

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

*На правах рукописи*



Подпись аспиранта

Коновалов Михаил Александрович

*ФИО аспиранта*

Технология возведения комбинированного каркаса многоэтажного здания  
из клееных деревянных элементов и монолитного железобетона

*наименование темы научно-квалификационной работы (заглавными буквами)*

2.1.1 - Строительные конструкции, здания и сооружения

*отрасль науки (шифр и наименование научной специальности)*

08.06.01 Техника и технологии строительства

*наименование направленности (шифр и наименование направления)*

Академическая степень

**Исследователь. Преподаватель-исследователь**

## НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

Научный руководитель:

Д-р. техн. наук, профессор ВШГиЭС,  
директор ИСИ Козинец Галина Леонидовна  
*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

Санкт-Петербург, 2022

Научный доклад выполнен в Высшей школе промышленно-гражданского и дорожного строительства Инженерно-строительного института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Научный руководитель: Д. т. н, профессор ВШГиЭС, директор ИСИ  
Козинец Галина Леонидовна  
*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

Рецензент: Д.т.н., доцент каф. Строительство горных предприятий и  
подземных сооружений,  
ФГБОУВО Санкт-Петербургский Горный Университет  
Карасев Максим Анатольевич  
*ученая степень, ученое звание, должность, ФИО полностью*

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>.

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность работы.** В современном мире «многоэтажками» из монолитного железобетона мало кого-то можно удивить, это стало стандартным решением проектирования бизнес-центров и «спальных» районов. Но, если рассмотреть 16-этажное строение из дерева, то это вызывает интерес. Ведь два таких понятия как «дерево» и «многоэтажное здание» не могут стоять в одном контексте.

Большинство сомневаются в обеспечении пожарной безопасности многоэтажных деревянных домов. Дерево, конечно, горит, а сталь и железобетон - нет, но степень воспламеняемости не показатель огнестойкости. Древесина имеет низкую теплопроводность и может длительное время сохранять целостность конструкции при достаточной массивности несущей конструкции. Данный фактор является одним из важнейших при эвакуации людей из здания в случае пожара.

К положительным сторонам деревянных конструкций относятся высокие физические и механические характеристики, доступность, экологичность при производстве и др. В настоящее время на рынке применяются новые древесно-композитные строительные материалы (OSB, CLT, LVL и др.), позволяющие увеличить прочность конструкции и повысить надежность при эксплуатации и качество возводимых конструкций.

Реализация деревянного домостроения в России на данный момент только обсуждается на государственном уровне в виде создания и корректировки существующей нормативной базы деревянного строительства и урегулирования вопросов с точки зрения обеспечения пожарной безопасности. В то же время в европейских странах реализовано множество проектов многоэтажных зданий из дерева. Данные варианты таких зданий интенсивно возводятся в таких странах, как Финляндия, Англия, Германия, Австрия.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационного исследования является разработка конструктивных решений стабилизации многоэтажного деревянного здания в виде рамно-связевой системы, работающей совместно с ядром жесткости, с последующим исследованием прочностных и деформационных характеристик разработанных вариантов конструктивных систем многоэтажного здания из древесины.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были сформированы следующие задачи:

- Выполнить анализ существующих конструктивно-технологических решений, обеспечивающих стабилизацию многоэтажных деревянных зданий при внешнем воздействии;

- Выполнить разработку несущего деревянного каркаса здания с железобетонным сердечником при действии горизонтальных нагрузок.
- Исследовать и выполнить анализ несущей способности деревянных элементов конструкции здания с учетом воздействия внешних и динамических нагрузок.
- Создание алгоритма для разработки концепции деревянного многоэтажного здания с учетом результатов проведенных вычислительных исследований и анализа несущей способности разработанных вариантов деревянного многоэтажного здания.

**Научная новизна.** Научная новизна диссертационного исследования заключается в разработке и анализе конструктивных решений многоэтажных зданий, основной материал несущих конструкций которых является древесина.

- Разработан алгоритм разработки и оценки несущей способности конструктивных систем здания при действии комбинации нагрузок.
- Доказана эффективность применения деревянных конструкций в качестве основных элементов в несущей системе многоэтажного здания.

**Теоретическая и практическая значимость.** Теоретическая значимость проведенного исследования заключается в развитии теории в области многоэтажного деревянного домостроения. Полученные теоретические результаты могут быть использованы в дальнейших исследованиях.

Практическая значимость исследования заключается в увеличении зоны использования конструктивных элементов из дерева в строительстве многоэтажных зданий и обеспечении обоснованных исследовательских методов испытаний за счет использования программно-вычислительных комплексов и анализа несущей способности строительных конструкций, материал которого выполнен из дерева.

**Методы исследований.** При выполнении работ по исследованию несущих конструкций многоэтажных деревянных зданий в качестве инструментов использовались методы расчета теории упругости, строительной механики и пластичности анизотропных тел. Экспериментальные исследования и расчет несущей способности рассматриваемых конструкций осуществлялся при помощи метода конечных элементов в программном комплексе Autodesk Robot Structural.

**Достоверность результатов исследования** обеспечивается заменой реальных процессов математическими моделями, а также совпадением общей деформации несущей конструкции разработанных вариантов из дерева и характера распределения общей деформации реализованного проекта многоэтажного здания из монолитного железобетона, на основе которого выполняются исследования.

### **На защиту выносятся:**

- Концептуальные модели несущих конструкций многоэтажного здания, где в качестве основного материала несущих конструкций выступает древесина.
- Результаты теоретических и экспериментальных исследований несущих конструкций многоэтажных зданий, разработанных на основе реализованного проекта здания из монолитного железобетона;
- Результаты сопоставительного анализа физико-механических характеристик несущих конструкций разработанных вариантов из дерева и эталонного образца из монолитного железобетона;
- Алгоритм разработки расчетной модели несущей конструкции деревянного многоэтажного здания.

**Личный вклад.** Вклад автора заключается в выполнении аналитического анализа проведенных исследований по направлению научной работы, определении цели и задач; в создании концептуальных моделей многоэтажных зданий, несущие конструкции которых выполнены из дерева, с последующими теоретическими и экспериментальными исследованиями; в обработке и сравнительном анализ полученных результатов исследования; в создании технических и конструктивных решений и предоставлении рекомендации по развитию подобного рода конструкций; в подготовке публикаций по теме диссертационного исследования на основе разработанных трудов.

Также автором разработан алгоритм, отражающий ключевые шаги по осуществлению проекта многоэтажного деревянного здания, начиная от идеи и заканчивая получением рабочей модели здания, с учетом всех установленных норм и требований.

