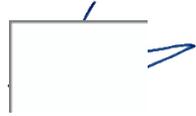


На правах рукописи



Свитлик Илья Владимирович

**СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ
СТВОЛЬНО-ПОДВЕСНОЙ СИСТЕМЫ В РАЙОНАХ
ВЫСОКОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ**

Специальность 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Белаш Татьяна Александровна
- Официальные оппоненты: **Белостоцкий Александр Михайлович**,
доктор технических наук, профессор,
академик РААСН, ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», кафедра «Строительные конструкции, здания и сооружения», профессор;
- Бузало Нина Александровна**,
кандидат технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Южно-Российский Государственный Политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», кафедра «Градостроительство, проектирование зданий и сооружений», профессор.
- Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».**

Защита состоится 27 февраля 2025 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.01 федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4, зал заседаний диссертационных советов (аудитория №220 главного корпуса). Тел./Факс: 8 (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте: <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/svitlik-ilya-vladimirovich>

Автореферат разослан «26» декабря 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Попов Владимир Мирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. С увеличением численности населения в городах, ограниченностью доступных участков строительства и их увеличивающейся стоимостью всё большую популярность приобретают высотные здания. Ствольная несущая система является наиболее надёжной конструктивной системой, что обосновывается практикой её использования. Ствольно-подвесная система является одним из возможных способов её реализации. Данная система была успешно применена во многих высотных зданиях, широко распространившись в зарубежных странах, в частности в сейсмически активных районах. В России ствольно-подвесная система нашла ограниченное применение, поскольку не разработаны рекомендации по её применению, а также отсутствуют сведения об особенностях её поведения в условиях сейсмического воздействия. Последние исследования, посвящённые ствольной несущей системе высотных зданий, относятся к 80–90-м годам 20-го века, однако данная система обладает рядом важных преимуществ по сравнению с другими. Эта система отличается значительной гибкостью и податливостью конструкций, что приводит к увеличению периода собственных колебаний до одной секунды, тем самым снижая сейсмическую нагрузку на несущие элементы. Кроме того, в ствольной конструктивной системе, реализованной в виде подвесных конструкций, определённая часть конструкций во время сейсмического воздействия может играть существенную роль в процессе гашения колебаний, тем самым повышая сейсмостойкость этого здания. Однако сложность конструктивной реализации и отсутствие методических рекомендаций по проектированию и расчёту ствольно-подвесной системы ограничивают возможности дальнейшего использования и разработки таких систем.

Степень разработанности темы исследования. Вопрос об обеспечении сейсмостойкости зданий ствольно-подвесного типа нашёл отражение в работах Н.Н. Складнева, W. Cao, Y. Nakamura, C. Wang, Y. Liu, Y. Gao, H. Mahmoud, Т.Н. Азизова, А. Massumi, Z. Ye, W. Cai, Q. He и др. Авторами данных работ преимущественно освещён вопрос о снижении отклика зданий с подвесными конструкциями на сейсмическое воздействие без оценки влияния динамических воздействий другого рода на безопасность таких сооружений.

Предложения по конструктивному исполнению сейсмостойких ствольно-подвесных зданий представлены в работах И.Л. Корчинского, Г.Г. Семенца, Г.Ш. Чануквадзе, Г.М. Острикова, Размадзе А.Н., Е.П. Дубровы, В.И. Щербины, Ж.Б. Байнатовы, Б.П. Таланова, П.И. Остроменского, Г.Ф. Пеньковского и др., однако существующие решения отличаются сложностью исполнения и низкой степенью сопротивляемости сейсмическим воздействиям, а также отсутствием рекомендаций по их проектированию и расчёту.

В связи с этим целью исследования является изучение особенностей поведения высотных зданий ствольной системы с подвесными конструкциями во время сейсмического воздействия, выявление перспективных возможностей повышения их сейсмостойкости за счёт улучшения и усовершенствования существующих конструктивных решений с разработкой рекомендаций по проектированию и расчёту этих систем.

Задачи исследования:

1. Анализ состояния вопроса, выявление особенностей существующих объёмно-планировочных и конструктивных решений высотных зданий ствольной системы, в том числе построенных в сейсмических районах.

2. Расчётно-теоретическое обоснование выбора ствольно-подвесной системы в качестве основного конструктивного решения ствольной системы для сейсмически активных районов.

3. Изучение особенностей поведения высотных зданий ствольно-подвесной системы в районах с сейсмическими воздействиями с разработкой конструктивных предложений по её усовершенствованию.

4. Проведение исследования сейсмостойкости высотных зданий ствольно-подвесной системы с предложенным конструктивным решением с учётом сложного характера сейсмического воздействия, включая влияние частотного состава и интенсивности.

5. Оценка эффективности предложенных конструктивных решений для зданий ствольно-подвесной системы с учётом различных условий эксплуатации.

Объектом исследования являются высотные здания ствольно-подвесной системы, расположенные в сейсмически активных районах.

Предмет исследования – оценка сейсмостойкости строительных конструкций высотных зданий ствольно-подвесной системы с учётом различных условий её эксплуатации.

Научная новизна результатов исследования заключается в следующем:

1. Подтверждена сейсмостойкость высотных зданий ствольно-подвесной системы, обеспеченная гибкостью их конструкций, установлено, что при землетрясениях с выраженной низкочастотной составляющей в этих зданиях возникают недопустимые смещения, вызванные колебаниями основания с большой амплитудой.

2. Предложены и обоснованы технические решения, вводимые в подвесные конструкции высотного здания в виде амортизаторов, включающихся и выключающихся связей, дополнительных элементов, различных соединений подвешенных перекрытий со стволом жёсткости, обеспечивающие прочность и устойчивость здания во время сейсмических воздействий.

3. Установлено, что динамическое гашение колебаний, обеспеченное изменением массы подвешенных верхних этажей и жёсткости их крепления к стволу, способствует повышению сейсмостойкости высотных зданий ствольно-подвесной системы.

