УДК 69.032.22+699.841
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-8-205-212

ОБ ОДНОМ ИННОВАЦИОННОМ КОНСТРУКТИВНОМ РЕШЕНИИ СИСТЕМЫ ГАШЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

В.С. Семенов

Аннотация. Дан анализ инженерных решений, обеспечивающих сейсмостойкость и комфортные условия эксплуатации небоскрёба One Rincon Hill (Сан-Франциско, США). Рассмотрена комплексная система защиты здания от динамических воздействий, сочетающая настраиваемые жидкостные демпферы (tuned liquid dampers), аутригеры и специальные энергопоглощающие элементы ((buckling restrained braces). Описаны принципы работы демпфирующих устройств и их вклад в снижение ускорений и перемещений здания. На примере проектных решений One Rincon Hill продемонстрированы современные подходы к проектированию высотных зданий в районах с высокой сейсмической активностью и больших ветровых нагрузок. Полученные выводы применимы при разработке конструктивных решений высотных зданий.

*Ключевые слова***:** высотные здания; сейсмостойкость; гашение колебаний; настраиваемые жидкостные демпферы; аутригерные конструкции; связи с контролируемым смятием; инновационные конструктивные решения.

ЖОГОРКУ КАБАТТУУ ИМАРАТТАРДАГЫ ТИТИРӨӨНҮ БАСАҢДАТУУ СИСТЕМАСЫ ҮЧҮН ИННОВАЦИЯЛЫК КОНСТРУКТИВДИК ЧЕЧИМИ ЖӨНҮНДӨ

В.С. Семенов

Аннотация. Макалада One Rincon Hill (Сан-Франциско, АКШ) асман тиреген имаратынын сейсмотуруктуулугун жана комфорттуу эксплуатациялоо шарттарын камсыз кылуучу инженердик чечимдерге талдоо жүргүзүлгөн. Жөнгө салынуучу суюктук демпферлерин, аутригерлерди жана атайын энергия сиңирүүчү элементтерди айкалыштырган, имаратты динамикалык таасирлерден коргоонун комплекстүү системасы каралган. Демпфирлөөчү түзүлүштөрдүн иштөө принциптери жана алардын имараттын тездетүүлөрүн жана жылыштарын азайтууга кошкон салымы сыпатталган. One Rincon Hill объектисинин долбоордук чечимдеринин мисалында сейсмикалык активдүүлүгү жогору жана шамал жүктөмдөрү чоң аймактарда бийик имараттарды долбоорлоонун заманбап ыкмалары көрсөтүлгөн. Алынган корутундулар бийик имараттардын конструктивдик чечимдерин иштеп чыгууда колдонулушу мүмкүн.

Түйүндүү сөздөр: бийик имараттар; сейсмотуруктуулук; термелүүлөрдү басуу; жөнгө салынуучу суюктук демпферлери; аутригердик конструкциялар; көзөмөлдөнүүчү ийилүүчү байланыштар; инновациялык конструктивдик чечимдер.

ON AN INNOVATIVE DESIGN SOLUTION FOR A VIBRATION DAMPING SYSTEM IN HIGH-RISE BUILDINGS

V.S. Semenov

Abstract. This article analyzes the engineering solutions that ensure the seismic resistance and comfortable operating conditions of the One Rincon Hill skyscraper (San Francisco, USA). It examines a comprehensive system for protecting the building from dynamic loads, combining tuned liquid dampers, outriggers, and special energy-dissipating elements (buckling-restrained braces). The principles of operation of the damping devices and their contribution to reducing the building's accelerations and displacements are described. Using the One Rincon Hill project as an example, modern

approaches to the design of high-rise buildings in areas with high seismic activity and high wind loads are demonstrated. The conclusions drawn are applicable to the development of structural solutions for high-rise buildings.

Keywords: high-rise buildings; seismic resistance; vibration damping; tuned liquid dampers; outrigger structures; buckling-restrained braces; innovative structural solutions.

