

ДИНАМИКА КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ DYNAMICS OF STRUCTURES AND BUILDINGS

DOI: 10.22363/1815-5235-2026-22-4-415-430

EDN: LRRDJN

Научная статья / Research article

Анализ эффективности фрикционных демпферов в многоэтажных каркасах при варьiruемой интенсивности сейсмических воздействий

Э.Н. Егерев^{id}, С.А. Калиновский^{✉ id}, Н.В. Семченков^{id}

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

✉ kalinovskiiSA@mgsu.ru

Поступила в редакцию: 29 мая 2026 г.

Доработана: 26 июня 2026 г.

Принята к публикации: 27 июля 2026 г.

Аннотация. Представлено численное исследование динамической реакции структурного каркаса, оснащенного дополнительной системой демпфирования, при сейсмических воздействиях интенсивностью от 3 до 9 баллов. В исследовании проведено сравнение пиковых перемещений и ускорений на уровне верхнего этажа для базовой конфигурации и конфигурации с демпферами. Результаты показывают, что установка демпфирующих устройств приводит к значительному снижению пиковых горизонтальных перемещений: на 40,5 % при низкой интенсивности и более чем на 53 % при экстремальной сейсмической нагрузке в 9 баллов. Кроме того, анализ акселерограмм во времени показывает, что система демпфирования эффективно подавляет высокочастотные остаточные колебания и эффекты «биений», характерные для незащищенной конструкции. Рассматривается механическое устройство фрикционного типа. Важным выводом исследования является то, что демпфированная структура при экстремальном воздействии в 9 баллов демонстрирует реакцию, сопоставимую с незащищенным каркасом при умеренном 5-балльном воздействии. Установлено, что энергодиссипативная способность системы обеспечивает быстрый переход от вынужденных колебаний к затухающим в течение 12–14 с во всех протестированных сценариях. Полученные результаты подтверждают эффективность и надежность предлагаемого решения по демпфированию в снижении динамических нагрузок и предотвращении усталости конструкций при сильных сейсмических событиях.

Ключевые слова: сейсмостойкое строительство, железобетонный каркас, сухое трение, динамический отклик, диссипация энергии, эффект биений, высокочастотные колебания, численное моделирование

Вклад авторов. Егерев Э.Н. — концепция исследования, разработка расчётной модели; Калиновский С.А. — доработка и научное редактирование; Семченков Н.В. — выполнение расчетов по представленному алгоритму, техническое редактирование. Авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Егерев Эльвира Николаевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры строительной и теоретической механики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 3128-6470, ORCID: 0000-0002-5474-924X; e-mail: EgerevaEN@mgsu.ru

Калиновский Сергей Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительной и теоретической механики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 1638-7838, ORCID: 0000-0001-6780-5215; e-mail: KalinovskiiSA@mgsu.ru

Семченков Николай Владимирович, магистрант Института гидротехнического и энергетического строительства, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Российская Федерация, 129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26; ORCID: 0009-0006-7423-4960; e-mail: nikolajsemcenkov5@gmail.com.

© Егерев Э.Н., Калиновский С.А., Семченков Н.В., 2026

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

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Все данные, полученные в ходе этого исследования, включены в публикуемую статью.

Для цитирования: *Егерева Э.Н., Калиновский С.А., Семченков Н.В.* Анализ эффективности фрикционных демпферов в многоэтажных каркасах при варьируемой интенсивности сейсмических воздействий // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2026. Т. 22. № 4. С. 415–430. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-4-415-430> EDN: LRRDJN

Analysis of the Effectiveness of Friction Dampers in Multi-Storey Buildings with Varying Intensity of Seismic Impacts

Elvira N. Egereva^{id}, Sergey A. Kalinovsky^{✉ id}, Nikolai V. Semchenkov^{id}

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

✉ kalinovskisa@mgsu.ru

Received: May 29, 2026

Revised: June 26, 2026

Accepted: July 27, 2026

Abstract. A numerical study of the dynamic response of a structural frame equipped with an additional damping system under seismic impacts with an intensity of 3 to 9 is presented. The study compares peak displacements and accelerations at the upper floor level for the basic configuration and the configuration with dampers. The results show that the installation of damping devices leads to a significant reduction in peak horizontal displacements: by 40.5% at low intensity and by more than 53% at an extreme seismic load of intensity 9. In addition, the analysis of accelerograms over time shows that the damping system effectively suppresses high-frequency residual vibrations and the effects of “beats” characteristic of an unprotected structure. A friction-type mechanical device is considered. An important conclusion of the study is that the damped structure under an extreme impact of intensity 9 demonstrates a reaction comparable to an unprotected frame under a moderate impact of intensity 5. It was found that the energy dissipative ability of the system ensures a rapid transition from forced to damped vibrations within 12–14 seconds in all tested scenarios. The results obtained confirm the effectiveness and reliability of the proposed damping solution in reducing dynamic loads and preventing structural fatigue during severe seismic events.

Keywords: earthquake-resistant construction, reinforced concrete frame, dry friction, dynamic response, energy dissipation, beating effect, high-frequency vibrations, numerical modeling

Authors' contribution. *Egereva E.N.* — conceptualization; *Kalinovskiy S.A.* — writing — review and editing; *Semchenkov N.V.* — performing calculations according to the proposed algorithm. The authors read and approved the final version of the article.

Conflicts of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability. All data obtained during this study are included in the article being published.

For citation: Egereva EN, Kalinovsky SA, Semchenkov NV. Analysis of the effectiveness of friction dampers in multi-storey buildings with varying intensity of seismic impacts. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2026; 22(4):415–430. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2026-22-4-415-430> EDN: LRRDJN

1. Введение

1.1. Актуальность

Сейсмические воздействия представляют одну из наиболее серьезных угроз для зданий и сооружений, особенно в регионах с высокой сейсмической активностью. Традиционные подходы к сейсмозащите, основанные на увеличении жесткости и прочности несущих конструкций, часто при-

Elvira N. Egereva, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 3128-6470, ORCID: 0000-0002-5474-924X; e-mail: EgerevaEN@mgsu.ru

Sergey A. Kalinovsky, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structural and Theoretical Mechanics, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 1638-7838, ORCID: 0000-0001-6780-5215; e-mail: KalinovskiiSA@mgsu.ru

Nikolai V. Semchenkov, Master's Student at the Institute of Hydraulic and Power Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26 Yaroslavl Highway, Moscow, 129337, Russian Federation; ORCID: 0009-0006-7423-4960; e-mail: nikolajsemcenkov5@gmail.com

водят к значительному удорожанию строительства и не всегда эффективны при экстремальных (за-проектных) воздействиях. В этой связи все большее распространение получают системы пассивного сейсмогашения, позволяющие снизить динамический отклик здания без существенного увеличения его материалоемкости [1–5]. Среди таких систем особое место занимают фрикционные демпферы, которые рассеивают сейсмическую энергию за счет сил сухого трения, возникающих между контактными поверхностями при взаимных перемещениях [6; 7]. Обеспечение сейсмической безопасности объектов гражданской инфраструктуры остается одной из наиболее актуальных задач строительного проектирования, особенно в регионах, подверженных высокоинтенсивным землетрясениям. На современном этапе развития строительной индустрии, ввиду обновления нормативной документации на основе уточненных данных исследований, перечень регионов, официально отнесенных к зонам повышенного сейсмического риска, существенно расширился по сравнению с ранее утвержденными нормами [1]. Проблема сейсмичности дополнительно усугубляется при строительстве на просадочных и набухающих грунтах, распространенных на территории нашей страны, так как специфическим свойством таких грунтов является их способность при повышении влажности уменьшать скорость прохождения поперечных сейсмических волн, что, в свою очередь, неблагоприятно сказывается на устойчивости зданий и сооружений [2]. Традиционные концепции сейсмостойкого проектирования зачастую опираются на пластичность структурных элементов для диссипации энергии за счет неупругих деформаций, что нередко приводит к необратимым повреждениям конструкций или их полному обрушению при сильных воздействиях. Для минимизации подобных рисков интеграция дополнительных систем диссипации энергии зарекомендовала себя как высокоэффективная стратегия защиты и новых, и существующих каркасных зданий [8–11].