4. Доказана способность функционирования высотных зданий с предложенными конструктивными решениями при наличии в основании грунтов с различными свойствами, при ветровом воздействии, влияющем на комфортность нахождения людей в здании, а также при локальном обрушении конструкций.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в обосновании возможности применения зданий ствольно-подвесной системы в сейсмических районах. Показана важная роль подвешенных верхних этажей в снижении колебаний здания во время землетрясения и повышении его сейсмостойкости.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что усовершенствованы известные и предложены новые типы конструктивных решений, позволяющие обосновать эффективность применения высотных зданий ствольно-подвесной системы, а также обеспечить гарантию безопасности нахождения в них людей во время землетрясения. Полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего развития нормативной базы по проектированию таких зданий в сейсмических районах.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач было проведено численное моделирование с применением метода конечных элементов. Проведён анализ напряжённо-деформированного состояния строительных конструкций на основе пространственных расчётных динамических моделей при сейсмических воздействиях, а также других динамических нагрузках.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты численного анализа сейсмостойкости высотных зданий ствольно-подвесной системы в зависимости от различного частотного состава и интенсивности сейсмического воздействия.

2. Усовершенствованы известные и разработаны новые конструктивные решения высотных сейсмостойких зданий ствольно-подвесного типа.

3. Обоснование необходимости учёта подвешенных этажей в зданиях ствольно-подвесной системы в качестве элементов дополнительного демпфирования сейсмических колебаний.

4. Методология многофакторного обоснования сейсмостойкости строительных конструкций зданий ствольно-подвесной системы с учётом ветровой нагрузки, свойств грунтовых оснований и влияния прогрессирующего обрушения.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности ВАК 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения и относится к п. 6 «Научное обоснование прогнозирования нагрузок и воздействий на строительные конструкции, здания и сооружения на стадиях их создания, эксплуатации и реконструкции»; п. 8 «Разработка новых и совершенствование рациональных типов несущих и ограждающих конструкций, конструктивных решений зданий и сооружений с учетом протекающих в них процессов, природно-климатических условий, механической, пожарной и экологической безопасности».

Степень достоверности результатов исследований обоснована применением методологических принципов теории сейсмостойкости; подтверждена опытом прошлых землетрясений, а также сопоставлением результатов с имеющимися данными, полученными другими авторами по отдельным вопросам, рассмотренным в диссертации; обеспечена применением апробированных расчётных программ.

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты диссертационного исследования были представлены на следующих конференциях:

– International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (МРСРЕ-2021), г. Владимир, 2021 г.;

– XIV Российская национальная конференция по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием), г. Сочи, 2021 г.;

– Международная научно-техническая конференция "Строительство, архитектура и технологическая безопасность", г. Сочи, 2022 г.;

– LXXV Научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы современного строительства», г. Санкт-Петербург, 2022 г.;

– II Национальная (всероссийская) научно-техническая конференция «Перспективы современного строительства», г. Санкт-Петербург, 2024 г.;

– International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering (МРСРЕ-2024), г. Владимир, 2024 г.;

– XII Международная научная конференция «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения»), г. Москва, 2024 г.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 7 печатных работах, в том числе 3 статьи в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК, 2 статьи в журналах, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science, и 2 публикации, включённые в базу данных РИНЦ.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы используются ООО «СК-5» при разработке проектной и конструкторской документации сейсмозащитных устройств для обеспечения надёжности и безопасности эксплуатации уникальных объектов различного назначения в районах высокой сейсмической активности.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников из 97 наименований и приложения. Общий объём диссертации составляет 214 страниц машинописного текста, в том числе 177 рисунков и 44 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** выполнено обоснование актуальности диссертационной работы, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, а также приведены основные положения, составляющие научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы.

В **первой главе** выполнен анализ существующих конструктивных решений высотных зданий ствольной конструктивной системы, основанный на отечественных и зарубежных литературных источниках. Разработана классификация конструктивных систем высотных зданий с несущим стволом по способу передачи нагрузки от перекрытий к фундаменту. Для зданий со ствольно-подвесной (см. рис. 1), ствольно-консольной и смешанной конструктивной системой определены основные особенности объёмно-планировочных и конструктивных решений.

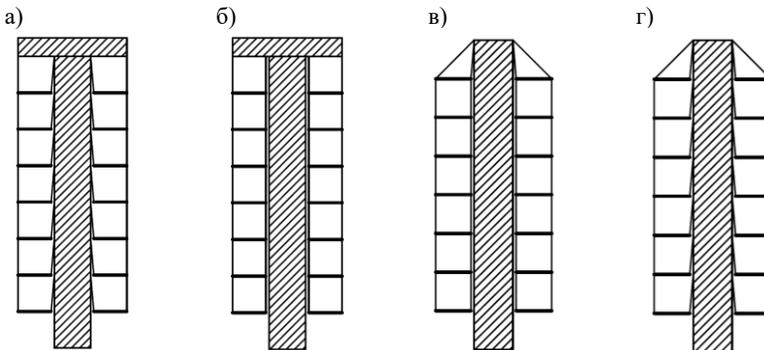


Рисунок 1 – Здания ствольно-подвесной конструктивной системы с передачей нагрузки от перекрытий на: а) ствол и консольный оголовок здания;

б) на консольный оголовок здания; в) на вершину ствола здания;

г) – на ствол здания в уровне каждого этажа

Анализ отечественных и зарубежных литературных источников, посвящённых применению ствольно-подвесных систем в строительстве, позволил сделать вывод о целесообразности применения ствольных конструктивных систем для высотных зданий, возводимых в районах с сейсмическими воздействиями. В большинстве рассматриваемых работ отмечено положительное влияние применения подвесных конструкций на устойчивость зданий к землетрясениям. Одной из главных особенностей высотных зданий ствольно-подвесной несущей системы при этом является устройство упруго-податливых связей между ядром здания и подвешенными элементами. Однако техническая сложность воплощения предложенных конструктивных решений, а также их потенциальная уязвимость к раскачке подвешенных конструкций не позволяет считать данные системы устойчивыми к землетрясениям.

Большинство исследований высотных зданий с несущим стволом направлено на решение вопросов по обеспечению сейсмостойкости зданий ствольно-подвесной конструктивной системы. Результаты исследований свидетельствуют об исключительной роли применения подвесных конструкций в снижении усилий в несущих элементах здания в условиях землетрясения. При этом вопрос об обеспечении устойчивости зданий с подвешенными конструкциями при прочих динамических воздействиях остаётся нерешённым, что не позволяет в полной мере оценить надёжность зданий с данной несущей системой.