Введение. При проектировании небоскрёбов в районах с высокой сейсмической активностью и сильными ветровыми нагрузками, инженеры сталкиваются с комплексом взаимосвязанных проблем, требующих комплексного подхода к их решению. Эти проблемы связаны не только с обеспечением прочности и надежности высотных зданий при воздействии экстремальных внешних факторов, но и с созданием комфортных условий эксплуатации, связанных, прежде всего, со снижением уровня колебаний. Решение этих проблем требует применения современных материалов, инновационных конструктивных решений, а также тесного взаимодействия инженеров и архитекторов.

Примером такого взаимодействия и служит жилой комплекс One Rincon Hill в Сан-Франциско (США) (рисунок 1).

Общая информация о проекте. Комплекс состоит из двух башен (Южной и Северной) и общего подиума с таунхаусами (рисунок 1). Южная башня (South Tower) была завершена в 2008 году, она насчитывает 61 этаж и высоту 195 метров. Северная башня (The Harrison, 165 м**,** 55 этажей), была достроена в 2014 году [1, 2].

Ключевые участники проекта:

- Застройщик: Urban West Associates.
- Архитекторы: Solomon Cordwell Buenz.
- Конструктивное решение: Magnusson Klemencic Associates.

Особенности района строительства. Город Сан-Франциско расположен в зоне высокой сейсмической активности (вблизи разломов Сан-Андреас и Хейворд) и значительных ветровых нагрузок. Комплекс построен на холме высотой около 30 м. Из за сложного рельефа здание визуально «вырастает» над окружением и становится заметным ориентиром в городской застройке. Грунт основания, на который передается нагрузка от зданий – серпентинит (достаточно прочная скальная порода, образованная несколькими минералами в результате процесса серпентинизации – гидротермального изменения с участием воды) [3, 4].



Рисунок 1 – Общий вид
жилого комплекса One Rincon Hill

Суть инновационного решения Южной башни – ***интегрированная система гашения колебаний*** [5, 6], сочетающая (рисунок 2):

- аутригерные конструкции (на двух уровнях);
- настроенные жидкостные демпферы ((tuned liquid dampers**,** TLD);
- связи с контролируемым смятием (Buckling Restrained Brace);
- преднапряженные вертикальные стальные тросы внутри монолитного железобетонного ядра.

Разберём каждый конструктивный элемент подробнее. Сначала общее конструктивное решение

