



УДК 624.012

DOI: 10.22227/2949-1622.2026.3.53-66

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

Пространственные гидравлические системы для защиты железобетонных промышленных каркасов от сейсмических и техногенных воздействий

А.И. Шеин*, А.Н. Быков, А.В. Ощепкова

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Российская Федерация

* shein-ai@yandex.ru

Ключевые слова: железобетонные каркасы, колебания, акселерограммы, демпфирование колебаний, перекрестные демпфирующие связи, гидроцилиндры

История статьи

Поступила в редакцию: 28.05.2026

Доработана: 08.06.2026

Принята к публикации: 12.06.2026

Для цитирования

Шеин А.И., Быков А.Н., Ощепкова А.В. Пространственные гидравлические системы для защиты железобетонных промышленных каркасов от сейсмических и техногенных воздействий // Железобетонные конструкции. 2026. Т. 15. № 3. С. 53–66.

Аннотация. В работе предложены методики расчета механической безопасности конструкций и конструктивных систем зданий и сооружений при чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях. Предлагаемая система демпфирования нацелена на разработку и внедрение технологических инноваций — систем активного и пассивного управления средствами гашения колебаний — и обеспечение технологического лидерства Российской Федерации в области гарантированной безопасности зданий и сооружений при критических природных и техногенных воздействиях. Повышение безопасности зданий и сооружений предлагается осуществлять за счет разработки и развития эффективных способов демпфирования колебаний в результате применения трех систем тросовых связей, оборудованных гидроцилиндрами одностороннего действия. Эти три отдельных системы демпфирования в сумме образуют интегральную систему снижения уровня колебаний пространственного железобетонного каркаса производственного здания. Строится и численно апробируется алгоритм поиска безопасного включения колонн и балок (ферм) в работу демпфируемой системы связи — каркас за счет снижения уровня размахов колебаний каркаса. Из цикла решений дифференциальных уравнений движения демпфируемой системы с вариациями сопротивления движению и/или параметров колонн подбираются оптимальные для данных возмущений параметры демпферов, механические характеристики колонн и балок, а также параметры преднатяжения. Исследуются перекрестные тросовые (гибкие) системы связей с гидроцилиндрами одностороннего действия, демпфирующие горизонтальные колебания и тросовые гидравлические связи, демпфирующие вертикальные колебания несущих конструкций покрытия. На основе численных экспериментов определяются параметры перекрестных ленточно-тросовых горизонтальных и вертикальных гидравлических систем связей для каркасов одноэтажных промышленных зданий: предварительного натяжения, характеристик тросов, характеристик гидроцилиндров, а также уточненных механических характеристик железобетонного каркаса. Разрабатывается и исследуется математическая модель демпфирования колебаний железобетонных каркасов с тросовыми связями, оборудованными гидроцилиндрами одностороннего действия, а также методы, алгоритмы и программный комплекс.

Александр Иванович Шеин, советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Механика», Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28; eLIBRARY SPIN-код: 7553-3901, E-mail: shein-ai@yandex.ru

Александр Николаевич Быков, аспирант, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28.

Анна Викторовна Ощепкова, студент, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, д. 28.

© Шеин А.И., Быков А.Н., Ощепкова А.В., 2026



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

Spatial Hydraulic Systems for Protecting Reinforced Concrete Industrial Frames from Seismic and Technogenic Impacts

A.I. Shein*, A.N. Bykov, A.V. Oshchepkova

Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russian Federation

* shein-ai@yandex.ru

Keywords: reinforced concrete frames, vibrations, accelerograms, vibration damping, cross damping connections, hydraulic cylinders

Article history

Received: 28.05.2026

Revised: 08.06.2026

Accepted: 12.06.2026

For citation

Shein A.I., Bykov A.N., Oshchepkova A.V. Spatial Hydraulic Systems for Protecting Reinforced Concrete Industrial Frames from Seismic and Technogenic Impacts. *Reinforced Concrete Structures*. 2026; 3(15):53-66.

Abstract. The paper proposes methods for calculating the mechanical safety of structures and structural systems of buildings and structures in emergency situations, special and out-of-design impacts. The proposed damping system is aimed at developing and implementing technological innovations — active and passive control systems for vibration damping — and ensuring the technological leadership of the Russian Federation in the field of guaranteed safety of buildings and structures under critical natural and man-made impacts. It is proposed to improve the safety of buildings and structures through the development and development of effective vibration damping methods as a result of the use of three cable coupling systems equipped with single-acting hydraulic cylinders. These three separate damping systems add up to form an integrated system for reducing the vibration level of the spatial reinforced concrete frame of the production building. An algorithm for finding the safe inclusion of columns and beams (trusses) in the operation of a damped frame communication system is being built and numerically tested by reducing the vibration range of the frame. From the cycle of solutions to the differential equations of motion of the damped system with variations in resistance to movement and/or column parameters, optimal damper parameters, mechanical characteristics of columns and beams, as well as pre-tension parameters are selected for these disturbances. Cross-rope (flexible) coupling systems with single-acting hydraulic cylinders damping horizontal vibrations and hydraulic cable couplings damping vertical vibrations of the bearing structures of the coating are investigated. Based on numerical experiments, the parameters of cross-band-rope horizontal and vertical hydraulic coupling systems for single-story industrial building frames are determined: pre-tensioning, cable characteristics, hydraulic cylinder characteristics, as well as refined mechanical characteristics of the reinforced concrete frame. A mathematical model of vibration damping of reinforced concrete frames with cable ties equipped with single-acting hydraulic cylinders, as well as methods, algorithms and a software package are developed and investigated.

ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования является конструктивная система «сооружение – гаситель», а именно железобетонный каркас здания, оборудованный трехмерной системой гидравлического демпфирования.

Предметом исследования являются демпфирующие свойства конструктивной системы «сооружение – гаситель» с гидравлическими демпферами, изучаемые на динамических расчетных моделях с помощью численных методов динамики сооружений.

Курильские острова и Сахалин, полуостров Камчатка, Северный Кавказ и побережье Чёрного моря, Забайкалье, Алтай и Тыва, Якутия — сейсмоопасные районы на территории России, т.е. районы, где периодически происходят землетрясения. Землетрясения характеризуются мощными колебаниями земной поверхности, что может повлечь серьезные разрушения зданий и сооружений. Частота землетрясений во всем мире неуклонно растёт.