Несмотря на значительный объём отечественных и зарубежных научных исследований в области, предметом которых является изучение сейсмостойкости зданий со ствольно-подвесной несущей системой, способы обеспечения сопротивляемости подобных зданий землетрясениям не сформулированы в качестве методических рекомендаций по проектированию. Поведение высотных зданий ствольного типа с подвесными конструкциями во время землетрясения требует дальнейшего изучения, что позволит выявить перспективные резервы повышения их надёжности и сейсмостойкости. Цель диссертационной работы определена на основе вышеизложенного.

Во **второй главе** представлены результаты исследования особенностей поведения высотных зданий ствольной системы при землетрясениях с различным частотном составе и интенсивности.

В качестве объекта моделирования было выбрано 16-этажное здание с несущим стволом. Наружный диаметр здания равен 38 м. Высота этажа составляет 3,3 м. Материал несущих конструкций ствола и ростверка здания – бетон марки В45. Конструкции перегородок и подвешенных плит перекрытий выполнены из бетона класса В30.

Сопряжения железобетонных элементов являются жёсткими. Элементы подвесок шарнирно примыкают к другим несущим конструкциям.

Для определения наиболее рационального и эффективного подхода к обеспечению сейсмостойкости высотных зданий с несущим стволом было построено 11 расчётных схем в соответствии с разработанной ранее классификацией, некоторые из них приведены на рисунке 2.

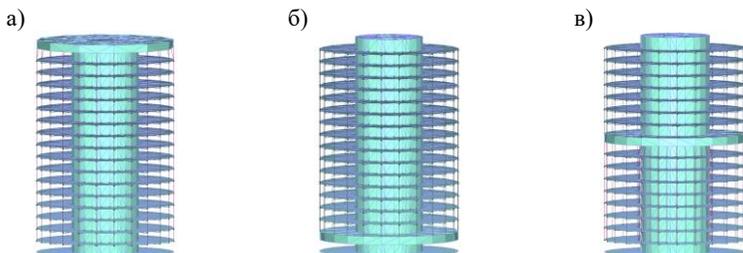


Рисунок 2 – Примеры расчётных моделей зданий, принятые в исследовании:

- а) ствольно-подвесной системы; б) ствольно-консольной системы;
в) смешанной системы

Выбраны следующие варианты исполнения зданий ствольно-подвесного типа: а – с подвеской перекрытий к оголовку, б – с подвеской перекрытий к стволу и оголовку, в – с подвеской перекрытий к вершине ствола, г – с подвеской перекрытий к стволу в уровне каждого этажа. Моделируемые консольно-подвесные здания делятся на типы: а – с подвешенными по периметру к вершине ствола консольными перекрытиями, б – с подвешенными к оголовку консольными перекрытиями, в – с подвеской и опиранием перекрытий на консольный ростерк в уровне средних этажей, г – с консольными ростерками в уровне верхних и нижних этажей, на которые подвешиваются и опираются перекрытия. Подобраны три варианта ствольно-консольных зданий: а – с консольным поясом в уровне нижних этажей, б – с консольными перекрытиями в уровне каждого этажа, в – с консолями высотой на этаж в уровне каждого второго этажа.

Стержневые железобетонные и стальные элементы состоят из универсальных конечных элементов пространственного стержня, элементы в виде пластин – из элементов тонкой оболочки. Всем подвескам был задан тип геометрически нелинейного конечного элемента «нить». На этом этапе исследования взаимодействие здания с основанием не учитывалось.

Для численного моделирования был выбран программный комплекс ЛИРА версии 10.12, который обеспечивает возможность получения данных о реакции конструкций на динамические воздействия и проведение расчётов во временной области в шаговой нелинейной постановке с использованием инструментальных трёхкомпонентных сейсмограмм.

Выполнен сравнительный анализ поведения зданий с различными конструктивными схемами при 5 землетрясениях широкого диапазона преобладающих частот и различной интенсивности. Смещения грунта приложены в качестве узловых нагрузок к основанию расчётных моделей.

Результатом численного моделирования являются данные о НДС конструкций. В качестве примера на рисунке 3 представлены диаграммы, отражающие деформации и усилия в элементах подвешенного здания типа а.

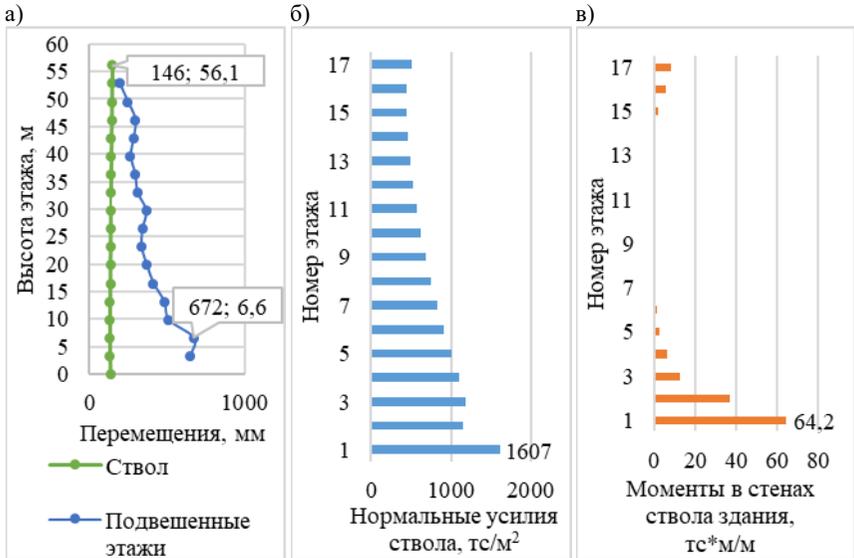


Рисунок 3 – Диаграммы НДС несущих конструкций ствольного-подвешенного здания типа А при землетрясении в горах св. Ильи, Аляска (1979 г.): а) максимальные перемещения; б) максимальные нормальные напряжения в стенах ствола; в) максимальные изгибающие моменты в стенах ствола

Сравнительный анализ поведения зданий при сейсмических воздействиях проведён путём оценивания значений параметров НДС по 10-балльной шкале. Разработанный алгоритм оценивания эффективности применения конструктивного решения здания заключается в сравнении значений одного из рассматриваемых параметров НДС в условиях каждого сейсмического воздействия. В пределах столбца, соответствующего одному землетрясению, наименьшему значению присваивалась наивысшая оценка, равная 10. Безразмерная оценка других значений является относительной и вычисляется по следующей формуле:

$$X_n = \frac{P_n}{P_{10}} \cdot 10, \quad (1)$$

где X_n – оценка значения параметра НДС для n -ой расчётной модели;

P_n – значение параметра НДС для n -ой расчётной модели;

P_{10} – наименьшее значение параметра НДС среди расчётных моделей.

