

Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный
технический университет»

На правах рукописи

Науменко Артем Анатольевич

КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ НЕСУЩИХ СИСТЕМ
ВЫСОТНЫХ ЗДАНИЙ

Кафедра «Строительство и архитектура»
08.04.01 – «Строительство»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени магистра наук

Комсомольск-на-Амуре
2024г.

Работа выполнена на кафедре «Строительства и архитектуры»
Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета.

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент, Дзюба Виктор Александрович

Рецензент: кандидат технических наук,
Щербаков И.Ф.

Защита состоится «14» марта 2024г. В 14 часов 30 минут на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 08.04.01 “Строительство” в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 212/1.

С диссертацией можно ознакомиться на кафедре «Строительства и архитектуры» КНАГУ.

Секретарь ГЭК

И.В. Погорельских

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Увеличение этажности гражданских зданий, возводимых на городских территориях, является объективной тенденцией современного строительства. При этом предпочтение отдается каркасной конструктивной схеме, позволяющей улучшить планировочные решения проектируемых зданий. Наиболее эффективной для сборного каркаса является связевая модель, при которой сопротивление несущей системы ветровым воздействием обеспечивается специальными элементами жесткости.

Также в работе рассмотрены вопросы проектирования многоэтажных зданий с использованием монолитных ядер жесткости. Ядра жесткости воспринимают горизонтальные нагрузки и обеспечивают неизменяемость несущей системы здания. В ядрах жесткости возникают изгибающие моменты и моменты кручения при несимметричном их расположении в плане здания. В работе приведены варианты использования одиночных ядер жесткости, а также парных ядер жесткости в составе несущей системы.

Предложен подход к выбору оптимальной конструкции каркаса высотного здания и расположения аутригерных этажей. Рассмотрены пять вариантов расчетных моделей каркаса с варьированием количества и расположения аутригерных этажей. Приняты два конструктивных решения аутригеров, объединяющих колонны по периметру здания связующих этажей в виде ферм и монолитных стен. В качестве критериев эффективного расположения и оптимального конструктивного решения каркаса здания приняты нормируемые характеристики общей устойчивости каркаса, ускорение верхнего этажа от действия динамической составляющей ветровой нагрузки, характер форм и спектр частот собственных колебаний. По результатам исследований предложена оптимальная конструктивная схема высотного здания с рациональным расположением аутригеров.

Целью диссертационной работы является:

- разработка оптимальных конструктивных решений несущих систем высотных зданий.

Теоретической и методологической основой исследования послужили методы теоретического и практического анализа конструктивных решений несущих систем высотных зданий. В процессе работы над диссертацией изучены работы российских, зарубежных ученых, посвящённые вопросам исследования конструктивных решений и развитию современного высотного домостроения. Наибольшее влияние на выполненное исследование оказали труды Шумейко В.И., Травуша В. И., Кони́на Д. В., Бирбраера А. Н., Роледера А. Ю., Агапова В.П., Агаханова Э.К., Чернуха Н.А.

Информационной базой для доказательства основных положений исследования явились законодательные и нормативные акты федеральных, региональных и муниципальных органов власти.

Автор защищает: подход к выбору оптимальной конструкции каркаса высотного здания и расположения аутригерных этажей на основе пяти вариантов расчетных моделей каркаса с варьированием количества и расположения аутригерных этажей и двух конструктивных решения аутригеров, объединяющих колонны по периметру здания связующих этажей в виде ферм и монолитных стен. Оптимальная конструктивная схема высотного здания с рациональным расположением аутригеров.

Научную новизну работы составляют: полученные в результате исследования новые данные об оптимальных конструктивных решениях несущих систем высотных зданий.

Практическая ценность: Результаты исследований поведения несущих систем, которые представлены в виде ядра жесткости и аутригерных этажей, позволят повысить надёжность проектирования конструкций высотных зданий.

Апробация работы и публикации

Основные положения диссертации опубликованы в двух научных статьях.

Настоящая работа выполнена в 2021-2024 годах на кафедре «Строительство и архитектура» факультета Кадастра и Строительства КНАГУ под руководством к.т.н., доцента В.А. Дзюбы.