Aleksandr I. Shein, Advisor of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechanics, Penza State University of Architecture and Construction, 28 German Titov St., Penza, 440028, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 7553-3901, E-mail shein-ai@yandex.ru

Alexander N. Bykov, Postgraduate Student, Penza State University of Architecture and Construction, 28 Germana Titova St., Penza, 440028, Russian Federation.

Anna V. Oshchepkova, Student, Penza State University of Architecture and Construction, 28 Germana Titova St., Penza, 440028, Russian Federation.

Процесс потепления климата сопровождается большим количеством тайфунов, ураганов и штормов. Увеличивается вероятность мощных техногенных воздействий. Поэтому вопрос противодействия сейсмическим, ветровым и техногенным нагрузкам для защиты зданий от разрушений очень актуален. Поиск способов решения этой проблемы и нахождение новых методов гашения колебаний и противодействия динамическим нагрузкам, которые были бы экономически выгодны и легки в массовом применении, является темой нижеприведенных научных работ. Современные технологические достижения и разработка новых наноматериалов открывают перспективные пути для совершенствования демпфирующих способностей вязкоупругих систем и расширения их функционала. Это дает возможность формировать демпфирующие жидкости с точно заданными, термостабильными вязкостными характеристиками.

В статье [1] выполнена оценка сейсмостойкости железобетонного каркаса, заполненного сборными модульными блоками, и предложена новая концепция сейсмоусиления с использованием сборных модульных блочных стен (PMBW) для устранения недостатков традиционных методов сейсмоусиления железобетонных каркасов, заполненных поперечными стенами, каменными стенами и сборными панелями. Метод сейсмоусиления с использованием PMBW максимально использует преимущества заводских модульных блоков, повышая конструктивность и целостность соединений между существующим каркасом и заполняющими его PMBW. Для железобетонных зданий с незащищенными конструктивными элементами, в которых преобладают сдвиговые разрушения, применение этого метода сейсмоусиления просто обеспечивает достаточную прочность. В статье [2] приведен анализ самоцентрирующихся качающихся систем для сейсмостойких строительных конструкций. В статье предоставлен обзор исследований систем раскачивания для зданий из различных материалов, включая сталь, бетон, кирпич и дерево, а также проанализированы предыдущие исследования. Целью исследования [3] является разработка пошаговой процедуры проектирования сейсмоусиления существующих стальных зданий на основе локальных мероприятий по усилению соединений и использования традиционных крестообразных распорок (X-CBF). Предложенная процедура применяется к существующему шестиэтажному стальному зданию, не соответствующему нормативным требованиям, которое находится в Неаполе (Италия). Для изучения эффективности предложенной процедуры проводится численный анализ. Полученные результаты показывают, что можно снизить на 25 % сопротивление и жесткость новых X-CBF, если укрепить соединения между балками и колоннами, чтобы они выдерживали прогиб соединенных балок. Сравнивается сейсмическая уязвимость построенных и модернизированных конструкций, а также количественно оценивается снижение сейсмического риска в соответствии с итальянскими рекомендациями по классификации рисков для конструкций. Оценивается изменение класса сейсмического риска в результате запланированных мероприятий, что подтверждает повышение сейсмостойкости для модернизированного здания. В статье [4] оценивается влияния ветра на сейсмоизолированное сверхвысотное здание на основе комплексного метода проектирования сейсмоизоляции. Согласно недавно опубликованному в Китае «Стандарту для сейсмоизоляции при проектировании зданий» (GB/T51408–2021), для проектирования сейсмоизоляции используется комплексный метод (ISIM), основанный на теории комплексного спектра реакции при наложении мод и комплексной полной квадратичной комбинации. ISIM и традиционные методы проектирования сейсмоизоляции сравниваются с точки зрения экономичности и безопасности. На основе действующих национальных норм предлагается подход к анализу воздействия ветра на сейсмоизолированные высотные здания. Устойчивость сейсмоизолирующего слоя к воздействию ветра рассматривается, когда периоды повторяемости ветровых нагрузок превышают 50-летнюю норму. Результаты исследования показывают, что ISIM значительно повышает сейсмостойкость сейсмоизолированных зданий, кроме того, этот метод экономичен. Проблема дискомфорта при ветровых колебаниях наблюдается на верхних этажах сейсмоизолированных

высотных зданий, где сложнее обеспечить комфорт при ветровой нагрузке с периодом повторяемости 1 год по сравнению с ветровыми нагрузками с периодами повторяемости 5 и 10 лет соответственно. При проектировании сейсмоизолированных высотных зданий в будущем необходимо учитывать возможные неблагоприятные последствия кумулятивной остаточной деформации, вызванной ветром, для сейсмоизоляции. Younes Achaoü в статье [5] показал, что заглубленные в почву конструкции (фундаменты, подземные уровни зданий и т.д.) в ближайшем будущем смогут напрямую воздействовать на само сейсмическое возмущение, действующее в основании зданий. С помощью численных моделей демонстрируется эффект от заглубленного устройства, состоящего из резонирующих железных сфер. Эта способность устройства фильтровать частоты открывает широкие возможности для применения в области взаимодействия грунта и конструкции (ISS), особенно если фундаменты спроектированы как для обеспечения несущей способности, так и в качестве локальных резонансных элементов. В работе [6] показан метод вязкостного демпфирования с использованием рамных домкратов для эффективного снижения сейсмической реакции диспетчерских вышек аэропортов. Предлагается новый подход, определяемый как вязкостный демпфер с рамным домкратом (FJ-EVD). Разработана механическая модель с заданными свойствами усиления деформации FJ-EVD, после чего была построена конструкция башенного типа, оснащенная FJ-EVD. Для изучения преимуществ снижения вибрации при сейсмических воздействиях, характеризующихся различными частотными составляющими, был проведен нелинейный анализ во временной области и параметрическое исследование.

В статьях авторов [7, 8] рассматривалась работа ленточно-тросового гасителя колебаний с программной и практической точки зрения. В трудах [9–11] анализировалась работа реактивных гасителей при сейсмических нагрузках. При этом для решения исходных систем уравнений движения применялись прямые шаговые методы. В исследовании [12] разбирается методика построения, упрощения, а также аналитического и численного решений системы дифференциальных уравнений движения при кинематическом возбуждении колебаний. В статье [13] приведены вывод соотношений МКЭ для композитного стержня с пластическими накладками и иллюстрации гашения колебаний плоских и пространственных стальных стержневых систем. При этом практическая борьба с развитием колебаний осуществляется при помощи алюминиевых полосовых накладок — устройств гашения колебаний пассивного типа: генераторов моментов сопротивления движению для гашения и низкочастотных и высокочастотных колебаний. Показано, что данная система гашения работает на всем спектре колебаний.