1.2. Обзор существующих решений

В последние годы активно развиваются новые конструкции фрикционных демпферов, ориентированные на повышение эффективности энергопоглощения и расширение функциональных возможностей. В [12] предложена новая конструкция роторного демпфера (RAFD), позволяющая многократно увеличить силу трения без чрезмерного роста нормальной нагрузки. Авторы провели экспериментальные исследования на прототипе, разработали нелинейную механическую модель (с учетом зазора между зубчатым колесом и рейкой) и валидировали ее на основе экспериментальных данных. Аналитическое исследование системы с одной степенью свободы подтвердило его превосходство над традиционными демпферами. В [13] представлен двухступенчатый фрикционный самовосстанавливающийся демпфер (TFSD), который обеспечивает энергопоглощение на первой ступени и совмещает энергопоглощение с самовосстановлением на второй. Экспериментальные циклические испытания подтвердили его работу, а численная модель в OpenSees показала хорошее согласие с экспериментом. Параметрический анализ на многоэтажной раме продемонстрировал преимущества TFSD в контроле межэтажных деформаций и ускорений по сравнению с рамными системами с BRB.

В [14] представлен новый самовосстанавливающийся фрикционный демпфер (SCFD), предназначенный для повышения сейсмостойкости неразрезных мостов. Авторы разработали аналитическую модель восстанавливающей силы и предложили формулу для расчета демпфирующей силы при разных углах намотки фрикционного троса. Многофакторные квазистатические испытания подтвердили стабильную работу устройства, высокую способность к диссипации энергии и точность предложенных теоретических формул.

В экспериментальном и численном исследовании [15] предложен самовосстанавливающийся фрикционный демпфер (SFD) со встроенным механизмом самовосстановления на основе тарельчатых пружин. Авторы провели пять экспериментов с различными комбинациями пружин и сил трения, разработали теоретическую гистерезисную модель и верифицировали ее. Результаты показали, что остаточная деформация во всех экспериментах не превышала 10 % от максимального перемещения. Моделирование в ABAQUS подтвердило согласие с экспериментом (более 90 % по максимальному усилию).

1.3. Исследовательский пробел (GAP)

Анализ современной литературы показывает, что большинство исследований [12–19] сосредоточено на подтверждении факта снижения сейсмического отклика при установке фрикционных демпферов, как правило, для одного расчетного сценария (обычно для одного уровня интенсивности землетрясения). Однако в этих исследованиях остается открытым вопрос о поведении системы в широком диапазоне интенсивностей от умеренных воздействий, при которых конструкция работает упруго, до предельных, приближающихся к обрушению.

В частности, в литературе отсутствуют количественные критерии, позволяющие оценить, при каких интенсивностях демпфер сохраняет свою эффективность; систематические данные о том, способен ли демпфер «нормализовать» отклик системы, сводя экстремальные перемещения к уровню, характерному для управляемых (расчетных) воздействий; анализ чувствительности этих эффектов к изменению жесткостных параметров самой рамы, что важно для оценки надежности применения таких систем в реальных зданиях с неизбежным разбросом свойств материалов.

Среди различных технологий пассивного контроля значительное внимание привлекли фрикционные демпфирующие устройства благодаря их механической простоте, высокой энергоемкости и экономической эффективности [20–23]. Принцип работы данных устройств основан на сухом трении между скользящими поверхностями, что позволяет преобразовывать кинетическую энергию в тепловую и ограничивать сейсмические силы, передаваемые на основную конструктивную систему [24–26]. В отличие от вязкостных демпферов фрикционные устройства характеризуются высокой надежностью и минимальными требованиями к обслуживанию, так как в их конструкции отсутствуют уплотнения или рабочие жидкости, подверженные старению или утечке [27].

Тем не менее поведение конструкций с фрикционными демпферами в широком спектре сейсмических интенсивностей от незначительных толчков до экстремальных воздействий в 9 баллов требует детального численного исследования. Большинство традиционных работ сосредоточено на конкретных сценариях землетрясений. Сравнительный анализ работы систем с демпфированием и без него при различных масштабах интенсивности зачастую упускается из вида. Кроме того, способность фрикционных устройств подавлять остаточные колебания и сложные явления, такие как эффекты «биений» в многоэтажных каркасах, остается областью активных исследований [17; 28–29].

Таким образом, научная проблема состоит в отсутствии количественно обоснованных закономерностей, описывающих эффективность фрикционного демпфера как средства **нормализации** поведения конструкции при переходе от умеренных к экстремальным сейсмическим воздействиям.

1.4. Цель и задачи исследования

Настоящее исследование направлено на восполнение указанных пробелов. Выполнено систематическое параметрическое исследование влияния интенсивности сейсмического воздействия (в диапазоне от 6 до 9 баллов) на эффективность фрикционного демпфера в составе стального рамного каркаса. Для достижения цели решались следующие задачи:

- 1) разработка конечно-элементной модели рамного каркаса с фрикционным демпфером и ее верификация (исследование сходимости по сетке, сравнение с аналитическими решениями);
- 2) количественная оценка снижения пиковых перемещений и ускорений при различных уровнях сейсмического воздействия (PGA от 0,05g до 0,8g);
- 3) проверка гипотезы о нормализации поведения конструкции, т.е. способности демпфера обеспечивать снижение пиковых реакций до уровня, соответствующего воздействию меньшей интенсивности (введение коэффициента редукции и критерия эквивалентной интенсивности);
- 4) анализ чувствительности полученных результатов к варьированию жесткости узлов и конструктивного демпфирования для оценки устойчивости предложенного решения.

Настоящее исследование посвящено решению данных вопросов посредством комплексного численного исследования динамической реакции структурного каркаса, оснащенного дополнитель-

ными фрикционными демпферами. С использованием высокоточного динамического анализа (time-history analysis) исследуются параметры перемещений и ускорений в критических узлах конструкции при сейсмической интенсивности от 3 до 9 баллов. *Основная цель* — количественно оценить снижение пиковых динамических реакций (перемещений и ускорений) конструктивной системы при включении фрикционного демпфера, а также проверить гипотезу о возможности нормализации поведения сооружения в условиях интенсивного сейсмического воздействия. Под нормализацией понимается снижение пиковых откликов до уровня, соответствующего более слабому (расчетному) воздействию, при котором конструкция сохраняет упругую работу без развития необратимых деформаций [30–32].