Структура и объём работы. Магистерская диссертация состоит из введения, двух глав, списка использованных источников (48 источников). Основной текст изложен на 71 странице, содержит 3 таблицы и 26 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи, предмет и объект исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе** «Конструктивные схемы высотных зданий» рассмотрены наиболее актуальные конструктивные решения несущих систем высотных зданий.

В первую очередь рассматривается вопрос нагрузок, действующих на несущие системы высотных зданий. Разбирается вопрос об основных принципах действия нагрузок и изучается значение несущей конструкции для существования объекта, неизменяемости его формы и способности противостоять этим нагрузкам. В несущей конструкции учитывают следующие основные виды нагрузок: постоянные нагрузки, переменные нагрузки, инерционные нагрузки, нагрузки при защемлении. В свою очередь постоянные нагрузки состоят: из собственного веса и из полезной (временной) нагрузки. Переменные нагрузки - из ветровой нагрузки, снеговой нагрузки и давления грунта. Инерционные нагрузки включают в себя: ударную силу,

тормозную силу, сейсмическую нагрузку, резонансную силу. И нагрузки при заземлении - это деформационная сила, старение, усадочная сила, температурная нагрузка. Для элементарного понимания работы несущих систем конструкций высотных зданий необходимо рассмотреть три основных вида действующих нагрузок: система горизонтальных нагрузок на этажах, система вертикальных нагрузок и их передача с этажей на основание, система боковых горизонтальных нагрузок и повышение жесткости сооружения. Основная задача проектировщика состоит в том, чтобы по возможности интегрировать эти три системы и создать такую конструктивную основу, которая бы взяла на себя все эти функции.

Далее разбираются стеновые (бескаркасные) конструктивные схемы. Бескаркасная система (с несущими стенами) представляет собой жесткую, устойчивую коробку из взаимосвязанных наружных и внутренних стен и перекрытий. Наружные и внутренние стены воспринимают нагрузки от междуэтажных перекрытий. Бескаркасная система является основной в массовом жилищном строительстве домов различной этажности. Размеры жилых ячеек, необходимость членений стенами и перегородками с обеспечением звукоизоляции квартир и другие особенности обуславливают техническую целесообразность и экономическую оправданность применения бескаркасных зданий при строительстве жилищ, а также тех гражданских зданий, в которых преобладает многоячеековая планировочная структура (санатории, больницы, общежития и т.п.).

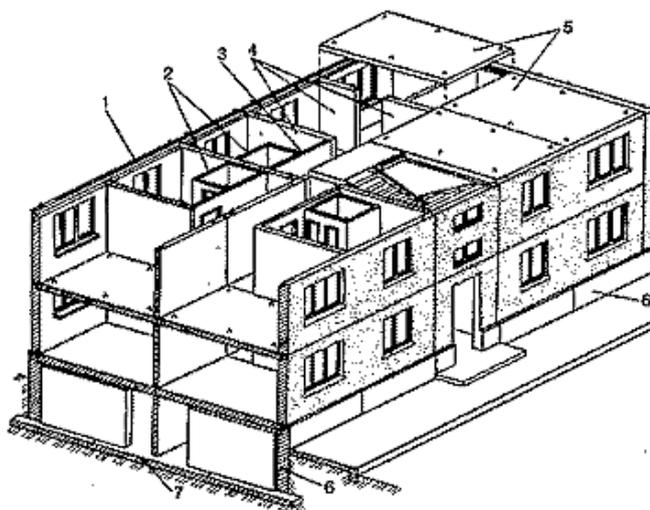


Рисунок 1 Бескаркасная конструктивная схема

Следом за бескаркасными рассматриваются каркасные конструктивные схемы. Начало эры высотного строительства связано с применением лёгкого стального каркаса. В связи с этим горизонтальные нагрузки для проектировщиков высотных зданий превратились в более важную проблему. Поэтому возникла необходимость в новых конструкциях и материалах, которые должны обеспечивать жёсткость и устойчивость зданий. Широкое распространение и дальнейшее развитие получила система в виде сочетания рамных каркасов со стенами-диафрагмами. Наиболее характерные особенности современного высотного строительства при использовании рамно-связевой схемы: стена-диафрагма выполняется в виде монолитного железобетонного или сталежелезобетонного ствола жёсткости; выполнение каркаса из монолитного железобетона; повышение эффективности каркаса за счёт использования горизонтальных поясов жёсткости и аутригеров. Рассматриваются следующие вариации каркасных конструктивных схем:

1. Рамно-каркасная конструктивная схема;
2. Ствольная конструктивная схема;
3. оболочковая (коробчатая) конструктивная схема;
4. системы с мегаколоннами;
5. система «HexaGrid».