В данной работе ставится задача построить и численно апробировать алгоритм поиска безопасного включения колонн и балок в работу пространственной демпфирующей гидравлической системы связи – железобетонный каркас здания за счет снижения уровня размахов колебаний каркаса.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для предохранения зданий и сооружений от разрушений в сейсмически опасных районах необходимо применять меры сейсмической защиты. В качестве защитных устройств можно использовать пассивные и активные гасители колебаний. Для малоэтажных каркасов промышленных зданий в качестве эффективных средств защиты могут применяться перекрестные системы связей в виде ленточно-тросовых систем с гидроцилиндрами одностороннего действия или трубчатых систем с гидроцилиндрами двухстороннего действия. Для демпфирования колебаний железобетонных каркасов предлагается новый способ демпфирования колебаний как результат применения трех систем тросовых связей, оборудованных гидроцилиндрами одностороннего действия. Эти три отдельных системы демпфирования в сумме образуют интегральную пространственную систему снижения уровня колебаний железобетонного каркаса производственного здания. Построим алгоритм поиска безопасного включения колонн и балок

в работу демпфирующей системы связи – каркас за счет снижения уровня размахов колебаний каркаса. При вариации сопротивления движению, преднатяжения, предельного хода поршней и/или параметров колонн и балок можно подобрать оптимальные для данных возмущений коэффициенты сопротивления движению, ход поршней в демпферах и механические характеристики колонн и балок.

Конструкцию железобетонных промышленных зданий можно представить совокупностью поперечных и продольных рам, конструкций покрытия (фермы или балки) и плит или панелей покрытия.

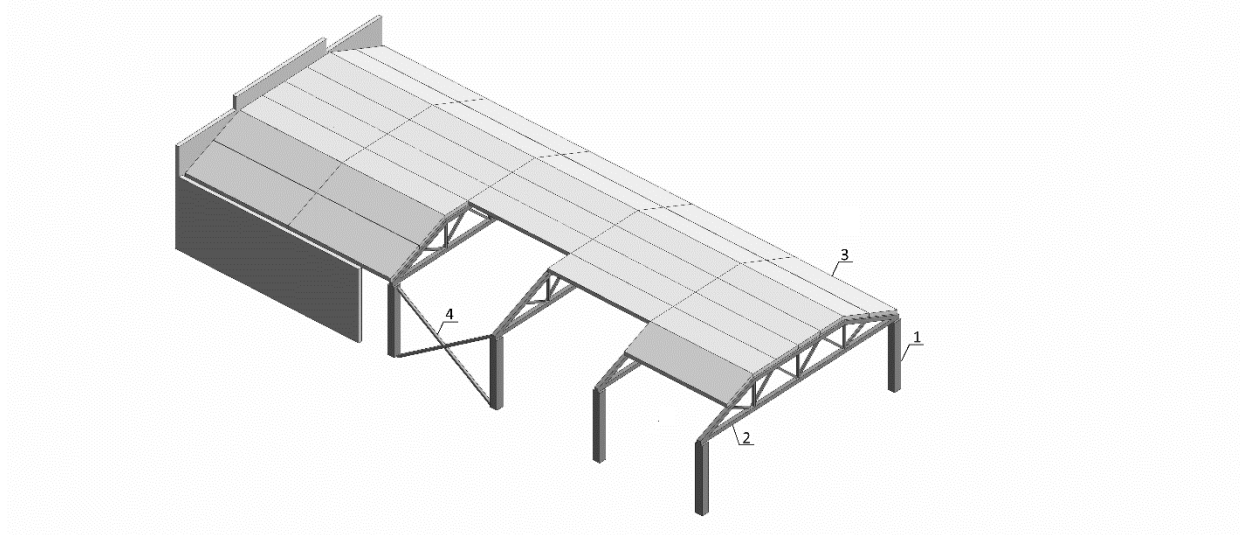


Рис. 1. Общий вид железобетонного каркаса:

1 — колонна; 2 — балка или ферма; 3 — плиты покрытия; 4 — стальные связи

Fig. 1. General view of reinforced concrete framed structure:

1 — column; 2 — beam or truss; 3 — roof slabs; 4 — steel braces

Для противодействия продольным нагрузкам, таким как ветровые или крановые, поперечные рамы соединяются вертикальными связями, обеспечивающими пространственную жесткость. Эти связи выполнялись в виде перекрестных стержневых систем для противодействия смещениям каркаса в продольном направлении. Сейсмические воздействия можно представить трехмерной акселерограммой, которую можно ориентировать относительно каркаса цеха вдоль, поперек и по вертикали. При сейсмических воздействиях, когда волна распространяется вдоль здания, эти связи сталкиваются с критическими воздействиями инерционных сил. Значительные инерционные силы, возникающие в массивном покрытии, передаются как на несущие вертикальные элементы каркаса (вызывая сжатие с изгибом), так и на сами связи (растяжение – сжатие). Проблема заключается в том, что стандартные стальные перекрестные связи, повсеместно применяемые в строительстве, не способны выдержать эти нагрузки. Сжатые связи быстро теряют устойчивость, что приводит к перераспределению усилий на растянутые связи. При сильных землетрясениях эти растягивающие напряжения могут превысить предел прочности материала, вызывая разрыв связей. Последствия этого катастрофичны: амплитуда колебаний здания резко возрастает, создавая высокий риск обрушения. Попытка усилить связи за счет увеличения их сечения также не решает проблему, поскольку это может привести к разрушению железобетонных колонн в местах крепления из-за сдвиговых эффектов. В направлении, перпендикулярном цеху, сопротивление сейсмическим волнам обеспечивается исключительно жесткостью узлов поперечных рам, а по вертикали — жесткостью типовых ферм или балок, что далеко не всегда гарантирует необходимую прочность и устойчивость.