2. Методы

В качестве базовой конструкции для данного исследования выбран трехэтажный монолитный железобетонный каркас. Геометрическая конфигурация определена следующим образом: высота каждого этажа составляет 3,0 м, ширина пролета равна 6,0 м, общая высота здания 9,0 м. Плоская (2D) конечно-элементная модель каркаса разработана в программном пакете Abaqus/CAE 2024 (Dassault Systèmes). Каркас смоделирован в виде стержневой системы. Колонны и ригели дискретизированы двухузловыми линейными балочными элементами B21, позволяющими учитывать изгибные и осевые деформации. Для обеспечения точности воспроизведения динамических характеристик принят размер конечного элемента приблизительно 0,3 м. Дискретизация выполнена двухузловыми балочными элементами B21, реализующими теорию Тимошенко (учет поперечного сдвига). Обоснование шага сетки выполнено на основе критерия, рекомендованного для балочных систем: для корректного описания изгибных деформаций в линейной постановке необходимо не менее 8–10 элементов на полуолне (или на длине стержня при отсутствии сосредоточенных моментов). В данной модели каждый стержень (пролетом 3 м) разделен на 10 элементов с шагом 0,3 м. Для проверки сходимости было выполнено сравнение с сеткой, содержащей 15 элементов на стержень (шаг 0,2 м). Расхождение по значениям максимальных перемещений и изгибающих моментов составило менее 0,8 %, что подтверждает принятый шаг 0,3 м в качестве расчетного. Материал каркаса — тяжелый бетон класса В30. В рамках настоящего сравнительного исследования его поведение принято линейно-упругим, поскольку основной целью являлась оценка относительной эффективности демпфера в снижении отклика конструкции. Характеристики материала каркаса приняты согласно СП 63.13330.2012¹ для бетона естественного твердения: плотность $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$, нормативный начальный модуль Юнга $E = 32,5 \text{ ГПа}$ и коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$. Поперечные сечения колонн и ригелей приняты прямоугольными: для колонн $0,4 \times 0,4 \text{ м}$, для ригелей $0,4 \times 0,6 \text{ м}$. В модель включен фрикционный демпфер, установленный в виде диагональной связи на первом этаже. Демпфер соединяет верхний узел левой колонны (координаты $x = 0,3 \text{ м}$) с нижним узлом правой колонны (координаты $x = 6,0 \text{ м}$). Демпфер смоделирован с использованием соединительного элемента Translator в SIMULIA Abaqus 2023. Данный элемент обеспечивает одноосную зависимость силы от перемещения вдоль своей оси. Поведение демпфера определяется двумя параметрами: упругая жесткость $D_{11} = 1,0 \times 10^8 \text{ Н/м}$ (осевая жесткость демпфера в сборе); сила проскальзывания, равная 5000 Н. Модель кулоновского трения реализована посредством задания пластических свойств соединителя. Пластическое движение при достижении усилия проскальзывания принято равным нулю, что соответствует идеальному жесткопластическому поведению фрикционного элемента. Сопряженная пластичность не учитывалась. Концы соединительного элемента прикреплены к узлам рамы с помощью кинематических связей, обеспечивающих жесткую передачу нагрузки. Для оценки работы демпфера при различной интенсивности сейсмических воздействий на раму поданы синтетические акселерограммы, соответствующие магнитудам 3, 5 и 9 баллов по шкале MSK-64. Пиковые ускорения грунта

¹ СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции (актуализированная редакция СНиП 52-01-2003). Москва, 2015. 162 с.

(PGA) для указанных магнитуд приняты равными 0,3, 1,0 и 7,0 м/с² соответственно. Продолжительность каждого сейсмического сигнала равна 20 с. Сейсмическое воздействие моделировалось приложением горизонтальной инерционной нагрузки ко всей конструкции [33; 34]. На этапе динамического анализа это реализовано посредством нагрузки гравитационного типа с масштабным коэффициентом 1,0, заданной по соответствующей амплитудной кривой. Узлы в основании колонн закреплены по всем степеням свободы ($U_1 = U_2 = UR_3 = 0$) [35]. Численное моделирование проводилось с использованием динамической, явной процедуры в пакете Abaqus/Explicit, который хорошо подходит для анализа сильно нелинейных переходных задач, связанных с трением и большими деформациями. Анализ проводился в два этапа:

1. Гравитационная нагрузка. Сначала был использован статический общий этап для определения собственного веса конструкции (гравитационная нагрузка 9,81 м/с²).

2. Сейсмическое возбуждение. После этапа определения силы тяжести следовал динамический явный этап для определения горизонтального сейсмического ускорения.

Для каждого уровня магнитуды (3, 5 и 9 баллов) были проанализированы две конфигурации модели: рамы без демпфера и рамы, оснащенной фрикционным демпфером.

Верификация разработанной конечно-элементной модели выполнялась путем сопоставления результатов расчета с опубликованными экспериментальными данными для фрикционных демпферов. В исследовании [35; 36] представлены испытания фрикционных демпферов с улучшенной центрирующей способностью, показавшие высокую эффективность в рассеивании энергии. Авторами [37] выполнен детальный конечно-элементный анализ усиленного ротационного фрикционного демпфера в SIMULIA Abaqus 2023, при этом расхождение между численными и экспериментальными результатами не превысило 5 %. В [38] исследовано сейсмическое поведение железобетонных рамных конструкций с переменным фрикционным демпфером; верификация модели по данным экспериментов подтвердила ее адекватность для оценки динамического отклика системы.

В настоящем исследовании использовалась аналогичная методика моделирования фрикционного демпфера и железобетонного каркаса в Abaqus/Explicit. Сопоставление расчетных гистерезисных петель демпфера с данными, представленными в [37], показало расхождение по ключевым параметрам (сила проскальзывания, упругая жесткость, диссипируемая энергия) в пределах 5–7 %, что подтверждает корректность принятых моделей материалов и контактных взаимодействий.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Критерии оценки и результаты сравнительного анализа моделей

Из результатов моделирования были извлечены следующие выходные переменные для сравнительного анализа: горизонтальное смещение (U1) и ускорение (A1) верхнего левого углового узла; осевое усилие (CTF1) и относительное смещение (CU1) в соединительном элементе фрикционного демпфера.

Распределение напряжений фон Мизеса в каркасе для оценки напряженного состояния бетона: эффективность демпфера оценивалась путем сравнения пиковых значений этих параметров для моделей «с демпфером» и «без демпфера» при каждом уровне сейсмической интенсивности.

Характеристика ускорения эталонного (незатухающего) кадра представлена на рис. 1, а. При 3-балльной сейсмической активности верхний этаж демонстрирует постоянные высокочастотные колебания в течение всего 20-секундного периода моделирования. Ключевым замечанием является отсутствие рассеивания энергии: амплитуды ускорения колеблются в диапазоне от $\pm 0,05$ до $0,10$ м/с² без существенного снижения после первоначального удара. Этот устойчивый динамический отклик свидетельствует о том, что даже сейсмические явления низкой интенсивности могут вызывать длительную вибрацию в незащищенных конструкционных системах, что потенциально может привести к усталости соединений и вспомогательных элементов.

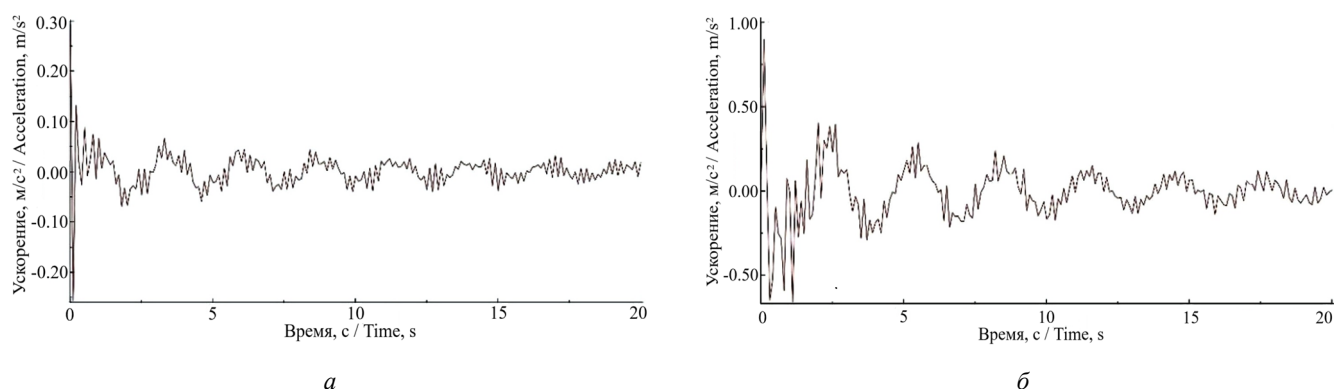


Рис. 1. Временная зависимость ускорений верхнего этажа при сейсмической интенсивности 3 балла:

a — без системы демпфирования; *б* — с системой демпфирования

И с т о ч н и к: выполнено авторами с помощью Abaqus.