**Апробация результатов.** Положения научной исследовательской работы представлены на международной научно-технической конференции по теме «Строительство и Архитектура: Теория и практика инновационного развития» в городе Ростов-на-Дону (Catpid-2020), а также результаты представлены на международной научно-практической конференции «Инновации в деревянном строительстве» (СПБГАСУ, Санкт-Петербург, 2021г.)

**Публикации.** По итогу выполнения научной работы опубликовано 4 работы, в том числе 2 в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 – в Scopus.

## Представление научного доклада: основные положения

### 1. Анализ существующей ситуации деревянного домостроения в России и за рубежом

В поисках альтернативных вариантов строительства в последнее десятилетие были реализованы проекты многоэтажных зданий из дерева. Первые варианты зданий были небольшой этажности, как, например, деревянные конструкции Forté Building (10 этажей, Мельбурн, Австралия), Stadhaus (9 этажей, Лондон, Великобритания), E3 (7 этажей, Берлин, ФРГ).

После получения опыта от очередного успешно реализованного проекта деревянного здания этажность новых зданий с каждым годом растет. Таким образом самым высоким реализованным проектом на данный момент является здание Mjøsa (Mjøstårnet), Норвегия, которое построено в 2019 году. Высота здания составляет 85,4 метра и имеет 18 этажей.

Упомянув вышеперечисленные объекты, необходимо отметить, что опыт работы с многоэтажными деревянными зданиями ограничен в нашей стране. Встречаются чаще большие деревянные конструкции, такие как мосты или большепролетные конструкции. В России, например, возведены такие сооружения, как Дворец водных видов спорта (Казань). Он был построен к Универсиаде 2013 года российскими архитекторами. Помимо этого, отечественным архитекторам, используя опыт зарубежных коллег, удалось воплотить в реальность проект большепролетного сооружения - крупнейший в России новосибирский аквапарк площадью 35 тыс. м<sup>2</sup>. Отечественные архитекторы здесь использовали опыт западных коллег при возведении деревянного купола.

Общепринятое суждение, что многоэтажное здание должно быть сделано только из стали и железобетона так укоренилось, что деревянное многоэтажное строительство многим кажется не современным и непрактичным. Однако существуют исторические и современные примеры зданий и сооружений, возведенных полностью из дерева, которые функционируют на протяжении длительного времени. В качестве таких примеров служат Радиопередающая башня Гливице и Пагода Шакьямуни (Gliwice Radio Transmission Tower and the Yingxian Pagoda). Современным примером является девятиэтажный многоквартирный жилой комплекс в пригороде Лондона под названием Башня Мюррей-Гроув (the Murray Grove Tower), построенный в 2008 году полностью из цельных поперечных ламинированных деревянных панелей.

Аргументами против древесины как строительного материала для зданий обычно являются поверхностные представления о более низких прочностных и жесткостных свойствах по сравнению с другими строительными материалами, а также что древесина является горючим материалом и обладает плохими акустическими характеристиками.

Строительство уникальных зданий из дерева в условиях нашей страны является перспективным видом деятельности. Необходимо отметить, что нехватка опыта, алгоритма разработки подобных проектов и соответствующих для этой специфики регулирующих норм и правил создаёт определённую пустоту в данной виде многоэтажного строительства, что мешает реализации многоэтажного строительства.

Таким образом, **цель исследования** заключается в доказательстве целесообразности строительства деревянного офисного здания путем разработки несущих конструкций, аналогом которого является существующее офисное здание в нашей стране, на примере бизнес-центра в г. Санкт-Петербург.

В процессе теоретического исследования были изучены и проанализированы физико-механические характеристики древесины, которая будет применяться при разработке концептуальных решений. В процессе анализа был предварительно выбран класс древесины по прочности с аналогичными характеристиками конструкций из бетона для применения в дальнейших исследованиях. Выбранная древесина в соответствии с ГОСТ относится к классу прочности С24, сравнима с прочностью обычно используемого бетона марки В25.

После чего освещается социальная значимость данного исследования, в которой обсуждается социально-экономические преимущества деревянного домостроения в условиях быстроразвивающегося мира. Оценка экономической составляющей исследуемого типа строительства оценивается по таким критериям как: Стоимостной аспект; Скорость строительства; Мобильность в эксплуатации; Легкость несущей конструкции.

По завершению анализа существующей ситуации деревянного домостроения в нашей стране затрагивается тема экологии, приводятся преимущества деревянного домостроения перед аналогичным вариантом из монолитного железобетона.

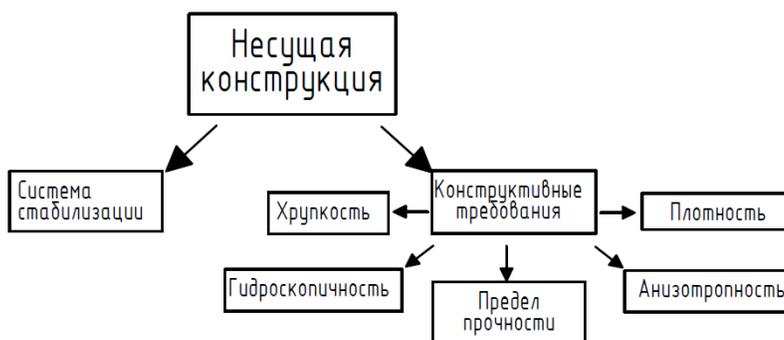
Приводятся результаты исследований по количеству затраченной энергии на изготовление того или иного материала. На изготовление одной тонны цемента необходимо примерно в сто раз больше энергозатрат, нежели на изготовление той же самой тонны пиломатериалов.

## 2. Исследование конструктивных решений по возведению многоэтажных зданий

В данном разделе обобщаются конструктивные трудности, возникающие при проектировании многоэтажных зданий, обсуждается их актуальность и, по возможности, количественно оценивается. Список структурных вопросов содержит следующие темы: Устройство фундамента; Возведение несущей конструкции здания; Компенсация конструктивных недостатков деревянных конструкций для обеспечения комфортной среды внутри здания.

### 2.1. Внешние факторы влияющие на общее состояние конструкции.

Для дальнейшего исследования несущих конструкций многоэтажных зданий были рассмотрены основные составляющие, обеспечивающие общую устойчивость и надежность конструкции.



На рис. 1 приведены основные свойства, которыми должен обладать любой рассматриваемый элемент несущей конструкции здания.