В регионах с сейсмической активностью для обеспечения безопасной работы конструкций производственных цехов предлагается использовать три системы демпфирующих связей: систему продольных перекрестных связей, включающую два тросовых демпфера с гидроцилиндрами одностороннего действия; систему поперечных связей, также включающую два тросовых демпфера с гидроцилиндрами одностороннего действия; систему связей-затяжек для демпфирования вертикальных колебаний каждой фермы (балки), оснащаемую одним гидроцилиндром. При сейсмических воздействиях в растягивающихся элементах перекрестной системы будет происходить натяжение тросов, что приведет к выдвиганию штоков гидроцилиндров, сопровождающихся значительными усилиями. В свою очередь, сжимающиеся элементы будут способствовать ослаблению натяжения тросов и втягиванию штоков гидроцилиндров за счет действия возвратной пружины. Энергия колебаний будет эффективно рассеиваться в рабочих полостях гидроцилиндров и в элементах, подверженных упругопластическому изгибу. Ход гидроцилиндров необходимо ограничивать, чтобы при достижении предельных отклонений колонн или ферм демпферы переходили в режим работы ограничителя. Принцип действия одностороннего гидроцилиндра в данной системе заключается в следующем: усилие, передаваемое от натянутого троса на шток, нагнетает давление рабочей жидкости в гидроцилиндре, вытесняя ее в дополнительную полость. Таким образом, усилие создается только в одном направлении (рабочий ход). Возврат поршня в исходное положение осуществляется под действием возвратной пружины, которая затягивает жидкость из дополнительной полости через вспомогательный клапан. Эта особенность делает поршневые гидроцилиндры одностороннего действия оптимальными для систем управления колебательными движениями.

Для оценки эффективности предлагаемой системы связей рассмотрена рама промышленного однопролетного каркаса с двумя рядами колонн продольного направления и со связями, расположенными в среднем пролете (рис. 1). Несущие элементы — железобетонные колонны и двухскатные железобетонные балки, верхние узлы крепления — шарнирные. Сооружение подвергалось сейсмическому нагружению, которое имитировалось акселерограммой или гармоническим движением опорных узлов сооружения. Расчетная схема изображена на рис. 2.

Для восприятия инерционных сил, действующих *вдоль цеха*, и гашения колебаний устанавливается перекрестная вертикальная ленточно-тросовая система гашения колебаний с гидроцилиндрами одностороннего действия (рис. 3). В качестве несущих элементов вертикальных связей используются канаты, где несущая способность канатов, помимо высокого предела прочности на растяжение, дополнительно подстраховывается ходом поршня гидроцилиндра. Рассмотрим движение каркаса под воздействием вектора пространственной (трехмерной) системы переносных ускорений $\ddot{\Delta}$. Полагая, что переносное движение осуществляется вдоль цеха, будем максимальное горизонтальное ускорение $\ddot{\Delta}$ ориентировать вдоль линии колонн каркаса.

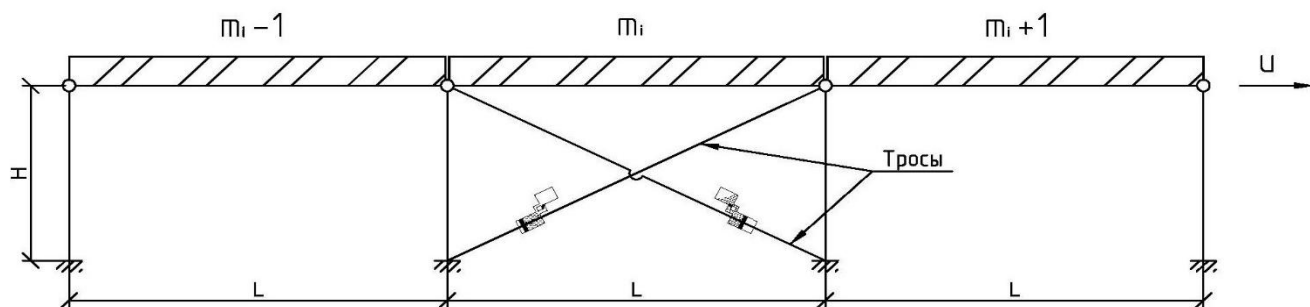


Рис. 2. Продольный разрез промышленного каркаса
Fig. 2. Longitudinal section of the industrial framed structure

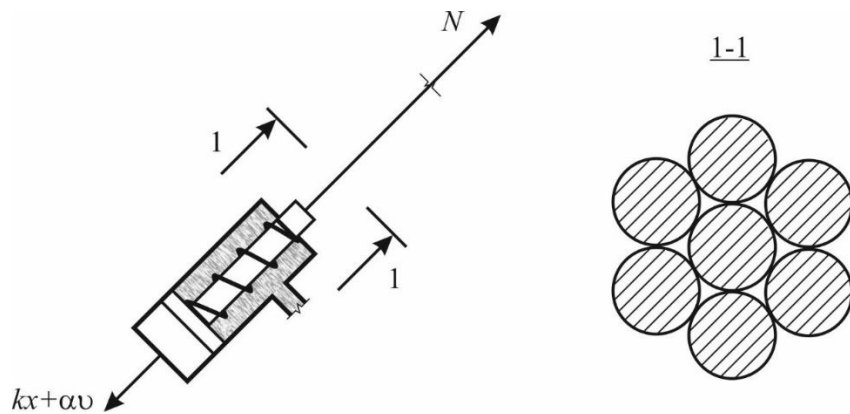


Рис. 3. К расчету гасителя. Гидроцилиндр и сечение троса

Fig. 3. Scheme for damper calculation. Hydraulic cylinder and cable section

Для подбора параметров гидроцилиндра построена аппроксимирующая модель железобетонной рамной системы с перекрестными связями. Данную систему перекрестных связей можно представить простой моделью, показанной на рис. 4.

Будем полагать, что горизонтальная составляющая переносного ускорения, в силу большой длины и скорости волны, одновременно воздействует на все колонны каркаса. Горизонтальные перемещения узлов покрытия из-за значительной жесткости диска покрытия практически одинаковы. Поэтому расчетную схему каркаса на действие горизонтальных переносных воздействий можно представить одной, работающей из плоскости фермы, колонной, эквивалентной ряду колонн жесткости с массой, равной массе диска покрытия с грузовой полосы, эквивалентной по ширине грузовой полосе для определения статической нагрузки на колонну.