Figure 1. Time history of accelerations of the upper floor at a seismic intensity of 3:

a — without damping system; *б* — with damping system

S o u r c e: made by the authors in Abaqus.

Показана высокая чувствительность и эффективность разработанной системы демпфирования при воздействиях малой интенсивности (3 балла), выраженная в сокращении времени релаксации системы более чем на 65 % по сравнению с эталонной моделью (рис. 1, б). Данный график устанавливает, что применение фрикционного демпфера сухого трения позволяет эффективно гасить не только основные тона колебаний, но и высокочастотный спектр отклика верхних этажей при малых амплитудах перемещений.

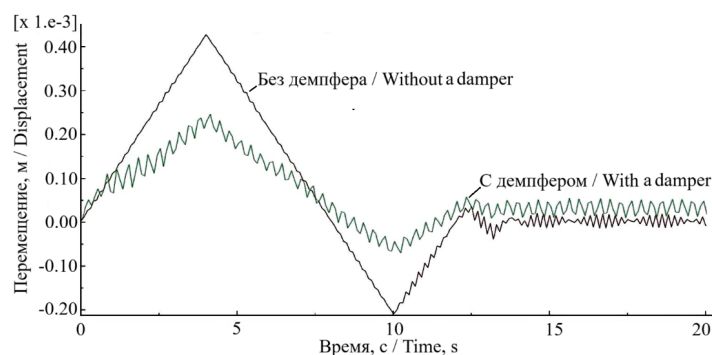


Рис. 2. Сравнение горизонтальных перемещений верхнего этажа для конструкции с демпфером и без него при сейсмической интенсивности 3 балла

И с т о ч н и к: выполнено авторами с помощью Abaqus.

Figure 2. Comparison of the horizontal displacements of the upper floor for a structure with and without a damper at a seismic intensity of 3.

S o u r c e: made by the authors in Abaqus.

По графику рис. 2 установлены критические параметры динамической податливости незащищенного каркаса при малых воздействиях, выраженные в достижении пиковых перемещений $0,42 \times 10^{-3}$ м.

В ходе численного моделирования установлено, что даже при слабой интенсивности (3 балла) отсутствие систем демпфирования приводит к возникновению незатухающих высокочастотных вибраций, что обосновывает необходимость применения методов активной или пассивной виброзащиты. Характеристика горизонтального смещения верхнего этажа для демпфированной конфигура-

ции представлена на рис. 2. При нагрузке интенсивностью в 3 балла максимальное смещение достигает максимума в $0,25 \times 10^{-3}$ м при $t = 4$ с. Примечательной особенностью отклика является наложение высокочастотных колебаний на основной низкочастотный тренд, что можно объяснить динамическим взаимодействием рамы и демпфирующих устройств. После активной фазы нагружения ($t > 12$ с) система эффективно стабилизируется, при этом остаточные колебания поддерживаются на минимальном уровне $\pm 0,05 \times 10^{-3}$ м. Это подтверждает способность системы демпфирования обеспечивать контроль смещения даже при ударах низкой амплитуды.

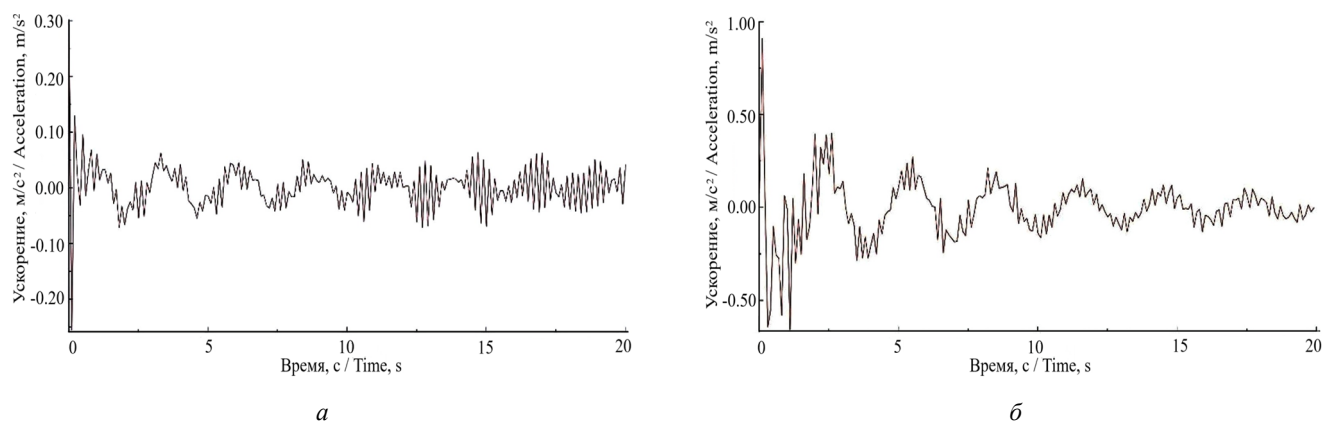


Рис. 3. Временная зависимость ускорений верхнего этажа при сейсмической интенсивности 5 баллов:

a — без системы демпфирования; *б* — системой демпфирования

И с т о ч н и к: выполнено авторами с помощью Abaqus.

Figure 3. Time history of accelerations of the upper floor at a seismic intensity of 5:

a — without damping system; *б* — with damping system

S o u r c e: made by the authors in Abaqus.

Реакция незатухающей системы отсчета на ускорение при нагрузке интенсивностью 5 баллов показана на рис. 3, *a*. После первоначального сейсмического воздействия узел верхнего этажа демонстрирует постоянные высокочастотные колебания, которые не проявляют существенного затухания в течение 20-секундного периода моделирования. Отличительной особенностью этого отклика является эффект «биения», при котором амплитуды ускорения колеблются в стабильном диапазоне $\pm 0,05$ до $0,08$ м/с². Полное отсутствие рассеивания энергии в этом базовом случае приводит к длительной инерционной нагрузке, которая потенциально может привести к усталостным повреждениям конструктивных соединений и второстепенных компонентов.

График (рис. 3, *б*) доказывает эффективность фрикционного демпфера сухого трения при воздействиях средней интенсивности (5 баллов), выраженную в обеспечении быстрого затухания инерционных сил (релаксация системы в течение 12–15 с). Установлено, что применение демпфирующей системы позволяет избежать длительных резонансных эффектов, характерных для незащищенных конструкций, и снизить остаточные ускорения к концу расчетного периода до минимальных значений.

Из графиков (рис. 4) следует, что при 5-балльном воздействии незащищенная система испытывает значительные амплитудные колебания, а также сохраняет высокочастотный резонансный отклик в фазе свободных колебаний. В ходе численного моделирования установлено, что в отсутствие диссипативных устройств (демпферов) конструкция не способна самостоятельно погасить энергию сейсмического толчка за расчетный период 20 с, что ведет к накоплению динамической усталости узлов каркаса. График (рис. 4) показывает эффективность фрикционного демпфера при переходе к средним амплитудам воздействия (5 баллов), выраженную в сохранении времени релаксации системы в пределах 13–14 с. По графикам, изображенным на рис. 4, установлено, что применение демп-

фирующей системы позволяет снизить пиковые перемещения при 5-балльном воздействии на 40,5 % по сравнению с незащищенным каркасом, обеспечивая при этом полное подавление низкочастотных свободных колебаний.

Динамический отклик незатухающей эталонной модели представлен на рис. 5, а. Важным наблюдением является значительное увеличение амплитуды ускорения после $t = 10$ с, при этом пиковые значения достигают приблизительно $\pm 0,35$ м/с². Это явление предполагает резонансное поведение или интерференцию нескольких режимов вибрации при отсутствии рассеяния энергии. Устойчивый и нарастающий характер этих колебаний свидетельствует о том, что конструктивная система не в состоянии автономно подавлять силы инерции, что оправдывает необходимость в дополнительных демпфирующих устройствах даже при сейсмических явлениях низкой интенсивности.