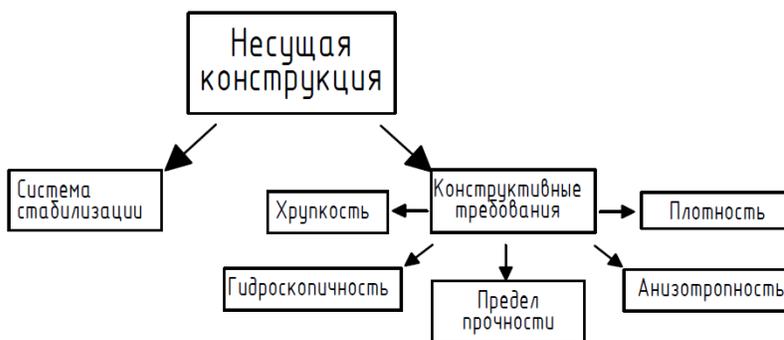


Рис. 1. Физические факторы несущей конструкции.

### 2.2. Физико-механические характеристики разрабатываемой модели

Для детального анализа физико-механических характеристик здания были рассмотрены основные аспекты, отвечающие за определения несущей способности конструкции: Прочность

конструкции здания; Жесткость элементов конструкции; Устойчивость конструкции; Общая деформация конструкций; Динамическое поведение конструкций.

По итогу данного раздела, по мере выполнения данных аспектов несущая способность и высота самой конструкции при проектировании будущего здания будет увеличиваться. Присущие материалу свойства прочности, жесткости и плотности — все это увеличивается при повышении качества применяемого материала на основе древесины. При увеличении плотности древесины масса конструкции увеличивается, что делает ее менее восприимчивой к ветровому воздействию и, следовательно, повышает устойчивость конструкции. Характеристики строительной конструкции, а именно прочность и жесткость, увеличиваются пропорционально качеству древесины, что также увеличивает устойчивость строительной конструкции. Связь между качеством древесины и динамическим поведением неопределенна, поскольку увеличение плотности и жесткости древесины изменяется прямо пропорционально.

В целом проблемы с древесиной как строительным материалом для высотных зданий должны решаться путем применения разработанного алгоритма расчета несущих конструкций из дерева, подкрепленного большим объемом опыта и знаний в сфере деревянного домостроения. В дополнение к этому утверждению правильный выбор материала, правильная разработка конструкции и выбранный тип несущей системы могут максимально улучшить конечный результат.

### **2.3. Конструктивные решения**

Конструктивные решения, рассматриваемые для многоэтажных деревянных зданий, могут быть рассмотрены отдельно, рассматривая при этом различный тип материала, системы стабилизации, а также подбор типов соединения самих конструкций.

Перед тем как приступить к разработке концепции будущего здания из древесины, необходимо предварительно подобрать конструктивные изделия из древесины, учитывая в дальнейшем класс применяемой древесины, прочностные качества которой помогут в предварительных расчетах при действии прикладываемых нагрузок.

В качестве основных строительных изделий из древесины рассматривают: Клееный брус (GLT), конструкционный композитный брус (SCL), который включает в себя клееный брус (LVL), поперечный ламинированный брус (CLT). Прочность композитов на основе древесины зависит от применяемого материала и его обработки. Ограничения по размерам строительных изделий из древесины могут стать проблемой для реализации многоэтажного деревянного здания. При сравнении предела прочности материалов данный показатель у рассматриваемых материалов

значительно выше по сравнению с обычными пиломатериалами. По сравнению с пиломатериалами предел прочности увеличивается на 39,0% для клееного бруса GLT и на 62,0%~90,0% для LVL.

Жесткость клееного бруса GLT существенно не увеличивается, в то время как жесткость клееного бруса типа LVL увеличивается с 35,0% до 45,0% по сравнению с обычными пиломатериалами.

Размерные ограничения древесных изделий варьируются от 1500 мм для GLT, 2500 мм для LVL и 400 мм по толщине для CLT. Таким образом предлагается принимать максимальные размеры поперечных сечений GLT элементов, которое составляет 1500 мм.

Помимо типа применяемого материала, рассматривается сорт древесины для изготовления несущих элементов. Рассматриваемая древесина подразделяется на классы по прочности. Самый высокий класс прочности в соответствии с ГОСТ 33080-2014 является C24 (D70 EN 338). Таким образом в качестве основного материала из древесины для расчетов будет применяться клеенные материалы из древесины лиственных пород с классом прочности C24, при этом ограничиваясь максимально возможными габаритами изделиями (не более 1500мм).

Практический метод расчета многоэтажных зданий с разнообразной конструктивной схемой выполнена из отдельных следующих друг за другом определенных операций, например выбора конструктивной схемы, набора комбинации нагрузок, определения возникающих усилий и т. д. При этом весьма ответственной является назначение расчетной схемы здания.

Проектирование конструкций здания в первую очередь начинают с решения основных принципиальных задач – выбора конструктивной системы и строительной системы здания. Для анализа рассматривались такие конструктивные схемы как: Каркасные системы; Рамные; Рамно-связевые; Связевые; Стеновые (бескаркасные); Объемно-блочные; Ствольные системы; Оболочковые системы и Комбинированные конструктивные системы.

Таким образом используя основной набор конструктивных систем, принимая во внимание положительные стороны, путем комбинирования и подбора сочетаний конструктивных решений, можно добиться оптимальных вариантов несущих конструкций многоэтажных зданий из дерева.

Для увеличения несущей способности и уменьшения значений деформаций конструкции, также дополнительно рассматриваются вспомогательные элементы.

В качестве вспомогательных конструктивных решений приводится внешняя диагонально-сетчатая конструкция в виде рамы, основой для которой являются наработки известного отечественного инженера Владимира Шухова, под руководством которого в 1896 году была сконструирована первая в мире несущая сетчатая оболочка башни.

Либо аналогичное конструктивное решение в виде сетчатой оболочки в качестве каркаса здания, которая представляет собой сетчатую структуру, состоящую из диагонально пересекающейся сетки линейных элементов.

Рассматриваемые решения располагаются по внешней стороне здания. Для увеличения несущей конструкции применяя решения внутри здания, предлагается рассмотреть диафрагмы жесткости в виде устройства вертикальных плоскостных элементов (стен) или устройства вертикальных связей, повышая тем самым жесткость конструкции в горизонтальном направлении.

#### **2.4. Способ сочленение конструкции и несущего ядра жесткости.**

Ввиду нескольких вариантов сочленения несущего каркаса с ядром жесткости, наиболее распространенной схемой сочленения является при помощи балочной системы, но при проектировании высотных зданиях или сооружениях возможны комбинация технологических решений: Каркасно-ствольная система; Каркасно-оболочковая система; Ствольно-оболочковая системы "Труба в трубе"; Аутригерная. По итогу анализа данных конфигураций, принимая во внимания все плюсы и минусы вариант в виде ствольно-оболочковая системы "Труба в трубе" является наиболее многообещающей системой точки зрения устойчивости, которую возможно будет реализовать в деревянном исполнении.