Рисунок 2 Строительство башни «Aspire Tower»



Рисунок 3 Строительство башни «Capital Gate» Alfabuild



Рисунок 4 Здание «Sears (Willis) Tower»



Рисунок 5 Строительство башни «Guangzhou International Finance Center»

Во второй главе «Аутригерные системы высотных зданий» подробно описано назначение аутригерных систем. При проектировании высотных зданий большое значение уделяется вопросу сопротивления несущих систем и фундаментов внешним нагрузкам. При этом основное внимание сосредоточено на горизонтальных нагрузках, вызванных воздействием ветра. Существуют различные конструктивные системы, которые помогают высотным зданиям сопротивляться таким нагрузкам. Для зданий средней этажности плоские и пространственные элементы жесткости (ядро-диафрагмовые системы) обеспечивают надежное сопротивление внешним воздействиям. В высотных зданиях наряду с внутренним ядром необходимо предусмотреть трубу коробчатого сечения по периферии плана здания. Однако такая замкнутая труба нарушит функциональное назначение здания. Поэтому по внешнему периметру здания устраивается рамная оболочка, колонны которой соединяются с внутренним ядром специальными ригелями (аутригерными системами). Аутригер представляет собой конструкцию из опоясывающей фермы, которая располагается по наружным колоннам, а также вертикальных связей, соединяющих центральное ядро жесткости с фермой. Аутригеры бывают в один или два этажа, с опоясывающей фермой и без нее, без вертикальных связей и с ними - их конструкция в каждом случае уникальна и может быть таковой и в рамках одного объекта. Существует три вида опоясывающих систем аутригера: ферменные, сплошные и рамные. Все научные исследования схожи в выводах, что наибольшую эффективность в сопротивлении ветру показывают ферменные пояса..

Среди ярких примеров использования аутригерных систем выделяется небоскреб “Лахта-центр”, построенный не так давно в Санкт-Петербурге. Его конструкция интересна тем, что в ней задействованы одновременно 5 аутригеров, 4 из которых представлены типичными аутригерными поясами с диагональными фермами, идущими от центрального ядра жесткости к колоннам. Примечательно, что по всей высоте здания колонны имеют поворот и наклон, а вот колонны аутригерной системы строго вертикальные, что позволяет зафиксировать закручивание и наклон, создавая зону жесткости. Как будто бы одно здание поместили на другое и так несколько раз. Оригинальным решением было поместить на верхушку здания аутригер в виде полутораметровой железобетонной плиты, которая собирает всю накопленную динамическую составляющую статических конструкций [24]. Это значительно повышает жесткость здания, снижая амплитуду колебания несущих конструкций.

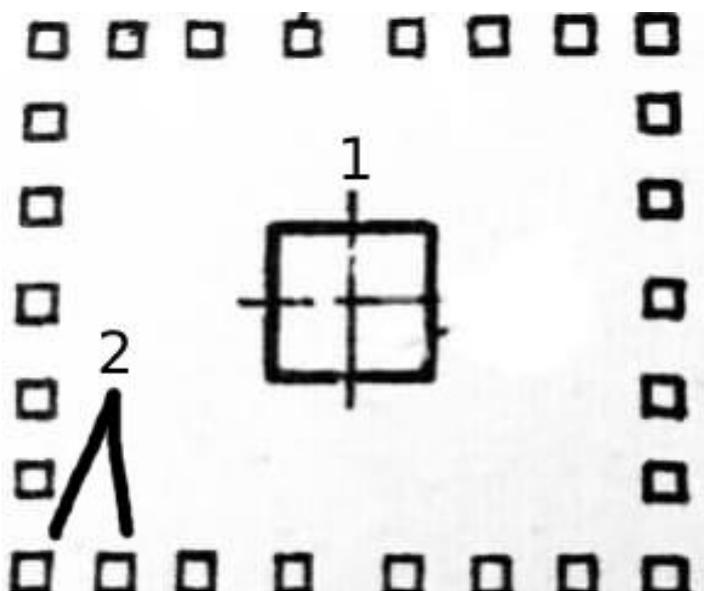


Рисунок 6 План здания с периферийной рамной системой 1-внутреннее ядро жесткости; 2-колонны по периферии плана здания

Сегодня аутригерная технология дает возможность архитекторам проектировать устойчивые небоскребы разнообразных форм.