Итоговая оценка значений каждого параметра НДС для рассматриваемого конструктивного решения вычисляется как среднее арифметическое его оценок при различных землетрясениях. Для примера в таблице 1 представлены результаты сопоставления перемещений несущих конструкций зданий.

Таблица 1 – Сравнительная оценка перемещений конструкций моделей

Схема	Вариант	Перемещения ствола, мм					Перемещения перекрытий, мм					Итог
		Фриули, 1976 г.	г. Алмирос, 1980 г.	г. Грива, 1990 г.	г. Ципци, 1999 г.	г. Св. Ильи, 1979 г.	Фриули, 1976 г.	г. Алмирос, 1980 г.	г. Грива, 1990 г.	г. Ципци, 1999 г.	г. Св. Ильи, 1979 г.	
Ствольно-подвесные	а	8,6	6,6	7,5	10,0	9,7	4,1	7,0	7,6	3,8	2,2	6,7
	б	10,0	5,6	6,5	10,0	10,0	4,7	5,7	9,2	2,9	2,8	6,7
	в	7,8	9,9	9,4	10,0	9,5	7,4	7,8	8,1	2,6	3,3	7,6
	г	8,8	10,0	10,0	10,0	9,8	7,7	6,7	9,9	2,9	3,3	7,9
Консольно-подвесные	а	7,2	5,3	5,1	10,0	9,1	9,1	6,8	7,6	10,0	10,0	8,0
	б	8,8	3,9	4,0	9,4	8,9	10,0	4,6	5,4	9,6	9,6	7,4
	в	8,1	7,0	6,6	9,8	9,2	6,0	8,1	8,6	2,0	2,2	6,8
	г	8,9	8,0	8,5	10,0	9,6	5,4	6,4	10,0	2,0	2,2	7,1
Ствольно-консольные	а	5,7	5,5	3,5	8,3	7,2	6,4	6,4	4,7	8,4	7,9	6,4
	б	6,9	6,2	3,6	9,3	8,2	7,8	7,2	4,8	9,6	8,9	7,3
	в	5,4	8,7	3,3	8,7	7,5	6,1	10,0	4,4	8,8	8,1	7,1

Итоговая оценка поведения зданий ствольного типа при различных сейсмических воздействиях является суммой оценок перемещений и ускорений конструкций, а также усилий в несущих стенах (см. табл. 2).

Таблица 2 – Итоговая сравнительная оценка поведения моделей

Схема	Вариант	Перемещения	Ускорения	Продольные усилия	Изгибающие моменты	Итог
Ствольно-подвесные	а	6,7	8,8	7,4	9,3	32,3
	б	6,7	8,0	7,2	9,4	31,4
	в	7,6	6,4	9,2	9,7	32,9
	г	7,9	7,2	10,0	9,6	34,7
Консольно-подвесные	а	8,0	6,5	6,5	8,5	29,5
	б	7,4	7,5	5,3	8,2	28,4
	в	6,8	7,5	7,5	6,6	28,4
	г	7,1	8,2	7,0	8,3	30,6
Ствольно-консольные	а	6,4	2,9	3,6	6,5	19,5
	б	7,3	3,2	4,1	5,9	20,5
	в	7,1	3,1	4,0	8,7	22,9

Предлагаемая методика оценивания эффективности применения конструктивного решения здания при землетрясении позволила систематизировать и сравнить многочисленные данные о НДС конструкций, полученные в ходе численного моделирования 11 зданий в условиях 5 сейсмических воздействий.

Были выявлены особенности поведения ствольных зданий различного исполнения при землетрясениях с различными характеристиками. Результаты численного моделирования подтверждают, что применение подвешенных конструкций положительно влияет на сейсмостойкость высотных зданий. Наилучшие результаты получены при воздействиях высокочастотного и низкочастотного характера. При этом подвешенные перекрытия получают значительные смещения от статичного положения при низкочастотных землетрясениях. Полученные данные свидетельствуют о необходимости разработки мер, устраняющих это негативное последствие.

В **третьей главе** представлены усовершенствованные конструктивные решения, обеспечивающие сейсмостойкость высотных зданий ствольно-подвесной системы. Предлагаемые конструктивные решения предполагают устройство подвешенного оголовка (см. рис. 4) и объединения подвешенных перекрытий в геометрически неизменяемые блоки этажей (см. рис. 5).

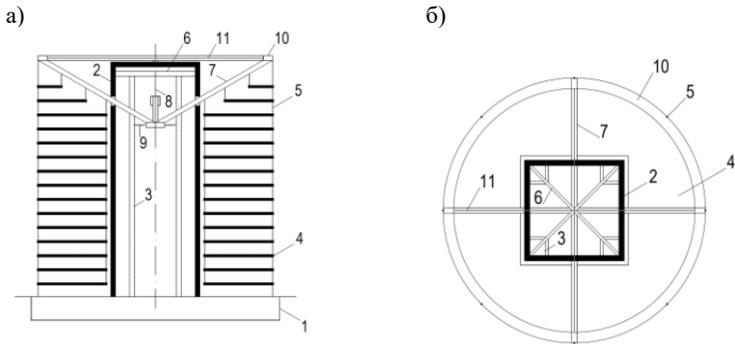


Рисунок 4 – Предлагаемое конструктивное решение здания с подвешенным оголовком: а) вертикальный разрез здания; б) план здания; 1 – фундамент; 2 – несущий ствол; 3 – лифтовые шахты; 4 – плиты перекрытий; 5 – подвески; 6 – балки; 7 – радиальные балки; 8 – тяж; 9 – амортизаторы; 10 – опорное кольцо; 11 – растяжки

