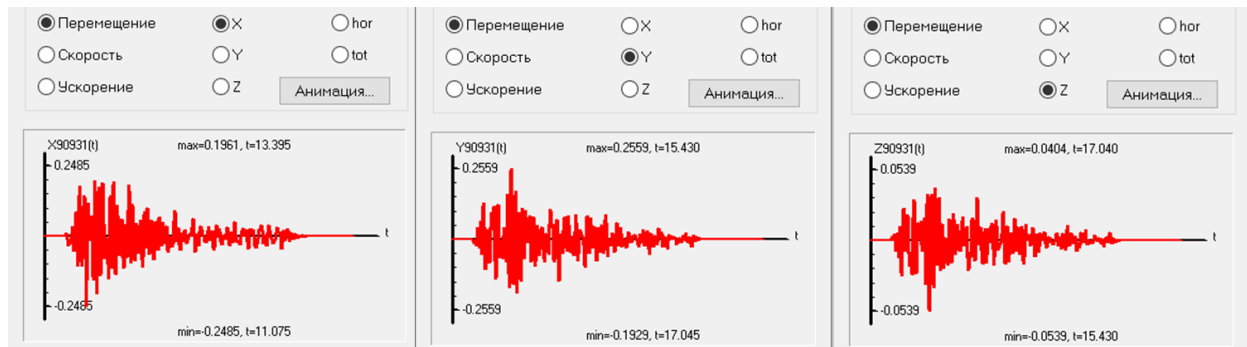


Рис. 4. Результаты динамического расчета модели с учетом работы линейно-вязкостных демпферов. Перемещение узла колонны каркаса здания

Figure 4. Results of the dynamic calculation of the model taking into account the operation of linear-viscous dampers. Moving the node of the building frame column

Упругопластические элементы

Значение эквивалентной жесткости k определяем по (10):

$$k = \frac{2000}{0.1 - \frac{735}{4 \cdot 2000}} = 246154 \frac{\text{кН}}{\text{м}}.$$

На рисунке 5 показаны результаты расчета перемещения колонны каркаса здания при моделировании демпферов упругопластическими элементами.

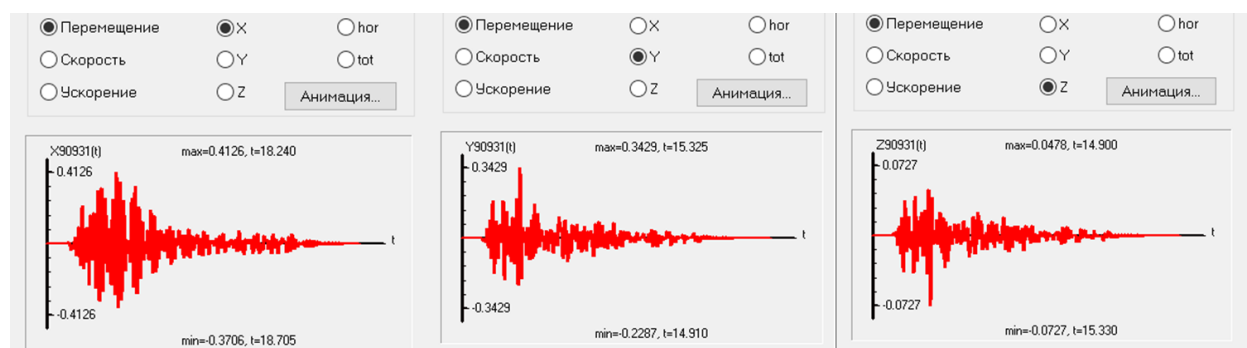


Рис. 5. Результаты динамического расчета модели с учетом работы упругопластических элементов. Перемещение узла колонны каркаса здания.

Figure 5. Results of the dynamic calculation of the model, taking into account the work of elastic-plastic elements. Moving a building frame column node

Упругопластические элементы показывают нелинейные свойства и поглощают энергию колебаний только при больших деформациях, в то время как вязкостные демпферы эффек-

тивно гасят колебания любого уровня. Это хорошо видно из графиков, приведенных на рисунке 6.