#### **2.5. Узлы соединения несущих элементов.**

Соответствующие проблемы для высоких деревянных зданий, такие как ползучесть, усадка и напряжение, перпендикулярное волокну, могут быть преодолены путем правильной разработки соединений, которые позволят избежать напряжения направленные перпендикулярно волокну.

В принципе, существует два различных типа соединений деревянных конструкций: соединения древесины с древесиной и соединения стали с древесиной. Для анализа существующих соединений, которые можно будет применить при разработки многоэтажного деревянного здания решено было разделить на некоторые группы: Соединение балочные и CLT панелей; Соединение стен и перекрытий; Соединение горизонтальных линейных элементов в виде балок и вертикальных связей; Крепежные элементы соединений.

#### **2.6. Пожарной Безопасности (Основные положения).**

Поскольку древесина является горючим материалом, пожарная безопасность является одной из наиболее важных тем на стадии проектирования здания.

Для обеспечения пожарной безопасности находящихся внутри многоэтажного деревянного здания на первоначальных стадиях проектирования должны быть поставлены и отработаны

основные задачи: эвакуация людей, деформация и потеря несущей способности строительных конструкций и распространение огня по всему зданию.

Немаловажным фактором при использовании деревянных строительных конструкций являются их пожарно-технические характеристики, такие как: пожароопасность и огнестойкость.

Для испытаний строительных конструкций экспериментальным методом была введена стандартная температурная кривая, отображающая температурный режим при пожаре конструкций. Исследования, проведенные по этому методу деревянных конструкций, говорит о том, что предел огнестойкости конструкций из массивной древесины значительно выше предела огнестойкости многих общедоступных строительных конструкций.

Для решения рассмотренных вопросов по пожарной безопасности также представлены некоторые решения пожарной безопасности, позволяющие защитить несущие конструкции при пожаре.

К таким решениям относится: Концепция защиты несущих конструкций здания в виде использования пропиток и защитных конструктивных мероприятий, и вариант обугливания деревянных конструкций.

Подводя итог пожарной безопасности, можно сделать вывод, что все требования пожарной безопасности, изложенные в строительных нормах, правилах и выходящих за рамки целей пожарной безопасности, могут быть удовлетворены с помощью рассмотренных вариантов.

### 3. Разработка концепций зданий с применением деревянных элементов в несущем каркасе многоэтажного здания

В данном разделе представлены результаты расчётов эталонного образца из монолитного железобетона и разработанных на его основе пяти концепций деревянных вариантов, используя различные конструктивные решения, которые нацелены на увеличение несущей способности.

#### 3.1. Эталонное здание

Для дальнейших исследований решено было взять за эталонный образец 16-этажное здание бизнес центра размером в плане 27 м. х 44 м., располагающееся в Санкт-Петербурге.



Рис. 2. Офисное здание бизнес-центра.

Характеристики рассматриваемого офисного здания:

- Конструкция имеет ядро жесткости из монолитного железобетона, толщина которого составляет 300 мм,
- Поперечное сечение основных колонн несущей конструкции составляет 500x500 мм;
- Перекрытия на всех этажах выполнены также из монолитного железобетона толщиной 220 мм;
- Ограждающие конструкции (стены) здания - самонесущие, кирпич толщина стен составляет 250 мм.

Характеристики рассматриваемого офисного здания:

- Класс конструктивной пожарной опасности – С0.
- Степень огнестойкости здания – II;
- Уровень ответственности здания – II;

Данное здание является центром обслуживания населения, располагающийся в Приморском районе Санкт-Петербурга в пятнадцати минутах ходьбы от метро Пионерская, по адресу: Богатырский проспект, д.3. корп.3.

### 3.2. Расчет основных элементов конструкции эталонного объекта.

Полученные данные расчетов несущей конструкции рассматриваемого здания в дальнейшем будут служить в качестве эталонных показателей для сопоставительного анализа последующих «деревянных» моделей.

Расчет здания был выполнен с помощью системы конечно-элементного анализа Лира-Сапр, а расчет спроектированных концепций с помощью Autodesk Robot Structural.

Основой инженерного расчета является метод конечных элементов в качестве неизвестных используются перемещения и повороты узлов расчетной схемы. Поэтому конструкция идеализируется, для использования данного метода, а именно: конструкция представляет собой набор тел стандартного типа (пластин, стержней, оболочек и т.д.), которые являются конечными элементами и соприкасаются в узле.

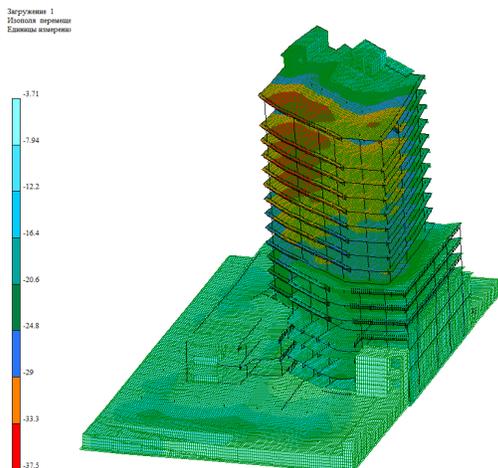


Рис. 3. Максимальные вертикальные перемещения(мм).

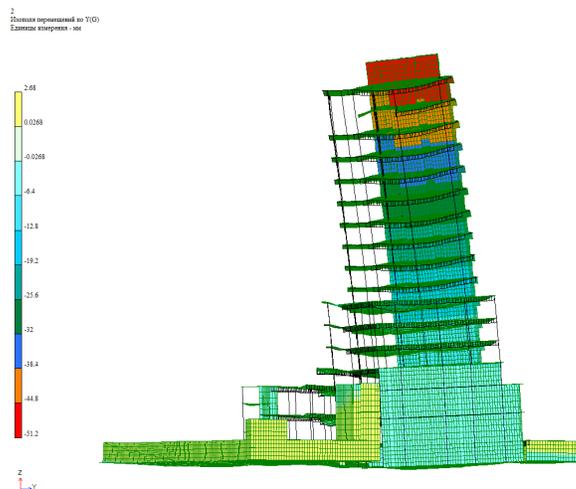


Рис. 4. Максимальные горизонтальные перемещения по оси Y (мм).

После проведения расчетов эталонного здания с помощью инженерно-строительного программного комплекса «ЛИРА-САПР» рассчитаны основные несущие конструкции.

### 3.3. Разработка пяти концепций зданий

Для анализа усилий, возникающих в элементах конструкции, были разработаны пять вариантов конструкций многоэтажного дома из дерева с различными вариантами устройства несущих элементов. Каждая предложенная концепция имеет свой набор конструктивных элементов, которые объединяются в различные конструктивные системы.