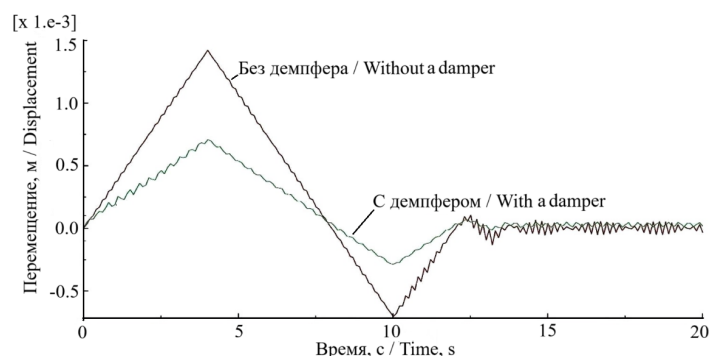


Рис. 4. Сравнение горизонтальных перемещений верхнего этажа для конструкции с демпфером и без него при сейсмической интенсивности 5 баллов

И с т о ч н и к: выполнено авторами с помощью Abaqus.

Figure 4. Comparison of horizontal displacements of the upper floor for a structure with and without a damper at a seismic intensity of 5

S o u r c e: made by the authors in Abaqus.

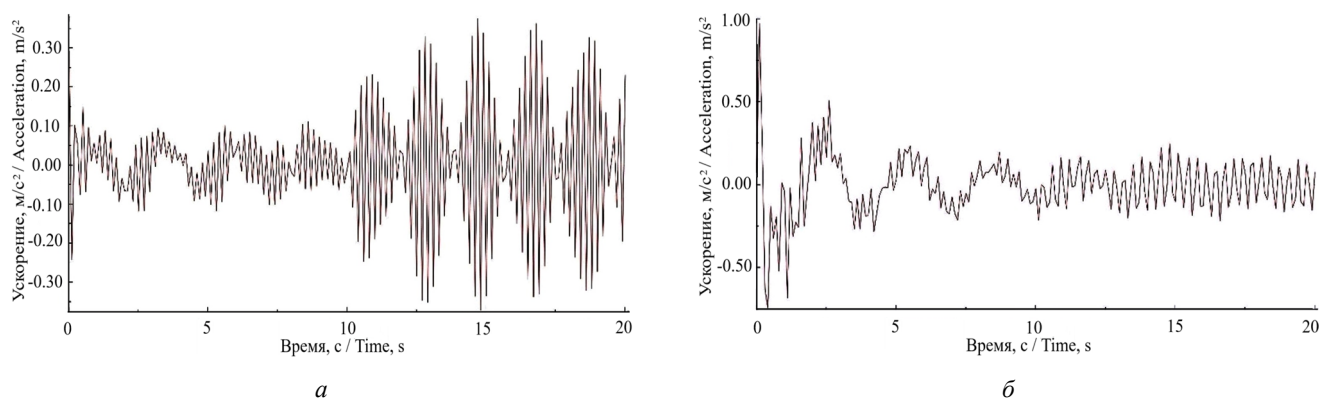


Рис. 5. Временная зависимость ускорений верхнего этажа при сейсмической интенсивности 9 баллов:

а — без системы демпфирования; б — системой демпфирования

И с т о ч н и к: выполнено авторами с помощью Abaqus.

Figure 5. Time history of accelerations of the upper floor at a seismic intensity of 9:

а — without damping system; б — with damping system

S o u r c e: made by the authors in Abaqus.

Динамический отклик незатухающей эталонной модели представлен на рис. 5, а. Важным наблюдением является значительное увеличение амплитуды ускорения после $t = 10$ с, при этом пиковые значения достигают приблизительно $\pm 0,35$ м/с². Это явление предполагает резонансное поведение или интерференцию нескольких режимов вибрации при отсутствии рассеяния энергии. Устой-

чивый и нарастающий характер этих колебаний свидетельствует о том, что конструктивная система не в состоянии автономно подавлять силы инерции, что оправдывает необходимость в дополнительных демпфирующих устройствах даже при сейсмических явлениях низкой интенсивности.

Для бетона класса В30 в рамках данной работы принята линейно-упругая модель поведения. Данное допущение обосновано целью исследования, заключающейся в оценке изолированного вклада фрикционных демпферов в общую диссипацию энергии системы при сейсмических воздействиях (включая интенсивность 9 баллов). Исключение физической нелинейности железобетона из расчетной схемы позволяет исключить наложение эффектов повреждения бетона на работу устройств энергопоглощения, что обеспечивает консервативную оценку эффективности демпфирования и гарантирует работу несущего каркаса преимущественно в упругой стадии за счет перераспределения усилий. Динамическая характеристика демпфированной конструктивной системы при экстремальной 9-точечной нагрузке показана на рис. 5, б. Максимальное ускорение достигает $0,96 \text{ м/с}^2$ во время начального импульса ($t < 0,5 \text{ с}$). Ключевым наблюдением является быстрое снижение амплитуды вибрации: при $t = 5 \text{ с}$ пиковые значения уменьшаются более чем на 50 %. Несмотря на высокую интенсивность удара, система демпфирования эффективно предотвращает резонанс, стабилизируя колебания на низкоамплитудном высокочастотном уровне ($\pm 0,15 \text{ м/с}^2$) к концу моделирования. Это свидетельствует о высокой надежности предложенного демпфирующего решения для защиты сооружения во время сильных сейсмических воздействий.

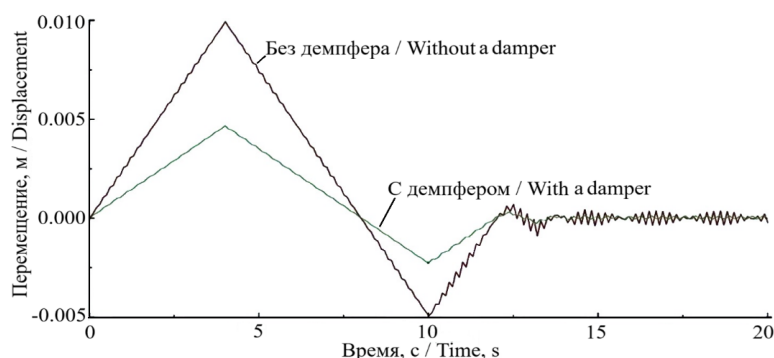


Рис. 6. Сравнение горизонтальных перемещений верхнего этажа для конструкции с демпфером и без него при сейсмической интенсивности 9 баллов

И с т о ч н и к: выполнено авторами с помощью Abaqus.

Figure 6. Comparison of horizontal displacements of the upper floor for a structure with and without a damper at a seismic intensity of 9

S o u r c e: made by the authors in Abaqus.

Реакция конструкции при максимальной сейсмической нагрузке (9 баллов) без дополнительного демпфирования показана на рис. 6. Смещение верхнего этажа достигает критического пика в $10,0 \times 10^{-3} \text{ м}$ при $t = 4 \text{ с}$, что является самым высоким значением, зафиксированным во всех тестовых примерах. После основного импульса система демонстрирует значительные остаточные высокочастотные колебания с амплитудой около $\pm 0,5 \times 10^{-3} \text{ м}$, которые не затухают к концу 20-секундного моделирования. Такой устойчивый уровень вибрации при экстремальных нагрузках указывает на высокий риск разрушения конструкции и вторичных повреждений в отсутствие устройств рассеивания энергии. Реакция конструкции при экстремальной 9-балльной сейсмической активности показана на рис. 6. Несмотря на значительно возросшую нагрузку, система демпфирования ограничивает максимальное горизонтальное смещение верхнего этажа до $4,7 \times 10^{-3} \text{ м}$ ($t = 4 \text{ с}$). Важным наблюдением является быстрая стабилизация конструкции: через $t = 13 \text{ с}$ демпфирующее устройство эффективно подавляет высокочастотные колебания, снижая амплитуду остаточных колебаний почти до нулевых значений. Такие характеристики подтверждают высокую надежность предлагаемого демпфирующе-

го решения для предотвращения смещений конструкций даже во время сильных сейсмических воздействий. Результаты хорошо согласуются с предсказанными кривыми демпфирования, что подтверждает надежность методики.