Аутригерные этажи помогают распределять нагрузку между ядром и колоннами. Даже если башня окажется подвержена одномоментному деструктивному воздействию (удар самолета) — последствия должны быть сведены к минимуму.

Допущение «если в башню влетит самолет» после трагедии 9/11 стало обязательным при проектировании всех небоскребов.

Аналогичная схема работы аутригеров при урагане или стандартном ветре: распределяют нагрузку и затем гасят ее.

Аутригерные системы могут быть горизонтальными, диагональными, двухэтажными или без опоясывающих ферм или вертикальных связей. Конструкция для каждого высотного здания уникальна, а в зависимости от расположения по высоте – может быть разной в пределах одного объекта.

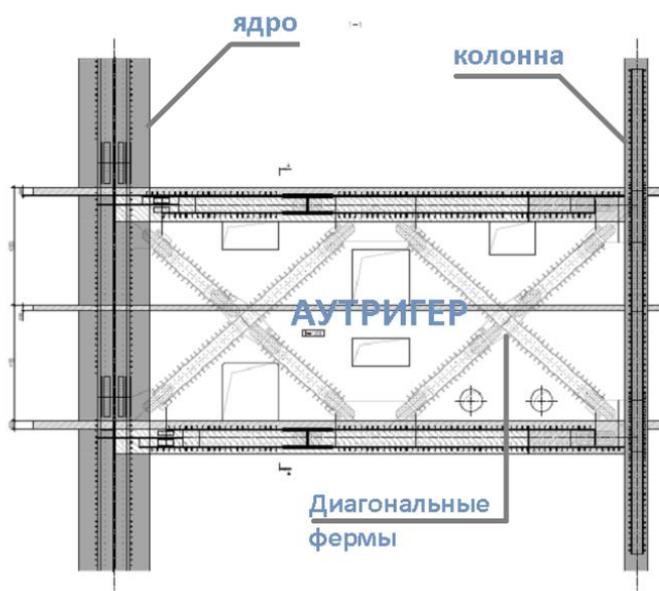


Рисунок 7 Внутреннее устройство горизонтального композитного аутригера Лахта Центра. Высота фермы два этажа здания — 8.4 метра

Конструктивно аутригеры выполняют несколько функций сразу: увеличение изгибной жесткости здания, устойчивость к ветровым нагрузкам, противодействие прогрессирующему обрушению.

Вытащите одну карту из карточного домика: разрушилась одна конструкция, отвечающая за устойчивость — посыпались все остальные. Обрушение нарастает в геометрической прогрессии.

Центральное ядро может обеспечить достаточное сопротивление опрокидывающему моменту и препятствует «дрейфу» здания. Вопрос о введении в несущую структуру аутригеров рассматривается, если в здании более 40 этажей.

Цель исследования — определение наиболее оптимальной конструкции и расположения аутригерных этажей в каркасе высотного здания. В качестве критериев эффективного расположения и оптимального конструктивного решения приняты нормируемые характеристики общей устойчивости каркаса здания, ускорение верхнего этажа от действия динамической составляющей ветровой нагрузки, характер форм и спектр частот собственных колебаний. Объектом исследования является пространственный каркас высотного жилого здания в г. Ростове-на-Дону, представляющий собой пространственную плитно-стержневую конструкцию, выполненную из железобетонных колонн, стен, диафрагм жесткости и плит перекрытий. Пространственная расчетная модель разработана методом конечных элементов в программном комплексе Лира-САПР.