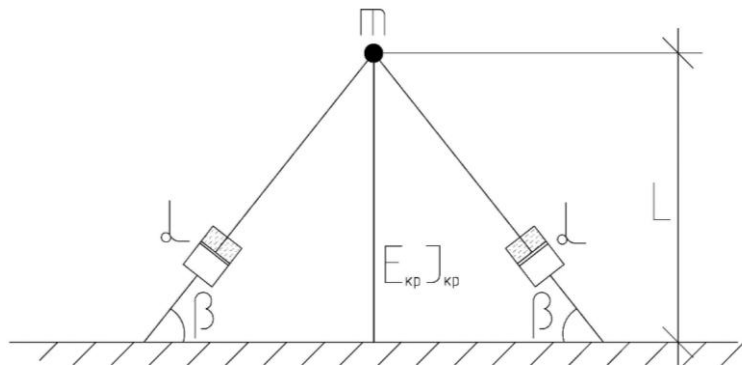


Рис. 4. Эквивалентная модель рамы с тросовыми связями

Fig. 4. Equivalent model of the frame with cable braces

Сила сопротивления движению, возникающая в гидроцилиндре демпфера:

$$B_i \dot{U}_i = \alpha_i \begin{bmatrix} (c_1 c_1)_i & (c_1 c_2)_i & (c_1 c_3)_i & -(c_1 c_1)_i & -(c_1 c_2)_i & -(c_1 c_3)_i \\ (c_2 c_1)_i & (c_2 c_2)_i & (c_2 c_3)_i & -(c_2 c_1)_i & -(c_2 c_2)_i & -(c_2 c_3)_i \\ (c_3 c_1)_i & (c_3 c_2)_i & (c_3 c_3)_i & -(c_3 c_1)_i & -(c_3 c_2)_i & -(c_3 c_3)_i \\ -(c_1 c_1)_i & -(c_1 c_2)_i & -(c_1 c_3)_i & (c_1 c_1)_i & (c_1 c_2)_i & (c_1 c_3)_i \\ -(c_2 c_1)_i & -(c_2 c_2)_i & -(c_2 c_3)_i & (c_2 c_1)_i & (c_2 c_2)_i & (c_2 c_3)_i \\ -(c_3 c_1)_i & -(c_3 c_2)_i & -(c_3 c_3)_i & (c_3 c_1)_i & (c_3 c_2)_i & (c_3 c_3)_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{u}_{1,i} \\ \dot{u}_{2,i} \\ \dot{u}_{3,i} \\ \dot{u}_{4,i} \\ \dot{u}_{5,i} \\ \dot{u}_{6,i} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где α_i — коэффициент сопротивления движению жидкости гидроцилиндра; c_j — косинус угла наклона троса к оси j ; $\dot{u}_{n,i}$ — скорость движения узла i в направлении n .

Введем обозначение:

$$C_i = \begin{bmatrix} (c_1c_1)_i & (c_1c_2)_i & (c_1c_3)_i & -(c_1c_1)_i & -(c_1c_2)_i & -(c_1c_3)_i \\ (c_2c_1)_i & (c_2c_2)_i & (c_2c_3)_i & -(c_2c_1)_i & -(c_2c_2)_i & -(c_2c_3)_i \\ (c_3c_1)_i & (c_3c_2)_i & (c_3c_3)_i & -(c_3c_1)_i & -(c_3c_2)_i & -(c_3c_3)_i \\ -(c_1c_1)_i & -(c_1c_2)_i & -(c_1c_3)_i & (c_1c_1)_i & (c_1c_2)_i & (c_1c_3)_i \\ -(c_2c_1)_i & -(c_2c_2)_i & -(c_2c_3)_i & (c_2c_1)_i & (c_2c_2)_i & (c_2c_3)_i \\ -(c_3c_1)_i & -(c_3c_2)_i & -(c_3c_3)_i & (c_3c_1)_i & (c_3c_2)_i & (c_3c_3)_i \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где C_i — матрица преобразования наклонных усилий в тросе и пружине к глобальной системе координат. Тогда сила упругости в пружине гидроцилиндра:

$$\hat{K}_i U_i = k_i C_i U_i, \quad (3)$$

где $\hat{K}_i$ — матрица жесткости пружины; k_i — жесткость возвратной пружины; $U_i = [u_{1,i} \ u_{2,i} \ u_{3,i} \ u_{4,i} \ u_{5,i} \ u_{6,i}]^T$ — вектор линейных перемещений узлов крепления троса. А сила сопротивления движению демпфера:

$$B_i \dot{U}_i = \alpha_i C_i \dot{U}_i. \quad (4)$$

Матрица жесткости шарнирно опертого стержня:

$$k_i = \frac{EA_i}{l_i} \begin{bmatrix} (c_1c_1)_i & (c_1c_2)_i & (c_1c_3)_i & -(c_1c_1)_i & -(c_1c_2)_i & -(c_1c_3)_i \\ (c_2c_1)_i & (c_2c_2)_i & (c_2c_3)_i & -(c_2c_1)_i & -(c_2c_2)_i & -(c_2c_3)_i \\ (c_3c_1)_i & (c_3c_2)_i & (c_3c_3)_i & -(c_3c_1)_i & -(c_3c_2)_i & -(c_3c_3)_i \\ -(c_1c_1)_i & -(c_1c_2)_i & -(c_1c_3)_i & (c_1c_1)_i & (c_1c_2)_i & (c_1c_3)_i \\ -(c_2c_1)_i & -(c_2c_2)_i & -(c_2c_3)_i & (c_2c_1)_i & (c_2c_2)_i & (c_2c_3)_i \\ -(c_3c_1)_i & -(c_3c_2)_i & -(c_3c_3)_i & (c_3c_1)_i & (c_3c_2)_i & (c_3c_3)_i \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где A_i — площадь сечения i -го троса.

Приведенная жесткость колонны из плоскости фермы может быть определена из соотношения:

$$E_{np} I = \sum_{i=1}^N E_{np,i} I_i, \quad (6)$$

где E_{np} — приведенные модули упругости железобетонных колонн ряда; I_i — приведенные моменты инерции этих колонн; N — количество колонн ряда.

Приведенный модуль упругости железобетона для колонны вычисляем по формуле:

$$E_{np} = E_a \cdot \mu + E_b \cdot (1-\mu), \quad (7)$$

где E_a — модуль упругости арматуры; E_b — модуль упругости бетона; μ — доля армирования сечения.

Приведенный момент инерции определяем:

$$I_{red} = I + I_s \cdot a + I'_s \cdot a, \quad (8)$$

где I — момент инерции бетонного сечения; I_s, I'_s — моменты инерции площадей растянутой и сжатой арматуры относительно центра тяжести приведенного сечения;

$$a = \frac{E_s}{E_b}, \quad (9)$$

где a — коэффициент приведения.

Решение дифференциального уравнения движения демпфируемой системы позволяет определить максимальные горизонтальные перемещения диска покрытия и соответствующую данному коэффициенту сопротивления движению отклоняющую силу и проверить управляющую колонну на жесткость и срез. Решение уравнения движения массы, приведенной на колонну:

$$m\ddot{U} + B\dot{U} + KU = -m\ddot{\Delta}, \quad (10)$$

ищем прямым методом — методом Ньюмарка или методом центральных разностей.