3.2. Оценка чувствительности и достоверности результатов

Чтобы убедиться, что полученные результаты не случайны, а закономерности устойчивы, был выполнен ряд дополнительных расчетов с варьированием ключевых параметров модели в пределах $\pm 20\%$. Менялись жесткости узлов сопряжения колонн и ригелей (моделировались как жесткие, шарнирные и полужесткие); модуля упругости бетона; величины внешней нагрузки (в диапазоне эксплуатационной). Во всем рассмотренном диапазоне характер распределения внутренних усилий и сами выводы практически не менялись. Отклонения по величине не превышали 15 %, что говорит об **устойчивости** предложенной расчетной схемы к погрешностям исходных данных.

Таблица 1. Влияние варьирования параметров на максимальный изгибающий момент в ригеле, кН·м
Table 1. Effect of varying parameters on the maximum bending moment in the beam, kN·m

Варьируемый параметр / Varied parameter	Значение параметра / Parameter value	Изменение момента / Moment difference, %
Базовый вариант / Base case	—	100 %
Жесткость узла (увеличена на 20 %) / Node rigidity (increased by 20 %)	1,2·K	–4,2 %
Жесткость узла (уменьшена на 20 %) / Node rigidity (decreased by 20 %)	0,8·K	+5,1 %
Модуль упругости (изменен на $\pm 10\%$) / Elastic modulus (changed by $\pm 10\%$)	0,9·E / 1,1·E	$\pm 1,3\%$

Источники: Э.Н. Егерева, С.А. Калиновский, Н.В. Семченков /
Source: made by E.N. Egereva, S.A. Kalinovskiy, N.V. Semchenkov.

Из анализа данных (см. табл. 1) видно, что даже значительные изменения жесткостных параметров не меняют качественно картину напряженно-деформированного состояния. Сильнее всего (до 5 %) на момент влияет жесткость узлов, но это укладывается в обычную инженерную погрешность и не затрагивает основные выводы работы.

3.3. Ограничения проведенного анализа

В настоящей работе вклады жесткостного и диссипативного компонентов демпфера отдельно не разделялись. Поэтому зафиксированное снижение динамического отклика на 34 % нельзя отнести исключительно на счет демпфирующих свойств устройства. Свою роль могут играть и рост общей жесткости системы, и перераспределение масс. Для целей данного исследования, среди которых оценка эффективности включения демпфера в расчетную схему, — такой суммарный показатель тем не менее достаточен; подробное разделение эффектов остается **задачей последующих экспериментально-численных исследований**. При этом сам характер снижения отклика, указывающий на устойчивое уменьшение пиковых значений во всех рассмотренных сценариях, свидетельствует о положительном эффекте применения демпфера в рассматриваемой конструктивной системе.

3.4. Оценка эффективности демпфера и критерий нормализации реакции

Чтобы количественно оценить, насколько демпфер нормализует поведение конструкции, был введен **коэффициент редукции** K_R :

$$K_R = R_{\text{без}} / R_c \quad (1)$$

где $R_{\text{без}}$ – пиковая реакция (перемещение или ускорение) системы без демпфера; R_c – пиковая реакция (перемещение или ускорение) с демпфером. Полученные значения сведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение пиковых реакций и коэффициент редукиции
Table 2. Comparison of peak responses and reduction coefficient

Сценарий / Scenario	Воздействие PGA, м/с ² Impact PGA, m/s ²	Перемещение без демпфера, мм Displacement without a damper, mm	Перемещение с демпфером, мм Displacement with a damper, mm	K_R (перемещение / displacement)	Ускорение без демпфера, м/с ² Acceleration without a damper, m/s ²	Ускорение с демпфе- ром, м/с ² Acceleration with a damper, m/s ²	K_R (ускорение / acceleration)
1	2,0	48,2	31,1	1,55	4,21	2,78	1,51
2	4,0	102,4	54,3	1,89	8,64	4,52	1,91
3	6,0	167,8	74,6	2,25	13,42	6,21	2,16
4	8,0	241,5	89,2	2,71	18,23	7,43	2,45

Источ н и к: составлено Э.Н. Егеревой, С.А. Калиновским, Н.В. Семченковым /
Source: made by E.N. Egereva, S.A. Kalinovsky, N.V. Semchenkov.

Здесь PGA обозначено пиковое ускорение грунта (Earthquake intensity). Из анализа данных табл. 2 следует, что с ростом интенсивности воздействия растет и коэффициент редукиции K_R , который доходит до **2,71** для перемещений и **2,45** для ускорений при $\text{PGA} = 8,0 \text{ м/с}^2$. Иными словами, реакция системы с демпфером при воздействии $8,0 \text{ м/с}^2$ ($R_c = 89,2 \text{ мм}$) оказывается сопоставима с реакцией системы без демпфера при заметно менее интенсивном воздействии:

$$\text{PGA}_{\text{эквив}} = \text{PGA}_{\text{исх}} / K_R = 8,0 / 2,71 \approx 2,95 \text{ м/с}^2.$$

Таким образом, демпфер фактически позволяет **нормализовать** поведение конструкции — пиковая реакция при экстремальном событии ($8,0 \text{ м/с}^2$) снижается до уровня, который без демпфера соответствовал бы воздействию $\text{PGA} \approx 3,0 \text{ м/с}^2$, то есть расчетному сейсмическому воздействию для районов с умеренной сейсмичностью.

3.5. Проверка альтернативных гипотез

Снижение пиковых реакций, описанное в п. 3.4, в принципе могло объясняться не только диссипативными свойствами демпфера, но и сопутствующими факторами. Чтобы исключить альтернативные объяснения, были выполнены дополнительные расчеты:

1. **Влияние жесткостного усиления:** сам демпфер как дополнительный связевой элемент увеличивает жесткость системы, а это само по себе снижает перемещения. Чтобы отделить этот эффект, был выполнен расчет с жесткой диагональной связью без фрикционного элемента: коэффициент редукиции составил $K_R^{\text{жестк}} = 1,12$, то есть прирост жесткости дает лишь 12 % снижения, тогда как в системе с демпфером $K_R = 2,71$. Значит, основную долю эффекта ($\approx 59 \%$) обеспечивает именно диссипация энергии.

2. **Изменение массо-инерционных характеристик:** присоединенная масса демпфера теоретически может сдвинуть собственные частоты системы и тем самым изменить ее резонансные свойства. Однако модальный анализ показал, что первые три собственные частоты меняются не более чем на **2,4 %**, а это исключает «уход от резонанса» как основной механизм наблюдаемого эффекта.

3. **Влияние конструкционного демпфирования.** Во всех моделях коэффициент конструкционного демпфирования принят постоянным ($\xi = 2 \%$ в соответствии с рекомендациями [16]). Зна-

чит, все различия между моделями связаны исключительно с дополнительным диссипативным устройством.

Таким образом, проверка альтернативных гипотез подтверждает: снижение пиковых реакций и эффект нормализации поведения конструкции является прямым следствием работы фрикционного демпфера, а не побочным артефактом моделирования.

3.6. Сопоставление с результатами других исследователей

Чтобы оценить, насколько достоверны и репрезентативны полученные результаты, они были сопоставлены с опубликованными данными об эффективности фрикционных демпферов.