Предложено два вида виртуальных аутригерных систем: в виде фермы, объединяющих колонны по периметру здания (рис. 23, а) и монолитных стен, объединяющих колонны по периметру здания (рис. 23, б). Применение предложенных конструктивных решений аутригерных систем устраняет необходимость в устройстве сложных соединений аутригеров с колоннами и центральным ядром, сводя к минимуму возможность случайной передачи нагрузки, возникающей из-за неравномерных деформаций между периметром и центральным ядром. Рассмотрено пять вариантов конструктивной схемы каркаса здания: • без аутригерных этажей; • два аутригерных этажа на технических этажах в виде ферм; • два аутригерных этажа на технических этажах в виде стен; • один аутригерный этаж на последнем этаже в виде ферм; • один аутригерный этаж на последнем этаже в виде стен. В расчетных моделях учтены статические и динамические нагрузки: собственный вес конструкций здания, снеговая нагрузка на покрытие, полезная нагрузка, ветровая нагрузка. Граничные условия задаются в опорных узлах стержней и стеновых пластин в виде жесткой заделки. Выполнены расчеты на общую устойчивость: получены формы потери и коэффициенты запаса устойчивости. В табл. сведены коэффициенты запаса устойчивости в зависимости от конструктивной схемы здания.

Анализ результатов динамического расчет показал, что вариант конструктивного решения без аутригерного этажа не удовлетворяет требованиям динамической комфортности. Принятое конструктивное решение с двумя аутригерными этажами на технических этажах в виде ферм позволяет увеличить общую устойчивость каркаса здания, удовлетворяет требованиям по динамической комфортности и отвечает требованиям экономичности проектных решений. Оптимизацию конструктивной схемы рекомендуется производить на самых ранних стадиях проекта. При таком подходе можно создать максимально эффективную аутригерную систему: колонны будут размещены в наиболее оптимальных местах; вертикальные нагрузки будут восприниматься конструкциями аутригера и колоннами. Разработанный вариант каркаса с рациональным конструктивным решением аутригерных этажей и уточнением общей устойчивости может быть использован при исследовании высотного здания на прогрессирующее обрушение.

Аутригерные уровни Лахта Центра

Итак, ветер будет вызывать ускорения на самом верху здания. Чтобы при этих ускорениях люди ощущали себя комфортно, находясь в башне, колебания-частоты нужно контролировать.

Как это делать наилучшим способом, определяется после продувки всего здания в аэродинамической трубе. Когда происходит такое испытание, появляются самые надежные данные по давлению ветра на фасад, а из этого уже определяется, какие колебания и частоты возникают, как считать устойчивость здания, как крепить фасад. Собрав все эти неизвестные воедино, а ветер – это функция всех этих неизвестных, пришли к решению, как сделать оптимальные конструкции. Изюминка всего процесса именно в том, как сделать всё рационально и оптимально, без излишнего увеличения и утолщения конструкций, чтобы места хватило и инженерному оборудованию, и людям.

На основании данных аэродинамических испытаний, принято решение по аутригерным элементам системы устойчивости башни.

В небоскребе Лахта Центра - четыре аутригерных этажа и пятый, нетипичный аутригер сконструирован в виде полутораметровой железобетонной плиты на 82-м этаже.