В разработке концепций было принято оставить центральное ядро жесткости из железобетона для придания дополнительной жесткости здания. В дальнейшем при подборе размеров поперечных сечений все компоненты рассчитаны с учетом требований пожарной безопасности и обеспечивают степень огнестойкости R90.

**Концепция № 1.** Концепция №1 имеет несущие элементы, материал которых является древесина, образуют каркасно-ствольную конструкцию. Расположение несущих элементов повторяет расположение элементов несущей системы эталонного офисного здания из монолитного железобетона. Перекрытия разработанной концепции выполнены из CLT-панелей. Но стоит отметить, что перекрытия из CLT-панелей это единственный тип несущей конструкции, который повторяется в других концепциях.

**Концепция № 2.** Концепция № 2 содержит несущие элементы аналогично Концепции 1, которые также изготовлены из дерева. Отличительной особенностью является добавление диафрагм жесткости при помощи панелей CLT. Это было выполнено для придания конструкции Концепции 1 дополнительной жесткости на всех этажах здания. Таким образом обеспечивая жесткость в двух плоскостях.

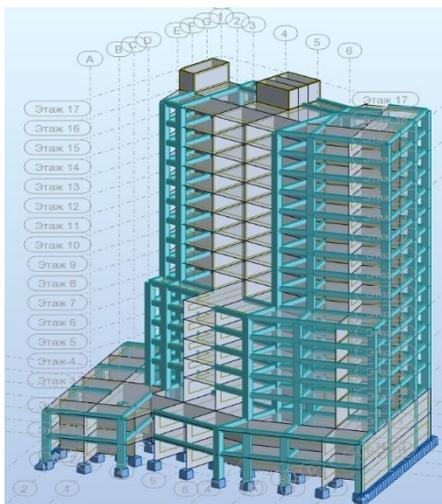


Рис. 5. Расчетная модель Концепции 2.

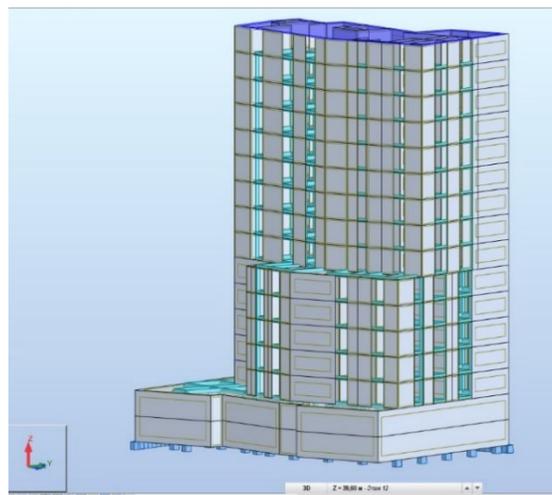


Рис. 6. Расчетная модель Концепции 3.

**Концепция № 3.** Концепция № 3 на рис. 6 имеет внешние ограждающие конструкции, выполненные из панелей CLT. В этом варианте было решено реализовать, помимо вертикальных колонн здания, вариант несущей конструкции здания в виде внешних ограждающих конструкций из панелей CLT толщиной 350 мм. Для придания дополнительной жесткости здания были расположены вертикальные ограждающие конструкции из CLT-панелей, тем самым равномерно перераспределять усилия по всей конструкции здания.

**Концепция № 4.** На рис. 7 продемонстрировано, что несущие элементы Концепции № 4 реализованы из древесины, которые дополнены внешней решетчатой конструкцией. В качестве основы взята несущая система Концепции 1. Для увеличения жесткости конструкции добавлена решетчатая конструкция из деревянных линейных элементов, выполненных из клееных деревянных стержней в виде вертикальных связей, образуя решетку по всей площади здания. Предполагается, что расположение данной решетки будет воспринимать часть вертикальной нагрузки от действия изгибающих усилий, создаваемых как горизонтальной нагрузкой, так и от действия вертикальной

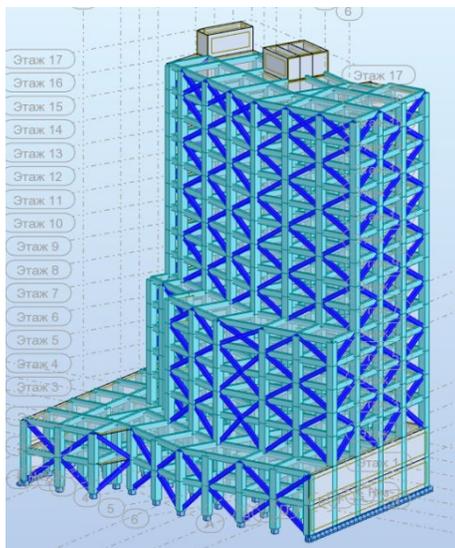


Рис. 7. Расчетная модель Концепции 4.

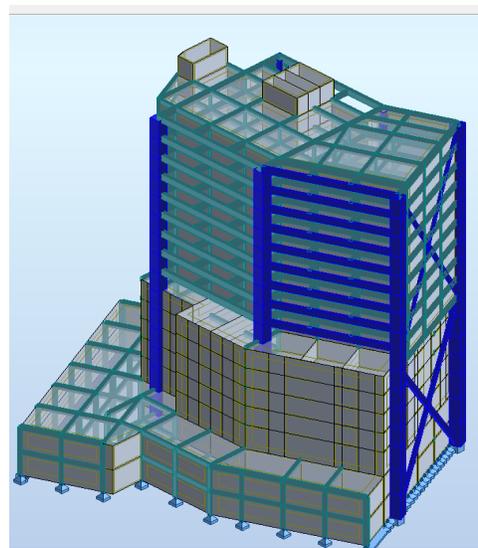


Рис. 8. Расчетная модель Концепции 5.

**Концепция №5.** Несущая конструкция Концепция № 5 состоит из двух основных частей. В качестве основной конструкции служит рамно-связевая система, состоящей из колонн и перекрытий, аналогично Концепции №1. Отличительной особенностью данного варианта является мега рама, располагающаяся снаружи здания, функция которой является увеличение общей несущей способности при действии горизонтальных динамических и частичное восприятие вертикальных нагрузок.