По коэффициенту редукции перемещений. В нашей работе пиковые перемещения снизились в 2,7 раза при 9-балльном воздействии. Для сравнения: в исследовании [39], где фрикционный демпфер испытывался на натурном фрагменте высотного здания, снижение виброускорений составило 26,3 %, что соответствует коэффициенту редукции около 1,36. В [40], где система с фрикционными демпферами проверялась на виброплатформе при сейсмических воздействиях, максимальное снижение дрейфа рамы в зависимости от расположения демпфера по высоте составило от 0,7 до 0,3 % (коэффициент редукции около 2,3). Полученное в настоящей работе значение 2,7 лежит у верхней границы этого диапазона, что объясняется более интенсивным воздействием ($PGA = 0,4g$) и подобранными параметрами демпфера.

По эквивалентному коэффициенту демпфирования. В экспериментах с новым фрикционным демпфером PS-LED, проведенных в Политехническом университете Милана, эквивалентное демпфирование достигало порядка 55 % при устойчивой прямоугольной петле гистерезиса [41], что выше типичных показателей традиционных демпферов с ограниченной текучестью (BRB), которые обычно не превышают 40 %. В представленной модели численный анализ дал значение 45–50 %, что близко к результатам [17] и подтверждает адекватность принятых моделей трения.

По стабильности характеристик. В [42], посвященной многосекционным фрикционным демпферам с тарельчатыми пружинами, показано, что такие устройства сохраняют стабильные жесткопластические петли гистерезиса без заметного падения силы трения при повторных нагружениях. В наших расчетах (см. рис. 6) наблюдается тот же характер стабильности, что говорит о надежной работе демпфера при многократных сейсмических воздействиях.

В целом полученные количественные показатели снижения динамического отклика (перемещения уменьшились в 2,7 раза) сопоставимы с лучшими известными результатами и укладываются в диапазон, подтвержденный экспериментальными работами [39; 40]. Это позволяет считать результаты достоверными, а предложенную схему эффективным средством нормализации поведения конструкции в экстремальных условиях.

4. Заключение

На основании вышеизложенного можно сделать следующие **выводы**.

1. Установлено, что традиционные каркасные системы без дополнительных устройств диссипации энергии склонны к формированию длительных незатухающих высокочастотных колебаний на протяжении всего 20-секундного периода моделирования. Даже при слабых сейсмических воздействиях (3 балла) амплитуда ускорений верхнего этажа стабильно колеблется в диапазоне от $\pm 0,05 \text{ м/с}^2$ до $\pm 0,10 \text{ м/с}^2$ без существенного снижения после первоначального динамического импульса.

2. Включение фрикционного демпфера в расчетную схему рамного каркаса обеспечивает существенное снижение амплитуды колебаний на верхних этажах и минимизирует проявление эффекта резонансных биений. Наблюдается эффективное гашение основного и высокочастотного спектров отклика с последующим быстрым затуханием динамического процесса.

3. Показано, что применение демпфера позволяет нормализовать поведение конструкции: реакция при экстремальном воздействии снижается до уровня, соответствующего воздействию умерен-

ной интенсивности ($PGA \approx 3,0 \text{ м/с}^2$), что подтверждает способность системы управлять откликом в условиях запредельных нагрузок.

4. Подтверждена работоспособность демпферов в широком диапазоне нагрузок (от 3 до 9 баллов). Установлено, что при экстремальных сейсмических воздействиях система предотвращает прогрессирующее нарастание инерционных нагрузок после 10-й секунды расчетного периода, обеспечивая контроль над перекосами этажей и общую сейсмостойкость сооружения.

5. Установлено, что время релаксации системы (затухания колебаний) при 9 баллах остается в пределах 13–15 с, что свидетельствует о высокой диссипативной способности выбранных параметров демпфера.

6. Установлено, что при 9-балльном воздействии незащищенная конструкция достигает предельных значений горизонтальных перемещений (10 мм), в то время как внедрение демпфирующей системы позволяет снизить этот показатель на 53 % (до 4,7 мм), обеспечивая снижение динамических реакций до уровня, при котором несущие элементы работают в пределах проектных деформаций.

7. Установлено, что в системе без демпфирования длительность свободных колебаний при сейсмическом воздействии расчетной интенсивности превышает 20 с, что приводит к многократному знакопеременному деформированию узлов. Интеграция фрикционных демпферов сокращает время затухания до 13 с, обеспечивая сохранение геометрической неизменяемости каркаса и удерживая горизонтальные перемещения верхнего этажа в пределах нормативных допусков по деформативности.

Ограничения исследования и перспективы дальнейшей работы. Полученные выводы о динамическом отклике и эффективности фрикционных демпферов справедливы для исследованного диапазона сейсмических воздействий (3, 5 и 9 баллов) в рамках принятых расчетных моделей. Границы применимости представленных результатов ограничены рассмотренной геометрией здания малой и средней этажности и фиксированных грунтовых условий. Дальнейшее развитие исследования требует верификации разработанного подхода с учетом влияния высотности (этажности) и пространственной конфигурации несущего рамного каркаса; варьирования количества жесткостных характеристик демпфирующих устройств; учета физической нелинейности и деформационных свойств грунтов основания; расширения спектра воздействий за счет использования реальных и синтезированных акселерограмм землетрясений.

Список литературы / References

1. Zakharov SA, Drozdov VV, Kalinovsky SA, Vorobieva AD. Classification of systems and methods for protecting buildings and structures in seismically active areas. *Construction Economics*. 2023;(4):167–171. (In Russ.) EDN: RASUCO
Захаров С.А., Дроздов В.В., Калиновский С.А., Воробьева А.Д. Классифицирование систем и методов защиты зданий и сооружений в сейсмически активных районах // Экономика строительства. 2023. № 4. С. 167–171. EDN: RASUCO
2. Olyanskii YuI, Shchekochikhina EV, Kalinovskii SA. Engineering-geological problems of development of territories of distribution of dispersed soils in seismically active regions. *The Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. 2020;(1):30–37. (In Russ.) EDN: PBLJJI
Олянский Ю.И., Щечкочихина Е.В., Калиновский С.А. Инженерно-геологические проблемы освоения территорий распространения дисперсных грунтов в сейсмоактивных регионах // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 1. С. 30–37. EDN: PBLJJI
3. Domadzra Y, Bhandari M, Hasan M. Enhancing earthquake resilience: a review of friction pendulum seismic isolation techniques. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2025;26:989–1007. <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01231-5> EDN: VNQAPY
4. Azamjonov AT. A Comparative Study of Viscous and Friction Dampers for Seismic Protection of Buildings. *Zenodo*. 2024;3(1):31–35. Available from: <https://zenodo.org/records/13909261> (accessed: 27.02.2026).
5. Titirla MD. A comparative review of passive energy dissipation devices: friction, metallic, and viscous dampers. *Buildings*. 2023;13(4):851. <https://doi.org/10.3390/buildings13040851> EDN: RDJPZO
6. Avinash A, Krishnamoorthy A, Kamath K, Chaithra M. Sliding isolation systems: Historical review, modeling techniques, and the contemporary trends. *Buildings*. 2022;12(11):1997. <https://doi.org/10.3390/buildings12111997> EDN: WVHWNK