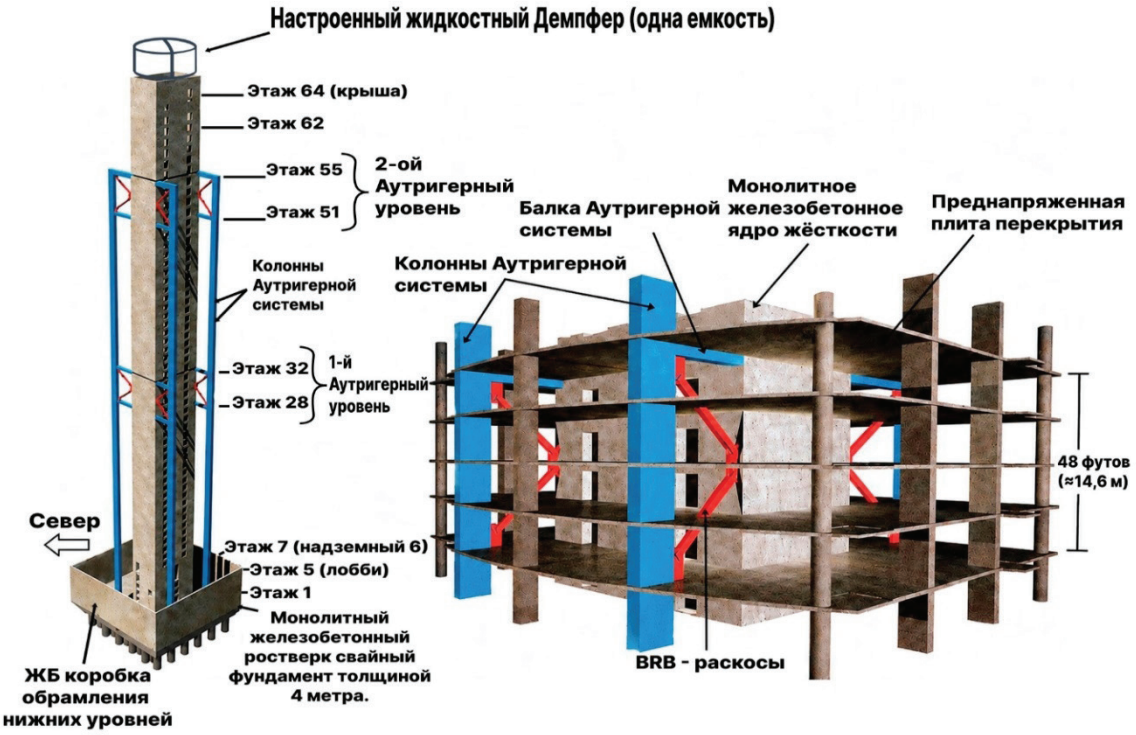


Рисунок 2 – Конструктивное решение Южной башни One Rincon Hill
(на рисунке не отображены натянутые внутри ядра стальные тросы)

1. Центральное монолитное железобетонное ядро жесткости. Монолитная конструкция из высокопрочного бетона выполняет роль основного вертикального несущего элемента здания – ядра, в котором размещены:

- лифтовые шахты;
- эвакуационные лестницы;
- инженерные коммуникации;
- вертикальные преднапряженные стальные тросы (являются частью комбинированной системы гашения колебаний).

2. Аутригерная система на двух уровнях (см. рисунок 2) включает горизонтальные *стальные балки*, *V-образные BRBраскосы* (*Buckling Restrained Brace* – связевый раскос с защитой от потери устойчивости) и *четыре аутригерные колонны*. К аутригерной системе можно отнести и монолитные железобетонные плиты перекрытий четырех этажей, связывающие центральное ядро жесткости с периметральными колоннами. На рисунке 2 BRB-раскосы выделены красным.

3. *Установленный на крыше настроенный жидкостный демпфер* (tuned liquid damper**)** – резервуар с водой весом примерно 160 т.

4. *Периметральные колонны.* Стальные и железобетонные колонны по периметру служат, в основном, для устройства панорамного остекления фасада.

5. *Свайно-ростверковый фундамент.* Основа – 42 буронабивные сваи, которые были заглублены в коренную породу (серпентинит). Между собой сваи связаны железобетонной плитой-ростверком толщиной около 4-х метров. Ростверк не только объединяет сваи в единую конструкцию, но и равномерно распределяет колоссальную нагрузку от надземной части здания на сваи и на основание.

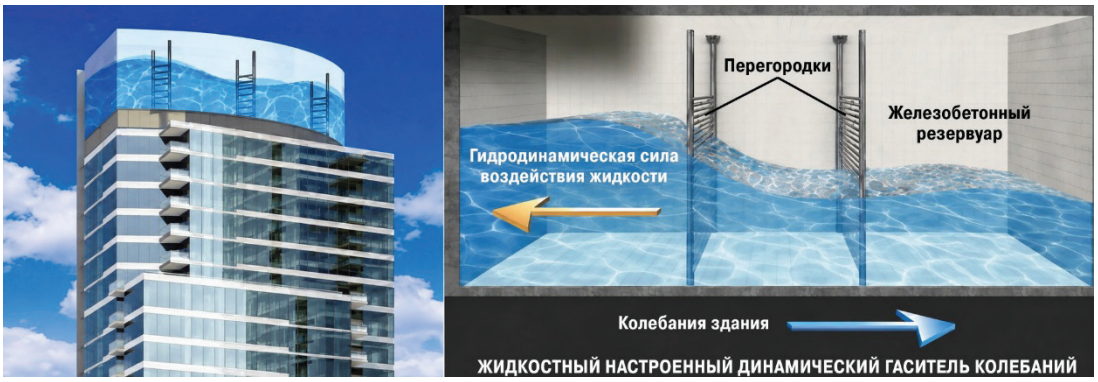


Рисунок 3 – Конструктивное решение TLD

Теперь о главных элементах системы гашения колебаний подробнее.