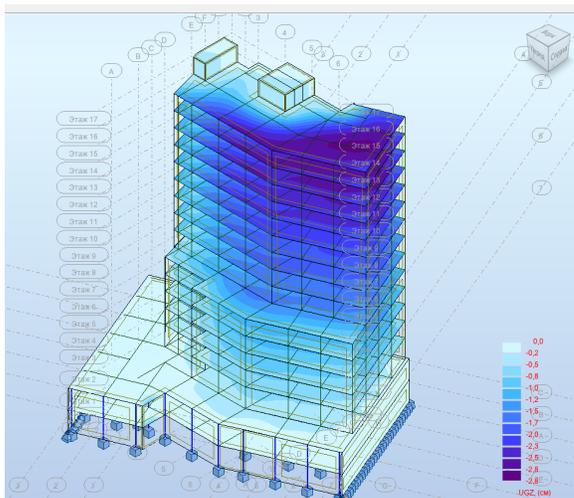
Усилия от основной конструкции будут передаваться через связи, располагающиеся в верхней части здания. Через вертикальные связи нагрузка будет передаваться на второстепенные элементы, после чего нагрузка перераспределяется на вертикальные элементы больших размеров.

Подводя промежуточный итог, для определения целесообразности возведения многоэтажных деревянных зданий был выполнен расчет несущей способности с использованием пакета программ Autodesk Robot Structural. С помощью программного комплекса расчета были получены результирующие значения изгибающих и сжимающих усилий, возникающих в сечениях несущих элементов здания.

#### 4. Сравнительный анализ технико-экономических показателей концепций

**Концепция 1.** По итогу выполнения расчета несущей конструкции Концепции 1 полученные результаты показали, что между несущими элементами от нижнего до верхнего этажа наблюдается равномерное распределение вертикальной нагрузки, что подтверждается результатами расчетов деформации рассматриваемой модели (Рис. 9).

а)



б)

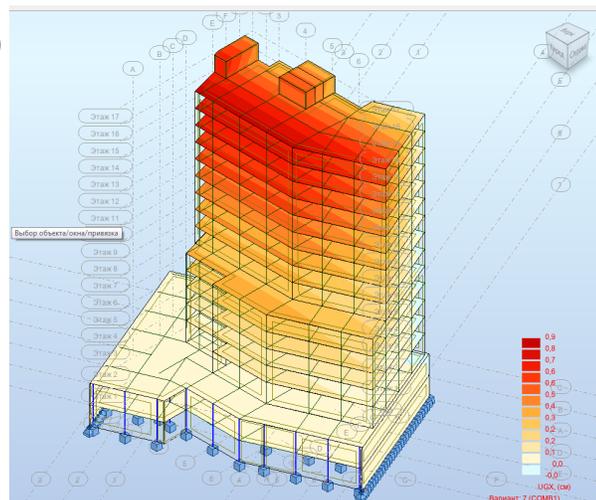


Рис. 9. Диаграмма деформаций Концепции 1.  
а) в вертикальном направлении Z б) в горизонтальном направлении X

Согласно диаграмме продольных усилий несущих элементов Концепции 1 на рис. 10, можно заметить равномерное увеличение вертикальных усилий на нижележащие несущие колонны. Это объясняется простотой конструктивной системы и прямой передачи нагрузки от верхлежащих несущих элементов к нижележащим.

Согласно продемонстрированной диаграмме на рис. 10, на деревянные несущие колонны приходится примерно 40% вертикальных усилий, в то время как 60% приходится на ядро жесткости.

Таким образом ядро жесткости из монолитного железобетона выполняет не только функцию эвакуационного трудногораемого отсека, в котором располагаются эвакуационные пути, но и выполняет функцию ключевой части несущей конструкции многоэтажного деревянного здания, придавая дополнительную жесткость конструкции многоэтажного деревянного здания.

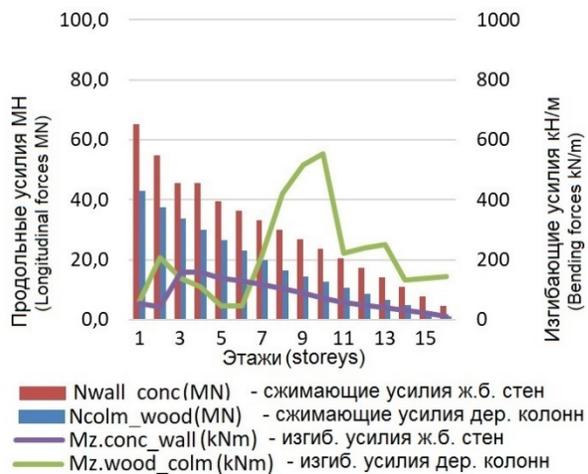


Рис. 10. Продольные усилия Концепции 1.

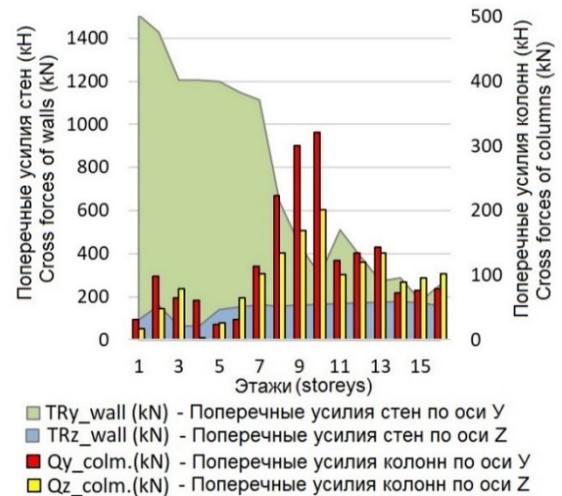


Рис. 11. Поперечных усилий Концепции 1.

На представленной диаграмме продольных усилий на рис. 10 наблюдается неравномерность изгибающих усилий, возникающих в несущих деревянных колоннах здания от действия вертикальных и горизонтальных нагрузок в виде ветрового воздействия на фасад здания. Это связано с отсутствием вертикальных диафрагм жесткости и наличием шарнирного узла крепления колонны. Результаты совместной работы деревянной несущей конструкции и монолитного ядра жесткости отображены на рис. 12.

Помимо анализа вертикальных и изгибающих усилий, возникающих в несущих элементах Концепции 1, также были проанализированы значения поперечных усилий, возникающих в несущих элементах от действия горизонтальных нагрузок. Графическое представление общей картины поперечных сил представлено на рис. 11 в виде диаграммы.