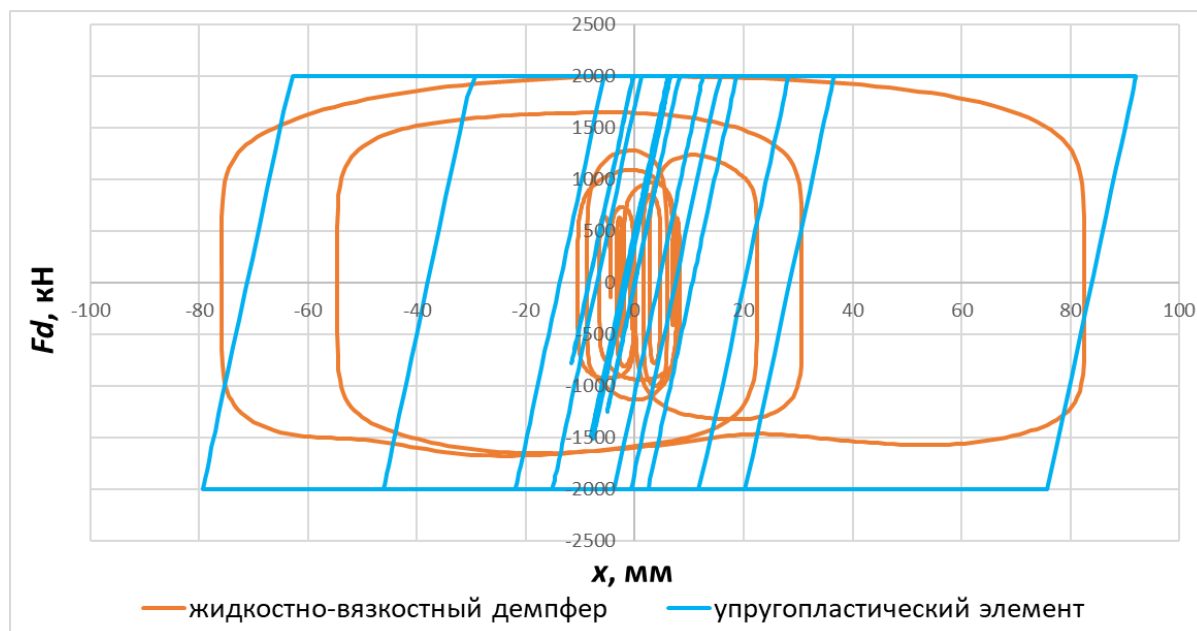


Рис. 6. Диаграммы работы вязкостных и упругопластических демпферов в каркасе здания при сейсмическом воздействии

Figure 6. Diagrams of the operation of viscous and elastic-plastic dampers in the building frame under seismic impact

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Применение модели нелинейно-вязкостных демпферов оказалось наиболее эффективным. В этом случае характерные перемещения и, следовательно, усилия в элементах каркаса здания уменьшились в среднем в 3 раза.

2. Расчетная сейсмическая реакция каркаса здания с линейно-вязкостными демпферами оказалась несколько выше, чем при использовании нелинейно-вязкостных демпферов. Более низкая эффективность данных демпферов связана с меньшей способностью поглощать энергию колебаний на разных частотах при реальном сейсмическом воздействии.

3. Упругопластические элементы показывают нелинейные свойства и поглощают энергию колебаний только при больших деформациях, в то время как вязкостные демпферы эффективно гасят колебания любого уровня. Круговая архитектурная форма рассмотренного в примере здания такова, что лишь незначительное количество демпфирующих элементов испытывают большие деформации одновременно, что обусловило низкую эффективность применения упругопластической модели в данном случае.