Настраиваемые жидкостные демпферы (TLD). В иностранной технической литературе также встречается термин *настраиваемые жидкостные массовые демпферы* (*Tuned Liquid Mass Dampers* – TLMD). В этом термине подчеркивается, что одним из элементов такого демпфера служит масса жидкости в резервуаре.

Конструктивное решение установленного на крыше Южной башни One Rinco Hill настраиваемого жидкостного демпфера (TLD) показано на рисунке 3.

TLD (TLMD) – это пассивные системы гашения колебаний, представляющие собой установленные на крыше здания резервуары (прямоугольные или цилиндрические), частично заполненные жидкостью, обычно водой. Их ключевая особенность – способность рассеивать энергию колебаний здания за счет трения в пограничном слое жидкости, турбулентности на свободной поверхности и разбивания волн.

Краткая справка. С 1950-х годов жидкостные демпферы используются для стабилизации качки морских судов и для подавления колебаний спутников. В конце 1970-х годов технология TLD начала применяться и в гражданском строительстве для уменьшения колебаний конструкций [7, 8].

В основе работы LTD лежит инерционный сдвиг массы воды (физически это ключевое решение): при ускорении резервуара (от ветра или землетрясения) масса воды из-за сил инерции «отстаёт» от основной массы, создавая смещённый центр тяжести и опрокидывающий момент. При этом на свободной поверхности возникают крутые волны, сильные удары о стенки, брызги, возможна локальная кавитация у кромки. В иностранной литературе такое движение жидкости называется *Sloshing*. Описанное выше поведение массы жидкости в противофазе движению здания и гасит его колебания (уменьшает амплитуду и перемещения).

Основные элементы жидкостного демпфера:

- *Резервуар*. Изготавливается из бетона или стали.
- *Рабочая жидкость*. Обычно это вода, но иногда используются и другие составы, например, с добавлением гликоля для предотвращения замерзания.
- *Вспомогательные элементы внутри резервуара – baffles (баффели)*. Для повышения эффективности гашения колебаний в ёмкости размещают небольшие препятствия: экраны, перегородки (баффы) или стойки. При колебаниях здания вода перетекает через эти препятствия или вокруг них, что за счёт сил сопротивления и инерции рассеивает энергию колебаний. Без *баффелей* жидкость в резервуаре при внешних воздействиях (например, при землетрясении или ветре) просто «болтается» — возникают гладкие свободные волны. Энергия этих волн частично рассеивается, но не так эффективно, как нужно. Баффели нарушают этот свободный поток: они создают зоны

турбулентности, заставляют жидкость двигаться более сложным образом, из-за чего часть кинетической энергии за счёт вязкостного трения превращается в тепловую. В итоге демпфер лучше поглощает вибрации конструкции, к которой он прикреплён.

Баффели могут быть разными:

- *Горизонтальные* – пластины, расположенные поперёк потока жидкости.
- *Вертикальные* – барьеры, идущие вдоль резервуара.
- *Вращающиеся* – в некоторых конструкциях баффели делают поворотными (вокруг вертикальной оси). Это даёт инженерный бонус: угол поворота можно регулировать, меняя, тем самым, характеристики демпфера (коэффициент демпфирования, частоту колебаний жидкости) и делая систему более адаптивной (так называемые variably tuned liquid dampers – VTLD).

Размеры резервуара и уровень заполнения (масса демпфера) подбираются так, чтобы собственная частота плескания жидкости совпадала с одной из собственных частот колебаний здания. Обычно 1–5 % от веса здания. В результате возникает резонанс, который усиливает плескание и гашение волн, что приводит к рассеиванию значительной части энергии колебаний самого здания [9, 10].

Аутригерные конструкции, включающие BRB-раскосы. Аутригеры – один из самых апробированных вариантов обеспечения общей устойчивости высотных зданий. Они представляют из себя мощные конструкции (пояса жёсткости), которые связывают ядро с периметральными колоннами (рисунки 4, 5). Такая горизонтальная пространственная конструктивная система при горизонтальных нагрузках от ветра или землетрясения передаёт опрокидывающий момент на наружные колонны [11, 12].