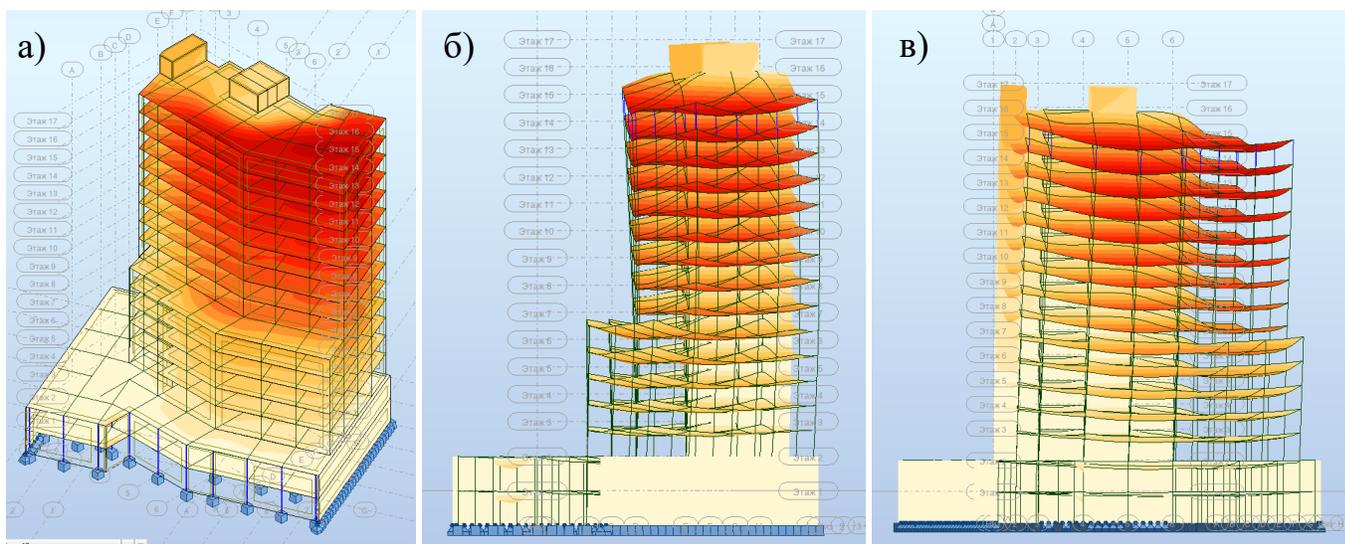


Рис. 12. Моделирование полной деформации Конц. 1. а) Общий вид б) С боку в) Вид спереди

**Концепция 2.** Результаты расчетов несущей конструкции Концепции 2 показали значительное увеличение вертикальной нагрузки на элементы. Из-за массивности деревянных панелей CLT несущая конструкция здания стала тяжелее по сравнению с первым вариантом. Как и в первом варианте, наблюдается равномерное распределение всех вертикальных нагрузок между конструктивными элементами здания от первого этажа до последнего.

Но в отличие от первого варианта большая часть нагрузки приходится на деревянные диафрагмы жесткости. Согласно диаграммы продольных усилий, порядка 50% нагрузки приходится на деревянные диафрагмы из CLT панелей.

**Концепция 3.** Наблюдается небольшое увеличение вертикальной нагрузки на железобетонное ядро жесткости. Аналогичную ситуацию с перераспределением нагружения наблюдали в Концепции 1. Приблизительно половины нагрузки отводиться на монолитное ядро жесткости. Остальная нагрузка перераспределяется между несущими колоннами и внешними деревянными стенами.

Согласно графику продольных сил элементов 23% вертикальной нагрузки приходится на деревянные колонны, 62% приходится на монолитный железобетонный сердечник жесткости и 15% приходится на деревянные наружные стены из панелей CLT.

#### Концепция 4

После расчета элементов Концепции 4 стоит отметить, что нет никаких изменений с точки зрения вертикальных нагрузок по сравнению с Концепцией 1. Распределение вертикальных нагрузок по этажам имеет аналогичную тенденцию к увеличению от верхних к нижним этажам Концепции 1. Это связано аналогичным расположением вертикальных конструкций и с незначительным весом

дополнительных диагональных связей, которые вносят небольшой вклад в общий вес всей конструкции Концепции 4.

Согласно анализу продольных сил элементов Концепции 4 40% вертикальной нагрузки приходится на деревянные колонны, а 60% приходится на железобетонный сердечник аналогично распределения Концепции 1. Решетчатая конструкция в данном случае является вспомогательным элементом несущей системы, выполняющая роль некоего стабилизатора в виде решетчатой оболочки, распределяющего приложенные силы между элементами конструкции.

**Концепция №5.** Конструируя модель Концепции 5, было решено совместить применяемые технологические решения ранее рассмотренных Концепций.

Таким образом в качестве основы была взята несущая система первой Концепции. Расположение несущих элементов в виде деревянных колонн, перекрытий и ядра жесткости было принято выполнить аналогично первой модели.

На основе результатов анализа усилий в несущих элементах первой модели, для придания конструкции дополнительной жесткости и увеличения несущей способности к боковым нагрузкам, было принято нижнюю часть здания усилить диафрагмами жесткости из CLT панелей согласно Концепции 2. Для распределения изгибающих усилий, было принято решение выполнить внешние несущие стены нижней части здания также из CLT панелей.

В первоначальных моделях нагрузка от веса воспринимаемой нагрузки и от вышележащего этажа передавалась на нижележащие конструкции. Вследствие чего необходимо увеличивать размеры сечения элементов для придания необходимой несущей способности, что ограничивает производство данных элементов.

Для уменьшения нагрузки на первые этажи, верхнюю часть здания реализовано стоечно-балочная система. Для передачи нагрузки от верхней части конструкции была смонтирована внешняя несущая конструкция в виде внешней рамы из вертикальных деревянных колонн большого сечения и внешней дополнительной решетчатой конструкции из горизонтальных балок увеличенного размера, воспринимая нагрузку от каждого этажа и передавая на внешние колонны большого размера «мега рама» (см. рис. 13).

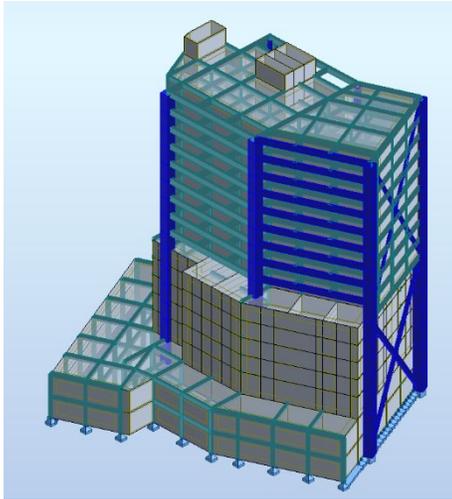


Рис. 13. Расчетная модель Концепции 5.1

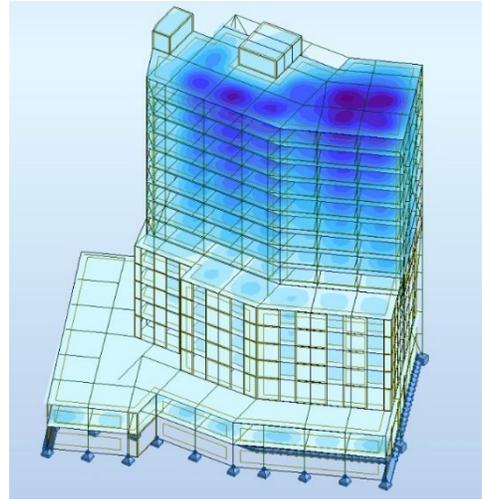


Рис. 14. Распределения деформаций.