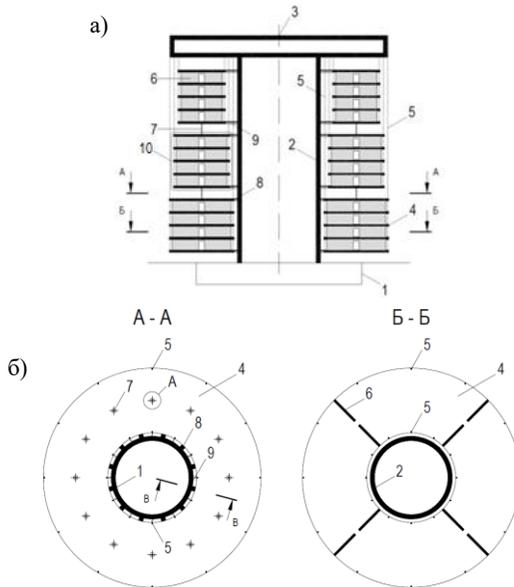


Рисунок 5 – Предлагаемое конструктивное решение здания с подвешенными блоками этажей: а) вертикальный разрез; б) поперечные разрезы; 1 – фундамент; 2 – несущий ствол; 3 – оголовок; 4 – плиты перекрытий; 5 – подвески; 6 – диафрагмы жёсткости; 7 – включающиеся связи; 8 – выключающиеся связи; 9 – амортизаторы; 10 – блок этажей

Для повышения диссипативных свойств в предлагаемых конструктивных решениях введены амортизаторы, выполненные, например, из пружинных элементов. В предлагаемом конструктивном решении выключающиеся связи обеспечивают совместную работу ядра жёсткости и подвешенной части здания при нормальной эксплуатации, а включающиеся связи обеспечивают взаимное гашение колебаний блоков подвешенных этажей при динамическом воздействии.

Для определения рациональных значений параметров ствольно-подвесной несущей системы в условиях наиболее опасного низкочастотного сейсмического воздействия выбрано землетрясение, произошедшее в 1999 г. в г. Цзици, Тайвань. Значения параметров ствольно-подвесной несущей системы изменялись в широком диапазоне исходя из их практической реализации. Расчётное исследование выполнялось в программном комплексе ЛИРА.

На первом этапе рассматривалась конструкция здания с применением подвешенного оголовка, в которой изменению подверглись длина подвеса оголовка и натяжение подвесок. В результате исследования установлено, что наименьшие значения амплитуд колебаний перекрытий достигаются при применении подвеса оголовка длиной 1 м и натяжения подвесок с усилием 100 тс (см. рис. 6).

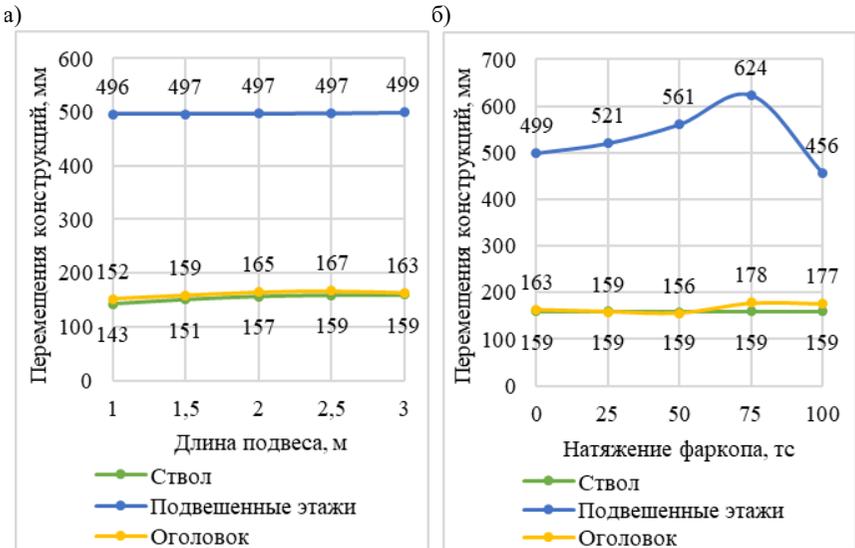


Рисунок 6 – Перемещения конструкций при различных:

а) длине подвеса; б) натяжении подвесок

На следующем этапе исследования была рассмотрена конструкция здания с подвешенными этажными блоками. Выявлено, что наибольшее влияние на колебания подвешенных этажных блоков оказывают жёсткость элементов включающихся связей и зазор, устраиваемый между ними (см. рис. 7).

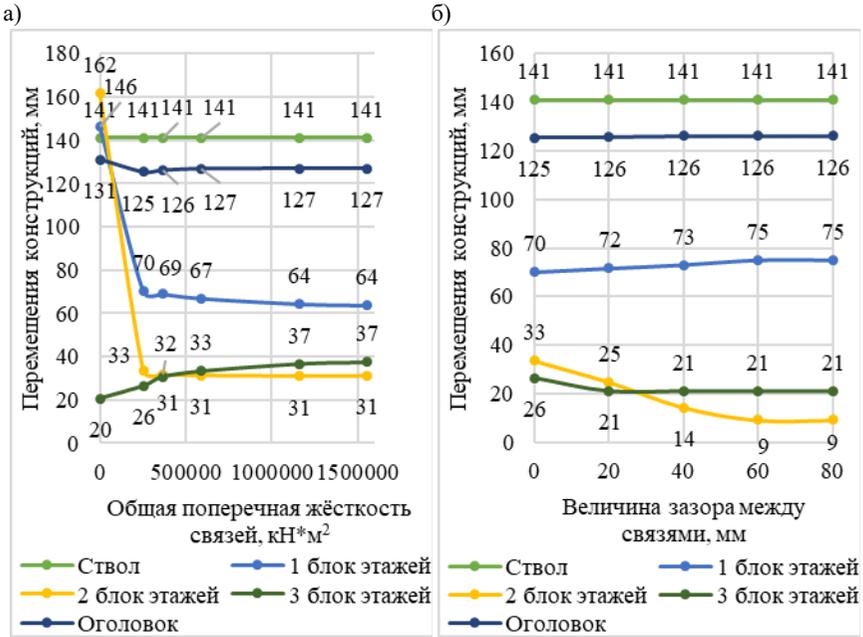


Рисунок 7 – Перемещения конструкций при различных:
а) поперечной жёсткости связей; б) величине зазора между связями

Установлено, что колебания несущего ствола здания могут быть уменьшены за счёт изменения массы конструкций верхнего блока этажей (см. рис. 8). Наличие данной зависимости свидетельствует о том, что подвешенные конструкции в зданиях с несущим стволом могут оказывать влияние на снижение колебаний здания во время сейсмического воздействия. При этом установлено, что наибольший эффект снижения колебаний здания достигается при значении относительной блока этажей равной 19,6% и жёсткости упругих связей в пределах от 25 до 100 тс/м.