В результате: повышается общая изгибная жёсткость здания; уменьшаются горизонтальные перемещения; снижается риск прогрессирующего обрушения (если часть колонн пострадает, аутригеры помогут перераспределить нагрузку).

Ещё одна важная задача аутригеров – за счет уменьшения амплитуды колебаний они обеспечивают *динамический комфорт* (чтобы люди на верхних этажах здания не чувствовали сильного раскачивания) [13].

Важным элементом конструктивной системы именно Южной башни One Rincon Hill являются включенные в аутригерные уровни *BRB*-раскосы (рисунок 6). *BRB* (*Buckling-Restrained Brace*) – это стержень-распорка, предназначенная для гашения колебаний под воздействием экстремальных нагрузок, например, при землетрясении. Конструкция BRB-раскосов показана на рисунке 6 [14, 15].

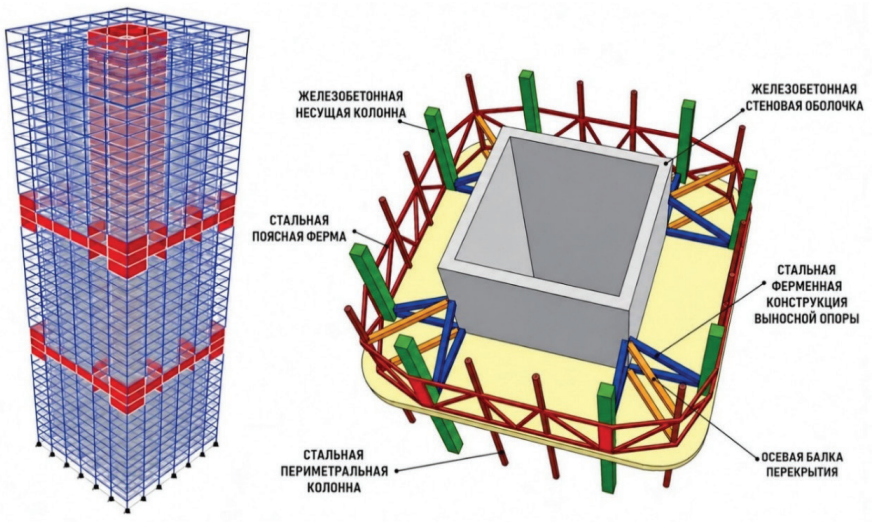


Рисунок 4 – Принципиальное конструктивное решение аутригерной системы высотного здания



Рисунок 5 – Конструктивные элементы аутригерной системы
(балки, стойки, раскосы-демпферы) [12]



Рисунок 6 – Конструктивное решение BRB-раскоса

Каждый стержень состоит из четырех основных частей (см. рисунок 6):

1. ***Стального сердечника*** – элемента, который принимает на себя продольные (сжимающие или растягивающие) усилия. Он спроектирован так, чтобы пластически деформироваться в средней части при расчётном землетрясении, сохраняя при этом жёсткость на концевых участках.
2. ***Внешнего кожуха*** – обычно это стальная труба, которая обеспечивает боковую поддержку сердечнику, не давая ему согнуться при сжатии.
3. ***Разделительного слоя*** (*restrainer* – ограничитель) – материала, который расположен между сердечником и кожухом. Он предотвращает потерю устойчивости (продольный изгиб) стального сердечника при его сжатии. В классических BRB кожух – это стальная труба, заполненная бетоном.
4. ***Специально спроектированного зазора,*** обеспечивающего его свободную деформацию (удлинение или сжатие) средней части сердечника без создания нагрузки на разделительный слой и кожух

Принцип работы *BRB* основан на контролируемой пластической деформации. При расчетном сейсмическом воздействии стальной сердечник внутри BRB «уходит в пластику», поглощая энергию толчка, но при этом благодаря разделительному слою не теряет устойчивости [16].