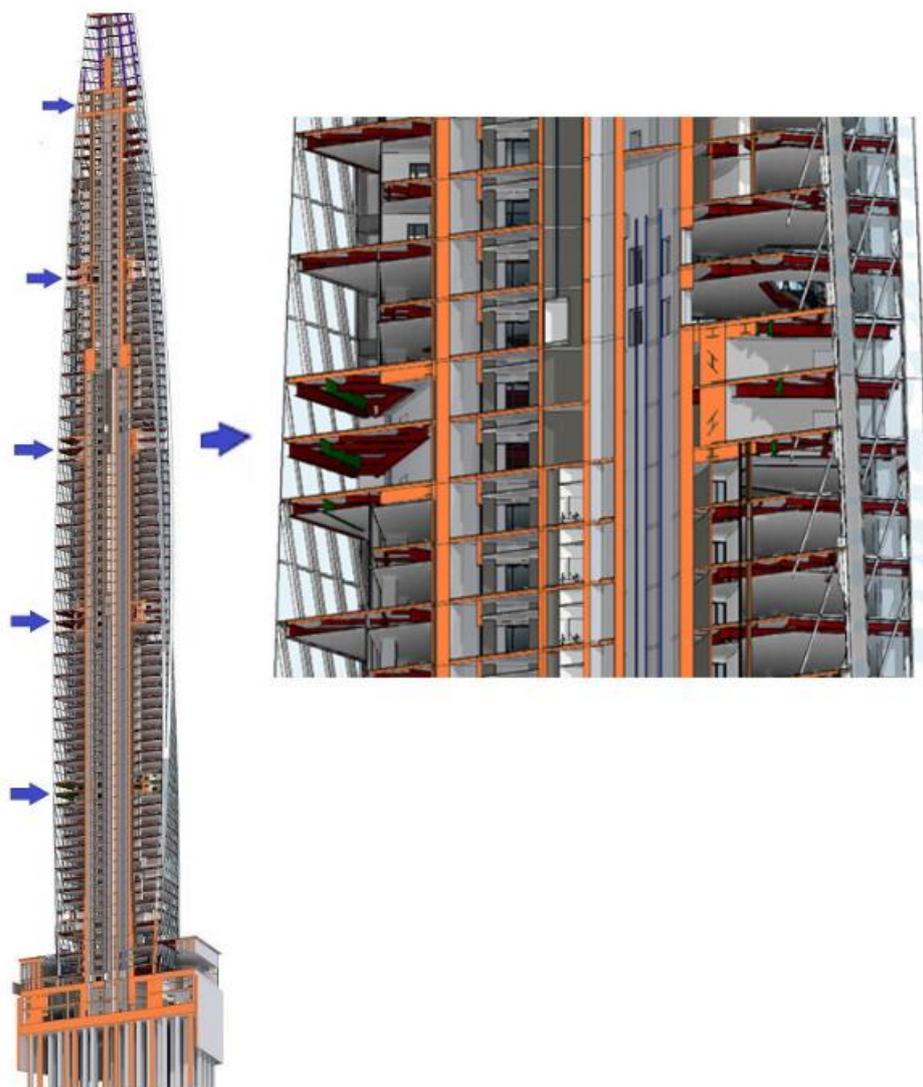


Рисунок 8 Схема расположения аутригерных уровней в Лахта центре
С учетом скрученности формы Лахта Центра и поворота здания на 89 градусов, возведение аутригерных этажей — ответственный этап и кропотливая работа, сравнимая с изготовлением фундамента.

При последующей эксплуатации здания аутригерные этажи станут техническими. На них разместится оборудование и узлы коммуникаций.