Способность функционирования здания с подвешенными блоками этажей была проверена в различных условиях эксплуатации.

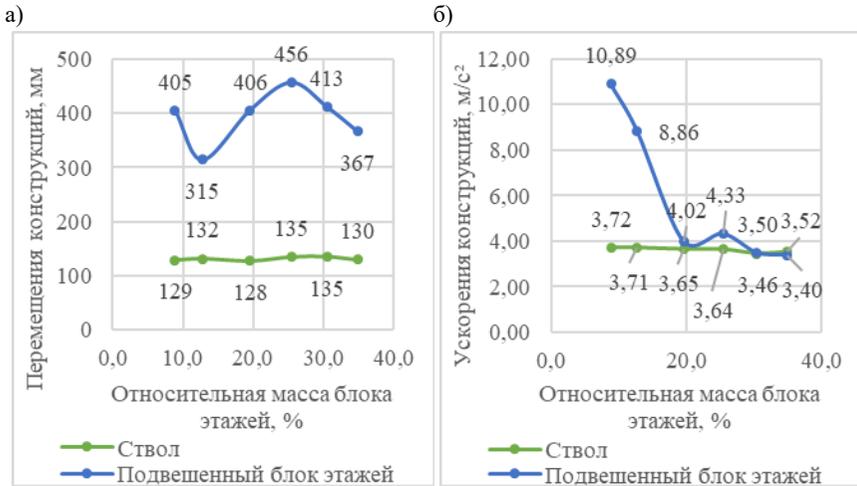


Рисунок 8 – Максимальные колебания несущих конструкций, выраженные в:
а) перемещениях; б) ускорениях

В **четвёртой главе** представлены результаты расчётно-теоретического исследования высотных зданий ствольной-подвесной системы с предлагаемыми конструктивными решениями с учётом различных факторов, влияющих на работу этих конструкций.

В ходе исследования рассмотрено влияние характеристик грунтового основания на поведение здания с предложенным конструктивным решением в условиях сейсмического воздействия. В качестве исходных данных использовались грунты с различными модулями деформации (см. табл. 3). Грунтовое основание в программном комплексе ЛИРА моделировалось при помощи объёмных конечных элементов. В качестве сейсмического воздействия рассматривалось землетрясение в г. Цзици.

Таблица 3 – Характеристики инженерно-геологических элементов, применённые исследовании

Тип ИГЭ	Модуль деформации E , т/м ²	Показатель текучести I_L	Плотность ρ , т/м ³	Коэффициент Пуассона ν
Полутвёрдая глина	5000	0,2	1,8	0,42
Твёрдая глина	10000	0	1,95	0,42
Суглинок	15000	0	1,7	0,35
Гравелистый грунт	20000	–	2,2	0,27

Разработанная конструкция свайного фундамента представлена на рисунке 9.

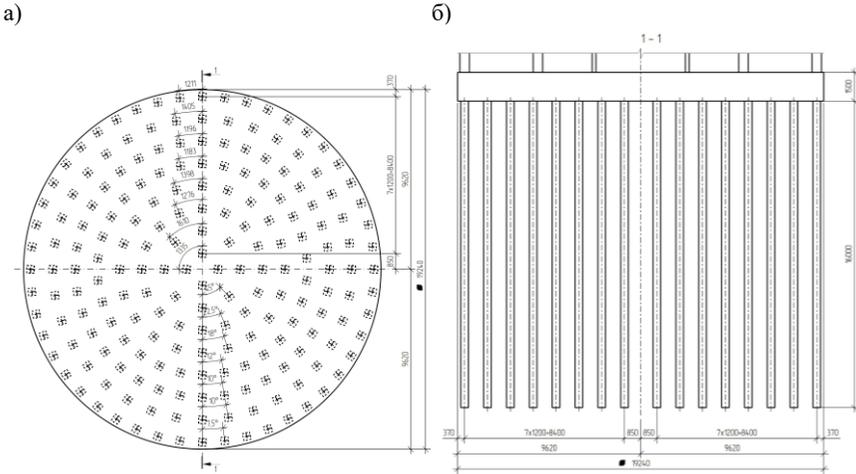


Рисунок 9 – Фундамент здания с несущим стилом: а) план; б) разрез

Несмотря на значительное усилие, возникающее под подошвой фундамента, конструкция здания характерна равномерная осадка, величина которой находится в допустимых пределах, в том числе при их устройстве на слабых грунтовых основаниях. Установлено, что учёт демпфирующих и деформационных свойств грунта позволяют дать более точное представление о динамическом воздействии на здание, вызванном землетрясением (см. рис. 10).

Несущая способность обеспечена для всех рассматриваемых грунтовых оснований, что позволяет сделать вывод о возможности возведения на них высотных зданий с несущим стилом.

На следующем этапе исследования рассмотрено влияние ветрового воздействия на здание с предлагаемыми конструктивными решениями. Сравнительному анализу подверглись данные о НДС конструкций зданий с различными вариантами исполнения: без устройства дополнительных связей, с упругими или жёсткими связями между ядром и блоками этажей, с трубными или включающимися связями между этажными блоками.

Нагрузки, соответствующие средней составляющей ветровой нагрузки, прикладывались к элементам расчётной модели как нелинейное статическое нагружение. Значения нагрузок, соответствующие пульсационной составляющей ветрового воздействия, определялись аналитически с учётом основных форм колебаний рассматриваемых зданий.