В США изготовлением *BRB* занимается компания *Star Seismic.* Она специализируется на разработке индивидуальных инженерных решений для сложных проектов. Вот некоторые из технологических особенностей их *BRB*:

- ***Материал сердечника.*** Star Seismic изготавливает сердечники из прутковой стали (Bar Stock), а не вырезает их из листовой стали, что сокращает сроки поставки изделия.
- ***Модульная конструкция.*** Для крупных элементов система позволяет устанавливать до четырёх сердечников, соединяя их общей концевой пластиной и запатентованным воротником (collar), что повышает надёжность.
- ***Варианты соединений.*** Компания предлагает *BRB* с шарнирными (*Pinned, Powercat™),* сварными (*Welded, Wildcat™)* и болтовыми соединениями [17].

Исторический контекст. Хотя концепция BRB была разработана в Японии компанией Nippon Steel в конце 1980-х годов, именно американские компании, такие как Star Seismic, внесли значительный вклад в её развитие и популяризацию на международном рынке. Первое применение BRB в США состоялось в 1999 году [18].

Системы с *BRB* используются в самых разных объектах: от высотных жилых и коммерческих зданий до промышленных сооружений и мостов. Они особенно востребованы в сейсмически активных регионах, таких как США, Япония, Тайвань, Китай и Новая Зеландия.

Эффективность общего конструктивного решения Южной башни, данные испытаний

В 2014 году комплекс прошёл «естественное тестирование» во время землетрясения в Напа (магнитуда 6,0). Результаты мониторинга [19]:

- горизонтальное смещение верха башни были в пределах допустимых;
- ускорение было ниже расчётного;
- повреждений несущих конструкций не зафиксировано;
- жильцы отметили лишь лёгкое покачивание, сравнимое с движением лифта.

Заключение. Проект One Rincon Hill подтвердил эффективность интегрированной системы сейсмозащиты, сочетающей монолитное железобетонное ядро, настраиваемые жидкостные демпферы, аутригеры с BRB-раскосами и свайный фундамент. Башня прошла сертификацию по методике PEER, показав полное соответствие требованию *Immediate Occupancy* – пригодности к эксплуатации сразу после землетрясения [20–22].

PEER = Pacific Earthquake Engineering Research Center (Тихоокеанский исследовательский центр по сейсмостойкому строительству) при Калифорнийском университете в Беркли. «Методика PEER» используется для оценки вероятности повреждений и отказов при разных уровнях землетрясения, и как это влияет на стоимость и эксплуатацию здания [21].

Перспективы развития технологий высотного сейсмостойкого строительства.

Успех проекта One Rincon Hill стимулировал развитие смежных конструктивных решений. В частности, в Японии уже тестируются *адаптивные демпферы* с датчиками ИИ. Ученые ряда стран изучают *композитные материалы для аутригеров* (что позволит снизить их вес на 15–20 %). В перспективе можно предположить *интеграцию конструктивных систем (в том числе систем гашения колебаний), с «умными» системами здания»:* управлением климатом, мониторингом конструкций и инженерных систем, пожарной безопасностью и др.

В Кыргызстане пока нет опыта проектирования и строительства высотных зданий с использованием жидкостных демпферов и BRB-связей, хотя возведение небоскребов в последние годы набирает темпы. При этом важно отметить, что в республике накоплен достаточно большой опыт строительств зданий с другими типами систем сейсмозащиты, в том числе с различными системами сейсмоизоляции [22].

Описанные выше конструктивные решения Южной башни жилого комплекса One Rincon Hill демонстрируют современные подходы к проектированию высотных зданий в районах с высокой сейсмической активностью и большими ветровыми нагрузками, которые могут быть использованы при проектировании высотных зданий в районах с аналогичными природно-климатическими условиями.

Поступила: 03.08.2026; рецензирована: 17.08.2026; принята: 18.08.2026.