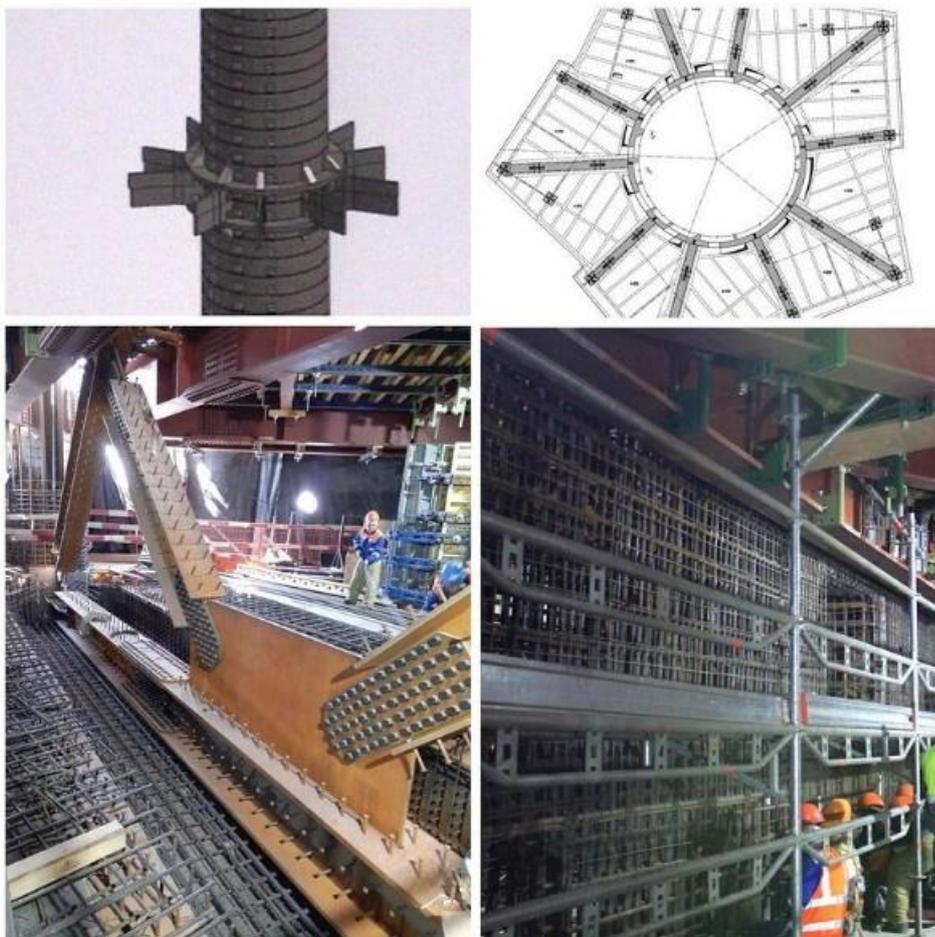


Рисунок 9 Аутригерные этажи "Лахта центра"

Благодаря описанным конструктивным особенностям, у башни минимальная, по сравнению с многими другими небоскребами, амплитуда горизонтальных колебаний.

Максимальное отклонение под воздействием «среднестатистического» петербургского ветра на уровне обзорной площадки составит 27 см. Эта величина практически не ощутима. Например, обитатели башни «Федерация» не замечают отклонений, величина которых составляет до 46 см по вершине.

Что касается более экстремальных случаев, то, согласно исследованиям, пиковые ветровые нагрузки на небоскреб составят около 500 паскалей. Ветер такой силы в Лахте ждут раз в 5 лет. Это соответствует скорости ветра около 30 м/с. Для сравнения — примерно в таком темпе прошел по городу ураган «Святой Иуда» в 2013 году.

И еще один важный показатель. Благодаря введению в систему устойчивости башни аутригерных поясов, небоскреб сможет выдерживать землетрясения силой до 6 баллов. Этого вполне достаточно: для Петербурга проявления сейсмической активности редки — за всю историю существования города их было менее 10, сила толчков не превышала 2-3 баллов по Рихтеру.

Выводы по диссертации:

Бурное развитие высотного строительства в крупных городах связано с ростом населения, а также с влиянием общественно-экономических факторов. Однако наблюдается тенденция строительства сверхвысоких зданий с целью создания имиджа. Особенно это ярко проявляется в странах Ближнего Востока и Юго-Восточной Азии. В связи с этим было создано новое понятие, которое сможет описать подобную тенденцию – «бесполезная высота». Так, например, башня «Burj Khalifa» (Дубай, ОАЭ) имеет 244 метра бесполезной высоты. Если бы бесполезной высоты не было, то 44 из 72 сверхвысоких зданий были бы ниже 300 метров и, следовательно, потеряли бы свой «сверхвысокий» статус. Несмотря на это, высотное строительство оказывает значительное влияние на создание новых материалов, новых конструктивных решений, которые могут быть использованы для зданий меньшей высоты.

Конструкции высотных зданий непрерывно совершенствуются и становятся более разнообразными. В последнее время несущие конструкции высотных зданий предпочитают выполнять из железобетона, но при строительстве сверхвысоких зданий широко используются сталебетонные (трубобетон) и сталежелезобетонные конструкции. Большое значение имеет внедрение и исследование сетчатых оболочек, которые характеризуются высокой надёжностью и жёсткостью. А также позволяет придавать зданию сложные формы, что отвечает тенденциям современной архитектуры. Включения аутригеров в работу каркасно-стволовых систем позволяет уменьшить горизонтальные перемещения здания в целом, тем самым делая его более жёстким.

Материалы диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Науменко, А.А. Конструктивные схемы высотных зданий / А.А. Науменко, В.А. Дзюба // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 16-17 декабря 2021 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО “КНАГУ”, 2022 – С. 201-203

2. Науменко, А.А. Ауригерные системы высотных зданий / А.А. Науменко, В.А. Дзюба // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 16-17 декабря 2021 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО “КНАГУ”, 2022 – С. 199-201