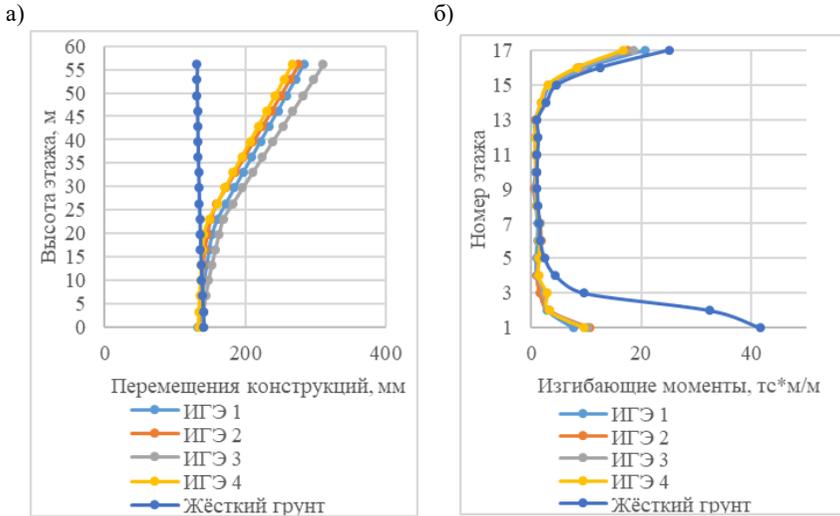


Рисунок 10 – Напряжённо-деформированное состояние несущих стен ядра здания:
а) максимальные перемещения; б) максимальные изгибающие моменты

На рисунке 11 представлены сравнительные диаграммы максимальных перемещений и ускорений подвешенных конструкций при ветровом воздействии.

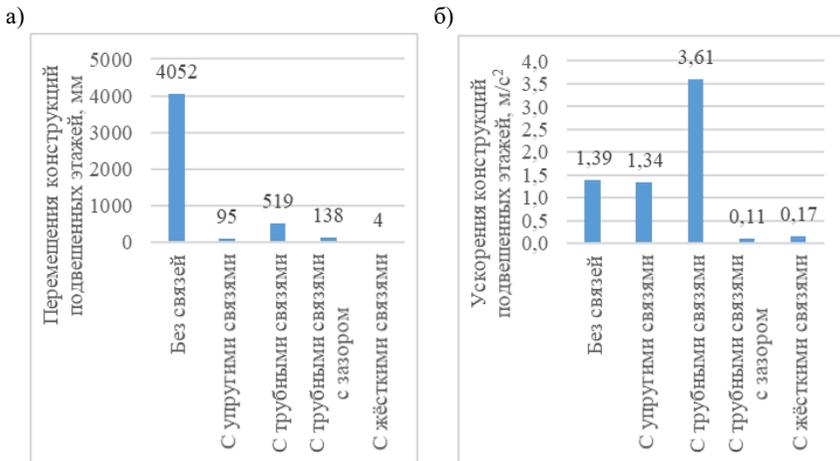


Рисунок 11 – Деформированное состояние подвешенных конструкций:
а) максимальные перемещения; б) максимальные ускорения

Полученные данные свидетельствуют о том, что обеспечение динамической комфортности в подвесном здании, при которой расчётные значения ускорений этажей не превышают нормативных показателей, возможно лишь при устройстве включающихся трубных связей или обеспечении жёсткой связи этажных блоков со стволом.

На заключительном этапе исследования рассмотрено поведение здания при выключении из работы отдельных его элементов. Приняты следующие сценарии локального разрушения: разрушение наружной стены в уровне первого этажа; разрушение пересекающихся стен ядра жёсткости; разрушение несущего ригеля ростверка; разрушение несущих подвесок в уровне верхнего этажа (см. рис. 12).

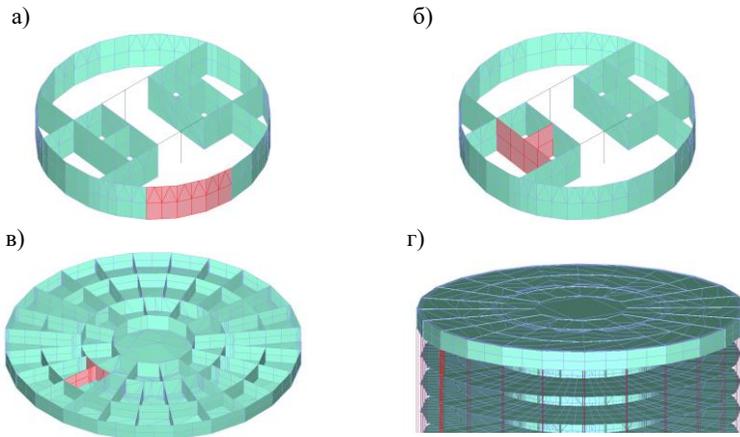


Рисунок 12 – Сценарии локального разрушения несущих элементов:
 а) наружной стены ядра жёсткости; б) внутренних стен ядра жёсткости;
 в) балок консольного ростверка; г) наружных подвесок

Достаточность предусмотренных конструктивных мероприятий, препятствующих прогрессирующему обрушению, оценивалась путём проверки несущей способности и деформативности конструкций, а также их соединений. Расчёт проводился в динамической постановке с учётом физической нелинейности конечных элементов. Расчётные прочностные характеристики материалов приняты равными их нормативным значениям. При расчёте была учтена реальная диаграмма работы материалов конструкций.

В таблице 4 представлены результаты моделирования ситуации, соответствующей локальному обрушению конструкций консольного ростверка, вызвавшему наибольший всплеск напряжений в несущих элементах здания.