Организуя цикл решений с измененным сопротивлением движению и/или параметрами колонн, можно подобрать оптимальный для данных возмущений коэффициент сопротивления движению и параметры колонн для изгиба из плоскости.

Сила, вызывающая горизонтальное перемещение управляющей колонны, может быть определена из соотношения:

$$\delta_{11}F = u_{\max}. \quad (11)$$

При действии постоянных и временных длительных и кратковременных нагрузок прогиб железобетонных колонн не должен превышать $1/75$ вылета консоли, т.е.:

$$u_{\max} \leq L/75, \quad (12)$$

где L — высота колонн.

Если это условие удовлетворяется — находим соответствующую поперечную силу в управляющей колонне:

$$Q_d = u_{\max}/(\delta_{11}N). \quad (13)$$

Расчет железобетонных элементов по наклонным сечениям на действие поперечных сил для элементов постоянной высоты сечения, армированных хомутами, нормальными к оси элемента, выполним по наклонному сечению из условия:

$$Q = Q_b + Q_{sw}, \quad (14)$$

где Q — поперечная сила в наклонном сечении с длиной проекции s от внешних сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого наклонного сечения, при нагрузке, приложенной к боковой грани элемента;

Q_b — поперечная сила, воспринимаемая бетоном в наклонном сечении;

Q_{sw} — поперечная сила, воспринимаемая хомутами в наклонном сечении.

$$Q = (1,5R_{bt}bh^2)/c + 0,75R_{sw}A_{sw}c/S_w, \quad (15)$$

где параметр c подбирается в границах:

$$h_0 \leq c \leq 2h_0,$$

так чтобы значение Q было минимальным, где R_{bt} , b , h — прочность бетона и размеры сечения колонны; R_{sw} , A_{sw} , S_w — прочность, площадь сечения и шаг хомутов поперечной арматуры.

Если $Q_d \leq Q$, то увеличиваем сопротивление движению или сечение (армирование) колонн и повторяем расчет. Целесообразно одновременно выполнить проверку прогиба колонн из плоскости ферм.

Если $Q_d \leq Q$ и условие для границ выполняется — заканчиваем расчет. Параметры колонн и коэффициент сопротивления движению гидроцилиндров определены.

После снятия кинематического возмущения система аperiodически закончит движение:

$$u = e^{-nt} (u_0 e^{\sqrt{n^2 - \omega_0^2}t} + (u'_0 + nu_0) e^{-\sqrt{n^2 - \omega_0^2}t}). \quad (16)$$

Расчет каркаса в поперечном направлении. Похожим образом производим расчет колонны в плоскости балки (или фермы). Только колонна эквивалентной жесткости подсчитывается исходя из совокупности колонн поперечного направления (или работающих в плоскости балки). Тросовые, по сути, также перекрестные, связи с гидроцилиндрами (5, 6) устанавливаем к крайним колоннам поперечной плоской рамы. А вертикальные связи с гидроцилиндрами расположены подобно затяжкам, как показано на рис. 5.

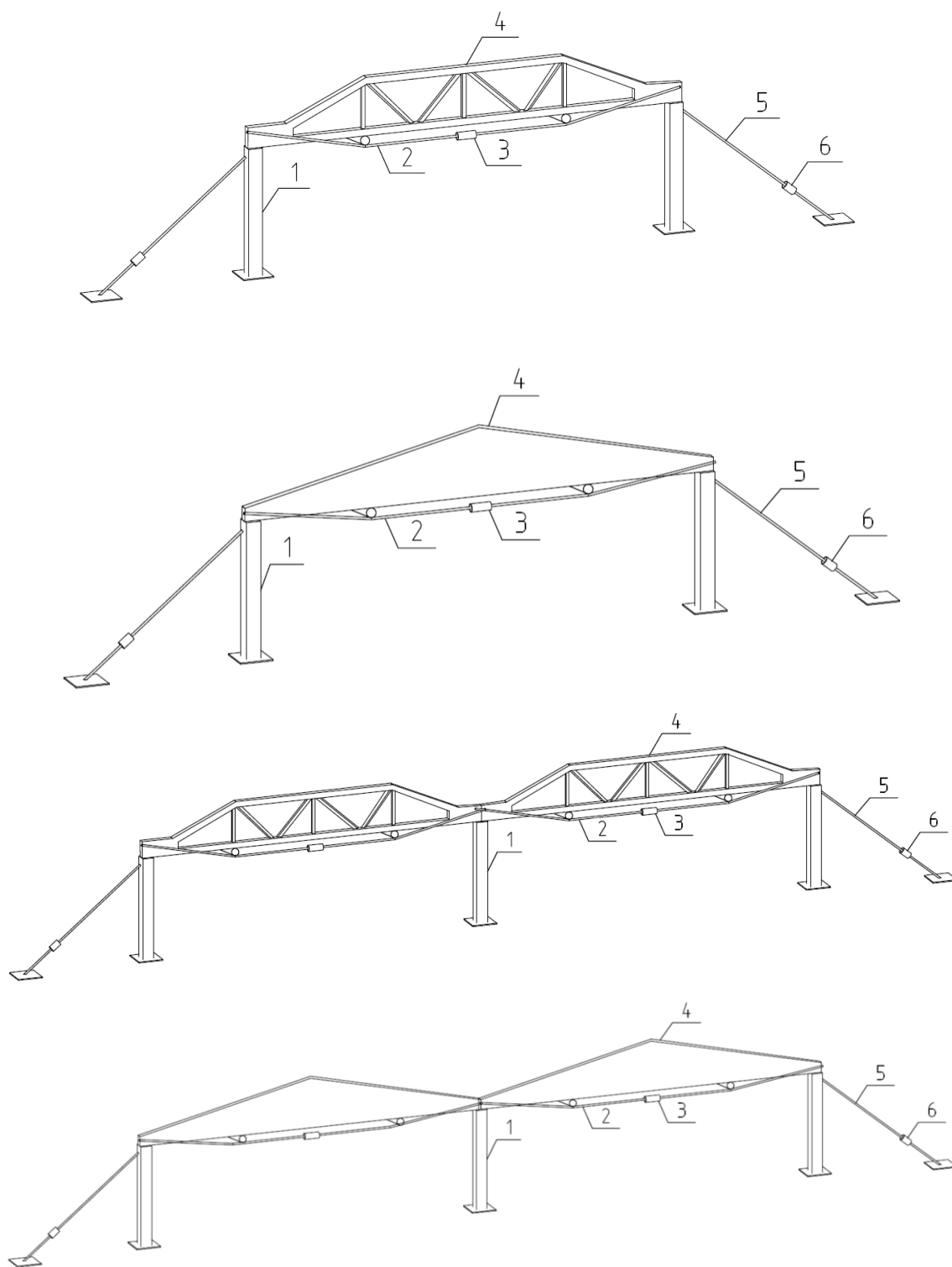


Рис. 5. Демпфирующие связи, устанавливаемые в поперечном и вертикальном направлениях
Fig. 5. Damping braces, installed in lateral and vertical directions