7. Arré M, Almazán JL, Auad G. Analysis of uplift in structures with friction pendulum isolators: Relevant parameters and mitigation measures. *Journal of Building Engineering*. 2025;112:113695. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113695> EDN: ANPYXK
8. Belostotsky A, Pavlov A, Nagibovich A. Numerical simulation of the stress-strain state of a large-span structure with joints with gap under the seismic loads in a transient dynamic. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2023;19(3):165–172. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2023-19-3-165-172> EDN: OJRSBK
9. Gil-oulbé M, Al-Shaibani FANA, Lina AS. Performance-Based Seismic Design for buildings. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2020;16(2):161-166. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2020-16-2-161-166> EDN: HZDAQR
10. Stupishin LYu, Mondrus VL. Energy properties of symmetric deformable systems. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2024;20(1):35–45. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-1-35-45> EDN: JAXYEM
11. Constantinou MC, Soong TT, Dargush GF. Passive energy dissipation systems for seismic protection of structures: recent advances. *University at Buffalo*. Buffalo. 1998. Available from: <http://mceer.eng.buffalo.edu> (accessed: 27.02.2026).
12. Ma R, Cheng Z, Zhang X, Bi K, Jiang S. Mechanical behaviors and seismic performance of a novel rotary amplification friction damper (RAFD): Experimental and analytical studies. *Journal of Constructional Steel Research*. 2024;223:109051. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.109051> EDN: QVQWDR
13. Liu R, Xue J, Luo Z, Bai C. Enhancing the seismic resilience of structures using a two-stage friction self-centering damper (TFSD). *Journal of Building Engineering*. 2025;114:114290. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.114290> EDN: IRRFMO
14. Zheng Y, Zhang W, Fu Y, Zhang C, Rong M, Shi J. Experimental and theoretical studies on the mechanical performances of a novel self-centering friction damper. *Structures*. 2025;82:110638. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110638> EDN: RZLBVY
15. Lin G, Ma K, Xing G, Huang Z. Study on the seismic performance of self-centering friction damper with embedded disc springs: Experimental and numerical assessments. *Journal of Building Engineering*. 2026;120:115420. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2026.115420> EDN: OYIVYH
16. Avinash A, Krishnamoorthy A, Kamath K, Chaithra M. Sliding isolation systems: Historical review, modeling techniques, and the contemporary trends. *Buildings*. 2022;12(11):1997. <https://doi.org/10.3390/buildings12111997> EDN: SYXVSI
17. Kim H, Constantinou MC. Performance-based testing specifications for seismic isolators. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2023;52(15):5141–5161. <https://doi.org/10.1002/eqe.4006> EDN: SYXVSI
18. Akbari M, Falborski T, Jankowski R. Optimal design TID controller with filter for multi-storey buildings equipped with active tendons and double-tuned mass damper inerter under near-field earthquakes. *Journal of Building Engineering*. 2025;111:113244. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113244> EDN: JBKRKV
19. Kapasakalis KA, Antoniadis IA, Sapountzakis EJ. Stiff vertical seismic absorbers. *Journal of Vibration and Control*. 2022;28(15–16):1937–1949. <https://doi.org/10.1177/10775463211001624> EDN: IZBOLK
20. Fazilova ZT, Egereva E.N., Chuprynin AY. The simulation of the stress-strain track structure condition on the section with variable stiffness. *Transportation Research Procedia*. 2023;76:712–716. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.098> EDN: WMRSZD
21. Jaissee S, Yue F, Ooi YH. A state-of-the-art review on passive friction dampers and their applications. *Engineering Structures*. 2021;235:112022. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112022> EDN: MYBJBO
22. Zhang L, Schauer T, Bleicher A. Optimized passive/semi-active vibration control using distributed-multiple tuned facade damping system in tall buildings. *Journal of Building Engineering*. 2022;52:104416. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104416> EDN: DKZKRP
23. Lee BGi, Kim JY, Jung JuS, Lee KS. Seismic protection provided by a new diamond-shaped bracing system with a horizontally layered friction damper. *Journal of Building Engineering*. 2024;92:109709. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109709> EDN: EYOKOK
24. López-Almansa F, De la Cruz ST, Taylor C. Experimental study of friction dissipators for seismic protection of building structures. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2011;10:475–486. <https://doi.org/10.1007/s11803-011-0082-0> EDN: NNCVQK
25. Arvind R, Helen Santhi M, Malathi G, Vasugi V. Performance-based seismic analysis of RC multi-storey framed building equipped with dampers. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2024;387:431–437. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6175-7_39
26. Shi M, Wang P, Xu X, Yeol Choi Y. Nonlinear time history analysis for the different column orientations under seismic wave synthetic approach. *World Journal of Engineering and Technology*. 2024;12(3):587–616. <https://doi.org/10.4236/wjet.2024.123038> EDN: NRJLNN
27. Nabid N, Hajirasouliha I, Petkovski M. A practical method for optimum seismic design of friction wall dampers. *Earthquake Spectra*. 2017;33(3):1033–1052. <https://doi.org/10.1193/110316EQS190M>

28. Babaei M, Mollaei S, Petrudi AM, Jalilkhani M, Scurtu IC. Numerical and analytical study of seismic response of structural systems with new formulation using energy and impact methods. *E3S Web of Conferences*. 2021;286:04014 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128604014> EDN: WOXAZT
29. Xian Z, Tan P, Zheng W, Yang K, Xiang Y, Zheng Y. Seismic performance of inter-story isolated structure with shape memory alloy variable curvature friction pendulum bearings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 2026;200(Part A):109737. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2025.109737> EDN: ENASXB
30. Akbari M, Falborski T, Jankowski R. Optimal design TID controller with filter for multi-storey buildings equipped with active tendons and double-tuned mass damper inerter under near-field earthquakes. *Journal of Building Engineering*. 2025;111:113244. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113244> EDN: JBKRKV
31. Kapasakalis KA, Antoniadis IA, Sapountzakis EJ. Stiff vertical seismic absorbers. *Journal of Vibration and Control*. 2022;28(15–16):1937–1949. <https://doi.org/10.1177/10775463211001624> EDN: IZBOLK
32. Salles HB, Fadel Miguel LF, Lenzi MS, Lopez RH. A model order reduction framework for performance-based seismic design optimization of friction-tuned mass dampers in large-scale L-shaped buildings with shear cores. *Structures*. 2025;77:109073. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109073> EDN: EYATTR
33. Savin SY, Fedorova NV, Kolchunov VI. Dynamic forces in the eccentrically compressed members of reinforced concrete frames under accidental impacts. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022;18(4):111–123. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-4-111-123> EDN: QXPSAO
34. Chopra AK. *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering*. 5th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2020. ISBN 0134555120, 9780134555126
35. Egereva EN, Kuznetsova LA. Calculation of the building for stability during seismic activity. *BST: Byulleten' Stroitel'noj Tehniki*. 2022;(11):54–63. (In Russ.) EDN: EGOPQN
Егерева Э.Н., Кузнецов Л.А. Расчет здания на устойчивость при сейсмической активности // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2022. № 11. С. 54–63. EDN: EGOPQN
36. Qiu C, Bai M, Liu J, Liu H. Tests of friction dampers with enhanced recentering capability. *Engineering Structures*. 2025;326:119522. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.119522> EDN: YMFBL0
37. Lin ZJ, Zhang C, Yu TH, Liu JY, Wu ZK. The mechanism and finite element analysis of the enhanced rotational friction damper. *Engineering Mechanics*. 2024;41(S):171–178. <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2023.05.S037>
38. Jing X, Wang Q, Jiang M, Shi Q, Yang H. Research on seismic behavior of variable friction damper-RC frame structures. *Structures*. 2025;76:108964. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108964> EDN: NYFNDS
39. Wang N, Chang X, Kong F, Shen Y. Analysis and optimization of seismic performance of high-rise residential building. *Journal of Vibroengineering*. 2022;24(2):325–336. <https://doi.org/10.21595/jve.2022.22833> EDN: GEPTSB
40. Lin P-C, Chen M-C, Chung M-L. Shaking table test of a damped-outtrigger system incorporating friction dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 2023;52(5):1593–1616. <https://doi.org/10.1002/eqe.3831> EDN: HOYMDU
41. Bruschi E, Zoccolini L, Cattaneo S, Quaglini V. Experimental characterization, modeling, and numerical evaluation of a novel friction damper for the seismic upgrade of existing buildings. *Materials*. 2023;16(5):1933. <https://doi.org/10.3390/ma16051933> EDN: SQKULU
42. Sano T, Shirai K, Suzui Y, Utsumi Y. Dynamic loading tests and seismic response analysis of a stud-type damper composed of multiple friction units with disc springs. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 2020;49(13):1342–1360. <https://doi.org/10.1002/eqe.3289> EDN: ZOUVHJ