Таблица 4 – Максимальные нормальные напряжения элементов здания при локальном обрушении конструкций оголовка

Элемент здания	Нормальные напряжения вдоль оси X элемента				Нормальные напряжения вдоль оси Y элемента, т/м ²			
	σ_{x+} , тс/м ²	Изменение, %	σ_{x-} , тс/м ²	Изменение, %	σ_{y+} , тс/м ²	Изменение, %	σ_{y-} , тс/м ²	Изменение, %
Несущие стены	494,1	18,4	-499,1	0,1	369,7	24,9	-1767,6	12,8
Перегородки	75,8	25,5	-173,1	2,7	134,1	-2,1	-944,9	21,5
Плиты перекрытия (ствол)	5178,1	-8,9	-4683,7	-8,7	3251,7	-9,2	-3638,9	-8,4
Плиты перекрытия (подвешенные)	645,3	-0,6	-1008,4	4,2	498,1	-17,0	-992,5	5,8
Балки рост-верка	927,7	-0,4	-732,1	49,4	187,3	-12,1	-317,2	23,8
Поперечные связи рост-верка	737,3	1,9	-554,6	40,0	290,3	33,8	-548,7	22,8
Плиты рост-верка	859,9	-5,7	-1648,7	11,0	1019,3	-1,5	-1842,0	27,4
Колонны ядра	–	–	–	–	164,7	19,8	-1122,2	53,0
Балки ядра	–	–	–	–	138,1	-2,3	-516,5	70,5

Ни одна из рассматриваемых расчётных ситуаций не привела к развитию разрушений конструкций, что позволяет сделать вывод об устойчивости высотного здания ствольно-подвесного исполнения к прогрессирующему обрушению.

В заключении главы представлены предложения по устройству характерных конструкций и их сопряжений в зданиях подвесного типа, разработанные на основании известных инженерных подходов. В соответствии с данными о практической реализации принципа подвешивания элементов строительных сооружений выполнено пробное проектирование узла крепления наружных стен к перекрытиям, узлов крепления вантовых подвесов к консольному ростверку и перекрытиям, устройства пространственной решётчатой конструкции этажных блоков, а также узла сопряжения подвешенной части здания с несущим стволом. Представлена принципиальная схема монтажа подвешенных перекрытий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1. Дана классификация ствольных несущих систем высотных зданий на основании особенностей их объёмно-планировочных и конструктивных решений, заключающихся в свободной планировочной схеме зданий и рациональном использовании прилегающего уличного пространства. Раскрыта принципиальная схема работы основных несущих систем высотных зданий ствольной конструктивной системы.

2. Высокая степень сейсмостойкости зданий ствольно-подвесной системы подтверждена результатами численного моделирования. Максимальные перемещения несущего ствола зданий подвесного типа меньше перемещений ядра консольных зданий на 9% при низкочастотных, на 63% при среднечастотном и на 39% при высокочастотных землетрясениях.

3. Максимальные ускорения подвешенных перекрытий ниже ускорений консольных перекрытий в 2,5 раза при низкочастотных, в 2,4 раза при среднечастотном и в 2 раза при высокочастотных землетрясениях. При этом максимальные ускорения несущего ствола в зданиях подвесного типа ниже в 7,5 раза при низкочастотных, в 3,4 раза при среднечастотном и в 2,1 раза при высокочастотных землетрясениях.

4. Применение принципа подвески перекрытий позволило снизить усилия в несущем стволе в 2,3 раза при низкочастотных, в 2,8 раза при среднечастотном и в 1,5 раза при высокочастотных землетрясениях.

5. Выявлена уязвимость зданий ствольно-подвесного типа к землетрясениям с преобладающими колебаниями низкой частоты, выраженная в значительных смещениях подвешенных этажей, которые могут достигать 672 мм.

6. На основании полученных данных об особенностях поведения высотных зданий ствольно-подвесного типа при землетрясениях различного

характера усовершенствованы применяемые и предложены их новые конструктивные решения. В результате численного исследования сейсмостойкости зданий установлено, что разработанное конструктивное решение здания позволяет снизить максимальные смещения этажных блоков до 64 мм.

7. Предложен способ снижения сейсмических колебаний зданий с несущим стволом. Максимальные перемещения и ускорения несущего ствола здания могут быть снижены на 3% и 15% соответственно, в то время как ускорения подвешенных конструкций снижаются на 53% при относительной массе верхнего блока этажей равной 19,6% и жёсткости упругих связей равной 25 тс/м.

8. Способность функционирования высотного здания ствольно-подвесного типа с предложенным конструктивным решением подтверждена результатами его численного моделирования с учётом различных факторов: свойств грунтовых оснований, воздействия ветра и также прогрессирующего обрушения.

Перспективой дальнейшей разработки данной темы является включение в нормативные документы рекомендаций, а именно данных о возможности обеспечения сейсмостойкости зданий за счёт применения подвесных конструкций и способах повышения устойчивости ствольно-подвесных зданий к другим воздействиям. Кроме того, данные об особенностях поведения высотных зданий ствольно-подвесной системы в ходе землетрясения могут быть полезными при разработке новых сейсмостойких конструктивных решений подобных зданий.

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Белаш, Т.А. Перспективное использование конструктивных систем зданий подвесного типа в сейсмических районах / Т.А. Белаш, **И.В. Свитлик** // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2021. – №5. – С. 64–72.

2. Белаш, Т.А. К вопросу о повышении сейсмостойкости зданий подвесного типа в районах высокой сейсмической активности / Т.А. Белаш, **И.В. Свитлик** // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2023. – №2. – С. 54–66.

3. **Свитлик, И.В.** Особенности конструктивных решений высотных зданий ствольно-подвесной несущей системы / **И.В. Свитлик** // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2024. – №4. – С. 57–72.

**Публикации в изданиях, индексируемых
в международных базах данных Web of Science и Scopus**

4. Belash, T. Effectiveness of the use of suspended structures in seismic areas / T. Belash, **I. Svitlik** // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – №403 – С. 1187–1195.

5. Belash, T. Damping of structures of earthquake resistant suspended buildings / T. Belash, **I. Svitlik** // Proceedings of the 6th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety ICCATS 2022. – 2023. – С. 289–297.

Другие публикации по теме диссертации

6. Belash, T. Structural concept features of suspended structures for seismic areas / T. Belash, **I. Svitlik** // IOP Conference Series Materials Science and Engineering International Science and Technology Conference FarEastCon 2020 6th-9th October 2020, Russky Island, Russia, Vladivostok. – 2021. – С. 42–48.

7. **Свитлик, И.В.** О влиянии типа грунтового основания на сейсмостойкость многоэтажного здания с несущим стволом / И.В. Свитлик // Международная конференция по физике материалов, строительным конструкциям и технологиям в строительстве, промышленной и производственной инженерии (МРСРЕ-2024). Сборник трудов V международной научно-технической конференции. Владимир, 2024. – 2024. – С. 192–199.

Компьютерная верстка *Смирновой М. В.*

Подписано к печати 13.12.2024. Формат 60×84^{1/16}. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 167.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.