Расчет на вертикальную составляющую переносного движения. Балочная система испытывает значительные деформации и напряжения при возмущающих воздействиях от вертикальной составляющей акселерограммы переносного движения. Очевидно, что вертикальная составляющая оказывает влияние на каждую ферму (или балку) в отдельности и защищать от вертикальных сейсмических воздействий нужно каждую ферму (или балку) в плоскости

фермы. При этом можно использовать дополнительные тросовые связи, оборудованные гидроцилиндрами одностороннего действия. Расчет балок на вертикальную составляющую переносных ускорений проводим с использованием расчетной схемы вида рис. 6.

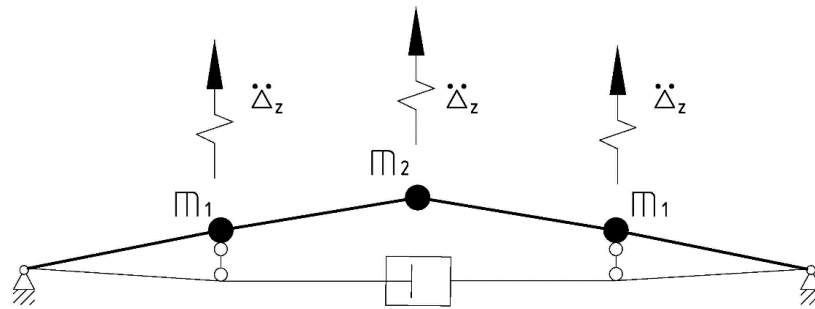


Рис. 6. Расчетная схема вертикального демпфирования балки
Fig. 6. Calculation scheme of the beam vertical damping

Что особенно важно: демпферы должны быть запроектированы так, чтобы они работали как связи с гидроцилиндрами, до тех пор, пока перемещения не достигают предельных значений. Это добивается длиной хода поршня. После этого тросовые связи жестко ограничивают перемещения, т.е. связи работают как ограничители.

Балка (или ферма), оборудованная тросовой системой с гидроцилиндром одностороннего действия в зависимости от величины вертикального перемещения и направления движения контрольных узлов, может находиться в одном из трех режимов работы (положительными считаются перемещения, направленные вверх от недеформированного состояния балки).

1. Движение вниз от положения статического равновесия при выполнении условий:

$$\left. \begin{aligned} f_k &\leq f_{st} \\ u_{k,t} &\leq u_{k,t-\Delta t} \end{aligned} \right\}. \quad (17, 18)$$

В этом случае работают гидроцилиндры, где f_k — вертикальное перемещение массы 1 (или 2); f_{st} — прогиб балки в положении статического равновесия.

2. Движение вверх (всегда) и движение вниз до положения статического равновесия, т.е. при:

$$u_{k,t} > u_{k,t-\Delta t}, \quad (19)$$

и/или

$$\left. \begin{aligned} u_{k,t} &\leq u_{k,t-\Delta t} \\ u_{k,t} &> f_{st} \end{aligned} \right\} \quad (20, 21)$$

— тросовая система с гидроцилиндрами не работает.

3. Движение вниз ниже предельно допустимого положения:

$$\left. \begin{aligned} u_{k,t} &\leq f_{st} \\ u_{k,t} &\leq u_{k,t-\Delta t} \\ u_{k,t} &\leq [u_k] \end{aligned} \right\}. \quad (22-24)$$

В этом случае тросовая система работает как ограничитель.

Таким образом, мы представили способ демпфирования колебаний на основе трех систем тросовых связей, оборудованных гидроцилиндрами одностороннего действия. Эти три отдельных системы демпфирования в сумме образуют интегральную систему снижения уровня колебаний пространственного железобетонного каркаса производственного здания.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Предложена теория и сформулированы практические рекомендации по установке и использованию новых пространственных гидравлических систем гашения колебаний — демпфирующих гидравлических систем вертикальных перекрестных связей колонн, а также связей, демпфирующих вертикальные колебания несущих конструкций покрытия. Эти системы образуют интегральный комплекс демпфирующих связей пространственного железобетонного каркаса здания. Создан научный и технологический задел для повышения безопасности железобетонных каркасов промышленных зданий и сооружений. Результаты исследования могут учитываться при реконструкции и проектировании зданий и сооружений в сейсмических районах России и других стран, а также при изучении раздела строительной механики «Динамика сооружений». Новые устройства гашения повышают живучесть, снижают риски аварий, повышают надежность и срок службы строительных конструкций промышленных каркасов зданий и сооружений, в том числе при чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показан алгоритм поиска безопасного включения колонн и балок в работу демпфируемой системы связи – каркас и снижения уровня колебаний каркаса.

2. Работоспособность и живучесть ленточно-тросовой системы связей с гидроцилиндрами одностороннего действия существенно выше обычной жесткой системы связей. Такая система связей позволяет полностью включить в работу собственные системы жесткости и, в то же время, предотвратить развитие колебаний механической системы.

3. Из цикла решений дифференциальных уравнений движения демпфируемой системы с изменениями сопротивления движению и/или параметров колонн подбираются оптимальные для данных возмущений коэффициент сопротивления движению и характеристики колонн и балок.

4. В работе предложена методика расчета механической безопасности конструкций и конструктивных систем зданий и сооружений при чрезвычайных ситуациях, особых и запроектных воздействиях, а именно:

- предложен и теоретически, и численно-экспериментально обоснован новый способ гашения колебаний пространственных железобетонных каркасов зданий и сооружений управляемой тросовой системой с гидроцилиндрами одностороннего действия, создающими дополнительные односторонние силовые воздействия на защищаемые узлы несущих конструкций, препятствующие колебательным движениям этих узлов. Использованы два принципиально новых эффекта тросово-гидроцилиндровой системы: преднатяжение и ограничение хода. Преднатяжение перекрестной тросовой системы направлено на обеспечение непрерывной работы гидроцилиндров. Ограничение хода позволяет превратить (при достижении предельных перемещений) демпфирующую гидравлическую систему в ограничитель.