Литература

1. One Rincon Hill South Tower. URL: https://buildingsdb.com/CA/san-francisco/one-rincon-hill-south-tower/ (дата обращения: 26.05.2026).
2. One Rincon Hill. URL:https://en.wikipedia.org/wiki/One_Rincon_Hill (дата обращения: 26.05.2026).
3. One Rincon Hill, San Francisco. Engineering Urban Living. URL:https://www.cbengineers.com/project/one-rincon-hill/ (дата обращения: 26.05.2026).
4. One Rincon Hill // SCB. URL: https://scb.com/project/one-rincon-hill/ (дата обращения: 26.05.2026).
5. *Huang Y., Celebi M., Todorovska M.I.* One Rincon Hill Tower Structural System // ResearchGate. 2012. URL: https://www.researchgate.net/figure/One-Rincon-Hill-Tower-structural-system-Huang-et-al-2012_fig2_326464492 (дата обращения: 26.05.2026).
6. Solving Wind, Seismic Problems at One Rincon Hill // Building Design + Construction. URL: https://www.bdcnetwork.com/home/article/55145003/solving-wind-seismic-problems-at-one-rincon-hill (дата обращения: 26.05.2026).
7. How Multiple Tuned Liquid Dampers Work & Why You Should Care / Motioneering. URL: https://www.motioneering.com/articles/mtld-basics (дата обращения: 26.05.2026).
8. One Rincon tower features water tank on top to counteract wind // SF Gate. URL: https://www.sfgate.com/realestate/article/one-rincon-tower-water-tank-15876432.php (дата обращения: 26.05.2026).
9. Elbrolosy Abdo. Tuned liquid dampers. URL: https://www.academia.edu/19808187/Tuned_liquid_dampers (дата обращения: 26.05.2026).
10. Tuned Liquid Dampers in High Rise Structures // Jetir.org. URL: https://www.jetir.org/papers/JETIR2104456.pdf (дата обращения: 26.05.2026).
11. A comprehensive introduction to outrigger and belt-truss system in skyscrapers // ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/ (дата обращения: 31.07.2026).
12. Outrigger Structural System for High-Rise Building // The Constructor.org. URL: https://theconstructor.org/structural-engg/outriggers-high-rise-building/247964/ (дата обращения: 31.07.2026).
13. Outrigger Systems – Supporting Soaring Skyscrapers // Civilenggblitz.com. URL: https://civilenggblitz.com/outrigger-systems/ (дата обращения: 26.05.2026).
14. Buckling-restrained brace. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Buckling-restrained_brace (дата обращения: 26.07.2026).
15. Buckling-Restrained Brace: History, Design and Applications // ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/323447846_Buckling-Restrained_Brace_History_Design_and_Applications (дата обращения: 30.07.2026).
16. Buckling Restrained Braces (BRB) – A Review // IRJET. URL: ttps://www.irjet.net/archives/V4/i3/IRJET-V4I3603.pdf (дата обращения: 30.07.2026).
17. *Иванова П.В.* Усиливающие стержни, устойчивые к продольному изгибу (BRBF) с неприлипаемыми связями, применяемые для защиты зданий при сейсмическом воздействии / П.В. Иванова // Строительство и техногенная безопасность. 2017. № 9 (61). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/usilivayuschie-sterzhni-ustoychivye-k-prodolnomu-izgibu-brbf-c-neprilipaemymi-svyazyami-primenyaemye-dlya-zaschity-zdaniy-pri (дата обращения: 30.07.2026).
18. *Robinson K.S.* Advances in design requirements for Buckling Restrained Braced frames. 2014 NZSEE Conference. URL: https://db.nzsee.org.nz/2014/oral/11_Robinson.pdf (дата обращения: 30.07.2026).
19. *Robinson K.* Buckling restrained braces standatrds developments and innovative. URL: https://scnz.org/wp-content/uploads/2020/11/buckling-restrained-braces-standards-developments-and-innovative-applications-Robinson-min.pdf (дата обращения: 31.07.2026).
20. Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER). PEER Publications // PEER. URL: https://peer.berkeley.edu/peer-publications (дата обращения: 31.07.2026).
21. *Gunay S., & Mosalam Kh*. Performance Based Earthquake Engineering Methodology, Revisited. // ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/263064093_PEER_Performance-Based_Earthquake_Engineering_Methodology_Revisited (дата обращения: 31.07.2026).
22. *Семенов В.С.* Пассивные системы сейсмозащиты на основе сухого трения. Исторический аспект / Семенов В.С. // Вестник КРСУ. Бишкек, 2025. Т. 25. № 12. С. 165–171.