4. Эффективность системы демпфирования существенно зависит от ее конструирования. Помимо правильного подбора характеристик демпфирующих устройств, необходимо добиваться наиболее полного включения их в работу при возможных параметрах расчетных сейсмических воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kim Y.C., Lee H.W., Hu J.W. Experimental performance evaluation of elastic friction damper // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Volume 18, e01823. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01823>
2. Jianbing Y., Zhiqiang X., Yufeng X., Zhengxing G. Seismic behavior of reactive powder concrete (RPC) interior beam-to-column joints under reversed cyclic loading // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Volume 18, e01792.
3. Chen H., Xu H., Liu Y., Ren X. Seismic demand estimation of isolated buildings with nonlinear bearings subjected to linear response spectra // *Journal of Building Engineering*. 2023. Volume 67, 105995.
4. Zhang C., Li W., Liu D., Xu J., Feng X., Wang R., Wang B. Seismic reliability research of continuous girder bridge considering fault-tolerant semi-active control // *Structural Safety*. 2023. Volume 102, 102322.
5. Long Z., Shen W., Zhu H. On energy dissipation or harvesting of tuned viscous mass dampers for SDOF structures under seismic excitations // *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Volume 189, 110087
6. Тамразян А.Г. Определение динамических характеристик колебания сооружений на основе вязко-упругой реологической модели наследственного старения // *Вестник отделения строительных наук РААСН*. 2012. Вып. XVI, том.1. С.187-194.
7. Tamrazyan A.G., Fedorov V. S., Kharun M. The effect of increased deformability of columns on the resistance to progressive collapse of buildings // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 675. 012004 doi:10.1088/1757-899X/675/1/012004
8. Tamrazyan A., Chernik V. Equivalent viscous damping ratio for a RC column under seismic load after a fire. VII International Scientific Conference Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education, 11th - 12th November 2020, Republic of Uzbekistan: Tashkent.
9. Тамразян А. Г., Есаян С. Г. Механика ползучести бетона: монография. Москва: НИУ МГСУ, 2012. 524 с.
10. ГОСТР 57364-2016 / EN 15129:2010. Устройства антисейсмические. Правила проектирования. – М.: Стандартинформ, 2017.
11. Симбиркин В.Н., Панасенко Ю.В. Упрощенный нелинейный динамический расчет сооружений при сейсмических воздействиях // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2017. – № 5 (274). – С. 32-36.
12. Симбиркин В.Н., Панасенко Ю.В. Учет указаний СП 14.13330.2018 при реализации расчета сооружений на сейсмические воздействия в программном комплексе STARK ES // *Вестник НИЦ «Строительство»*. – 2019. – № 2 (21). – С. 103-113.
13. Филимонов А.В. Учет найденных форм собственных колебаний при расчете реакции зданий и сооружений на сейсмические воздействия // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2014. – № 2. – С. 46-53.

REFERENCES

1. Kim Y.C., Lee H.W., Hu J.W. Experimental performance evaluation of elastic friction damper. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Volume 18, e01823. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01823>
2. Jianbing Y., Zhiqiang X., Yufeng X., Zhengxing G. Seismic behavior of reactive powder concrete (RPC) interior beam-to-column joints under reversed cyclic loading. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Volume 18, e01792.
3. Chen H., Xu H., Liu Y., Ren X. Seismic demand estimation of isolated buildings with nonlinear bearings subjected to linear response spectra. *Journal of Building Engineering*. 2023. Volume 67, 105995.
4. Zhang C., Li W., Liu D., Xu J., Feng X., Wang R., Wang B. Seismic reliability research of continuous girder bridge considering fault-tolerant semi-active control. *Structural Safety*. 2023. Volume 102, 102322.
5. Long Z., Shen W., Zhu H. On energy dissipation or harvesting of tuned viscous mass dampers for SDOF structures under seismic excitations. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Volume 189, 110087
6. Tamrazyan A.G. Determination of the dynamic characteristics of vibrations of structures on the basis of a visco-elastic rheological model of hereditary aging. *Vestnik otdeliya stroitel'nykh nauk RAASN*. 2012. Issue. XVI, volume 1. pp.187-194.
7. Tamrazyan A.G., Fedorov V. S., Kharun M. The effect of increased deformability of columns on the resistance to progressive collapse of buildings. *IOP Conf. Ser.: Mater. sci. Eng.* 2019 Vol. 675.012004 doi:10.1088/1757-899X/675/1/012004
8. Tamrazyan A., Chernik V. Equivalent viscous damping ratio for a RC column under seismic load after a fire. VII International Scientific Conference Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education, 11th - 12th November 2020, Republic of Uzbekistan: Tashkent.
9. Tamrazyan A. G., Yesayan S. G. Creep mechanics of concrete: monograph. Moscow: NRU MGSU, 2012. 524 p.
10. GOST 57364-2016 / EN 15129:2010. Anti-seismic devices. Design rules. Moscow: Standartinform, 2017.