Доказана возможность применения при строительстве железобетонных каркасов управляемых тросовых защитных систем гашения колебаний как систем односторонних связей с переменными периодическими силами сопротивления движению, отличающихся от известных систем гашения повышенной демпфирующей способностью и технико-экономической эффективностью по стоимости и трудоемкости изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jung J.-S., Kwak C.-S., Lom W.-Y., Lee K.-S. Seismic capacity evaluation of a reinforced concrete frame infilled with precast modular block wall for enhancing the horizontal load // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 97. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224025294>

2. Mohammad Froozanfar M., Moradi S., Kianoush R., Speicher M.S., Sarno L.D. Review of self-centering rocking systems for earthquake-resistant building structures: State of the art // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 84. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022400175X>
3. Milone A., Tartaglia R., D'Aniello M., Landolfo R. Seismic upgrade of a non-code compliant multi-storey steel building : a case study // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 95. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224017194>
4. Tan J., Tan P., Wu J., Feng D. Evaluation of wind-induced effect on seismically isolated super high-rise building based on integrated seismic isolation design method : a case study // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 76. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223014559>
5. Achaoui Y., Ungureanu B., Enoch S., Brûlé S., Guenneau S. Seismic waves damping with arrays of inertial resonators // *Extreme Mechanics Letters*. 2016. Vol. 8. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352431616300281>
6. Yang K., Xu Z., Ma Y., Wu M., Zhao Z., Luo C. Frame jack-enhanced viscous damping approach for efficient seismic response mitigation of airport control towers // *Structures*. 2024. Vol. 66. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012424010117>
7. Шейн А.И., Чуманов А.В., Монахов В.А. Ленточная система гашения колебаний для закрытых куполов // *Региональная архитектура и строительство*. 2021. № 1 (46). С. 122–129.
8. Шейн А.И., Чуманов А.В., Земцова О.Г. Определение параметров ленточно-тросового гасителя с торсионом или гидроцилиндром одностороннего действия // *Региональная архитектура и строительство*. 2023. № 2 (55). С. 69–76.
9. Шейн А.И., Шмелев Д.А. Оценка эффективности активного жидкостного гасителя колебаний высотных сооружений при нестационарных воздействиях // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2014. № 1.
10. Shein A., Zemtsova O., Chumanov A., Frolov M. Damping vibrations of a hyperbolic cooling tower using a reactive damper // *Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies EMMFT 2023 : E3S Web of Conferences*. 2023. Vol. 458. DOI: 10.1051/e3sconf/202345808014
11. Shein A.I., Zaitsev M.B., Tamrazyan A.G., Matseevich T.A. Damping of seismic vibrations of towers using a controlled reactive dampener // *Journal of Structural Engineering*. 2023. Vol. 50. No. 3. Pp. 177–183.
12. Shein A. Equations of motion of the system “structure – reactive vibration dampener” // *E3S Web of Conferences*. 2024. Vol. 549. P. 01006.
13. Шейн А.И., Чуманов А.В., Зайцев М.Б. Три новых способа гашения колебаний зданий и сооружений // *Региональная архитектура и строительство*. 2024. № 3 (60). С. 81–89.

REFERENCES

1. Jung J.-S., Kwak C.-S., Lom W.-Y., Lee K.-S. Seismic capacity evaluation of a reinforced concrete frame infilled with precast modular block wall for enhancing the horizontal load. *Journal of Building Engineering*. 2024; 97. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224025294>
2. Mohammad Froozanfar M., Moradi S., Kianoush R., Speicher M.S., Sarno L.D. Review of self-centering rocking systems for earthquake-resistant building structures: State of the art. *Journal of Building Engineering*. 2024; 84. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235271022400175X>
3. Milone A., Tartaglia R., D'Aniello M., Landolfo R. Seismic upgrade of a non-code compliant multi-storey steel building : a case study. *Journal of Building Engineering*. 2024; 95. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224017194>
4. Tan J., Tan P., Wu J., Feng D. Evaluation of wind-induced effect on seismically isolated super high-rise building based on integrated seismic isolation design method : a case study. *Journal of Building Engineering*. 2023; 76. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223014559>
5. Achaoui Yu., Ungureanu B., Enoch S., Brûlé S., Guenneau S. Seismic waves damping with arrays of inertial resonators. *Extreme Mechanics Letters*. 2016; 8. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352431616300281>
6. Yang K., Xu Z., Ma Y., Wu M., Zhao Z., Luo C. Frame jack-enhanced viscous damping approach for efficient seismic response mitigation of airport control towers. *Structures*. 2024; 66. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352012424010117>
7. Shein A.I., Chumanov A.V., Monakhov V.A. Tape vibration damping system for closed domes. *Regional Architecture and Construction*. 2021; 1(46):122-129. (in Russian).
8. Shein A.I., Chumanov A.V., Zemtsova O.G. Determination of parameters of a belt-cable damper with a torsion bar or a single-acting hydraulic cylinder. *Regional Architecture and Construction*. 2023; 2(55):69-76. (in Russian).
9. Shein A.I., Shmelev D.A. Evaluation of the effectiveness of an active liquid vibration damper for high-rise buildings under non-stationary loads. *Structural Mechanics and Calculation of Structures*. 2014; 1. (in Russian).

10. Shein A., Zemtsova O., Chumanov A., Frolov M. Damping vibrations of a hyperbolic cooling tower using a reactive damper. *Energy Management of Municipal Facilities and Environmental Technologies EMMFT 2023 : E3S Web of Conferences* . 2023; 458. DOI: 10.1051/e3sconf/202345808014
11. Shein A.I., Zaitsev M.B., Tamrazyan A.G., Matseevich T.A. Damping of seismic vibrations of towers using a controlled reactive dampener. *Journal of Structural Engineering*. 2023; 50(3):177-183.
12. Shein A. Equations of motion of the system “structure – reactive vibration dampener”. *E3S Web of Conferences*. 2024; 549:01006.
13. Shein A.I., Chumanov A.V., Zaitsev M.B. Three new methods of vibration damping of buildings and structures. *Regional Architecture and Construction*. 2024; 3(60):81-89. (in Russian).