Подводя промежуточные выводы результатов расчетов возникающих усилий в несущих элементах Концепции 5, стоит отметить, что частично удалось добиться поставленных задач по данной Концепции, которые заключались в уменьшении деформации конструкции и равномерном распределении усилий.

При разработке концепции предполагалось, что нагрузка от элементов и воспринимаемой нагрузки этими элементами будет передаваться на внешнюю раму, а не на несущие конструкции нижней части здания. Согласно диаграммы продольных усилий передача усилий от внутренних колонн в верхней части осуществляется к стенам в нижней части, что противоречит ранее обозначенному.

Для выполнения поставленных задач необходимо добиться максимально разгрузки нижней части здания, путем передачи нагрузок от верхней части здания через внешнюю несущую раму. Поэтому было решено максимально разделить здание на две части. Несущие колонны 8-го этажа, передающие часть нагрузки на нижележащий этаж, были полностью убраны. Для компенсации отсутствия колонн перекрытие между 8 и 9 этажом было усилено балками увеличенного сечения. Для придания жесткости конструкции между 9 и 10 этажом было принято решение установить вертикальные связи, образуя пространственную конструкцию.

После проведения расчетов второго вариант несущей конструкции Концепции 5, в первую очередь хотелось бы отметить увеличение вертикальных усилий возникающих в несущих колоннах мега рамы. На 7-м этаже происходит скачок вертикальных усилий, после чего данные значения почти остаются на протяжении 6 этажей с небольшим уменьшением значений. Объясняется данный факт тем, что для придания монолитности конструкции, колоны мега рамы пришлось соединить горизонтальными связями с нижней частью здания, таким образом минимальная часть нагрузки

перешла на несущие элементы нижней части. Также в области 7-го этажа, по сравнению с первым вариантом, наблюдается заметное уменьшение значений вертикальных усилий в деревянных стенах конструкции.

Кардинальных изменений вертикальных усилий ядра жесткости по сравнению с первым вариантом Концепции 5 обнаружено не было, равномерность значений вертикальных усилий от верхних до нижних этажей осталась прежней.

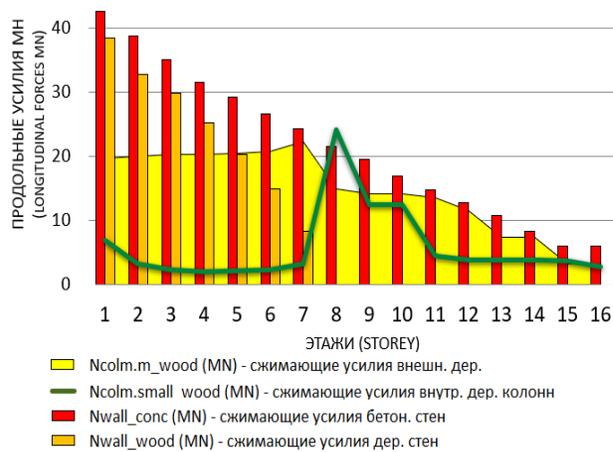


Рис. 15. Продольные усилия Концепции 5.2

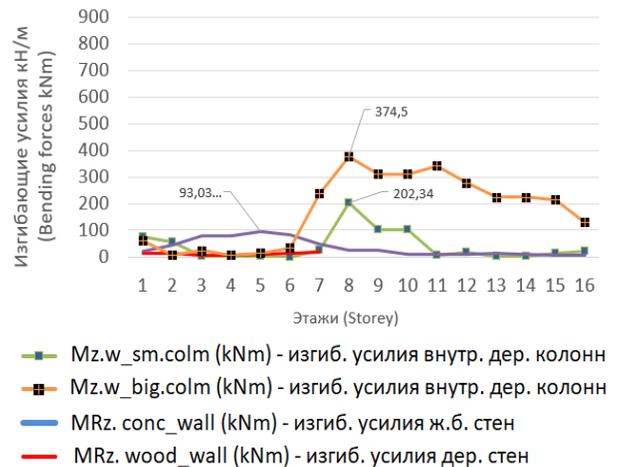


Рис. 16. Изгибающие усилия Концепции 5.2

Но при детальном анализе диаграммы изгибающих усилий концепции на рис. 16, наблюдается рост значений в верхней части здания. Связано это с полным разделением здания на две части. Так как было принято решение добиться полного исключения передачи нагрузки от верхней части здания к нижней, посредством исключения внутренних деревянных колонн здания на 8-м этаже, наблюдается значительное увеличение изгибающих усилий вертикальных несущих элементов внешней рамной конструкции.

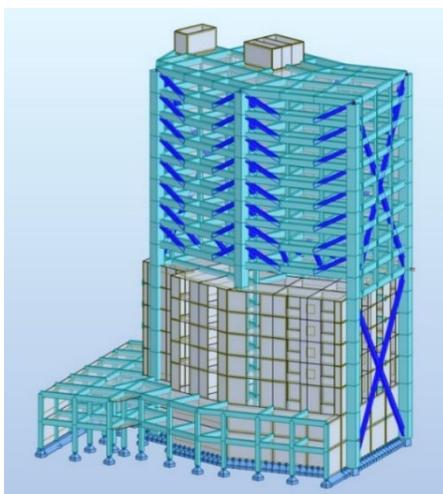


Рис. 17. Расчетная модель  
Концепции 5.2

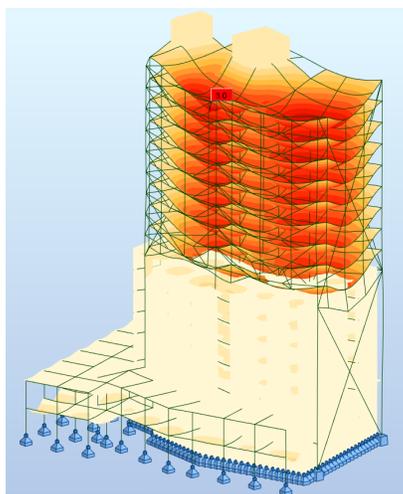
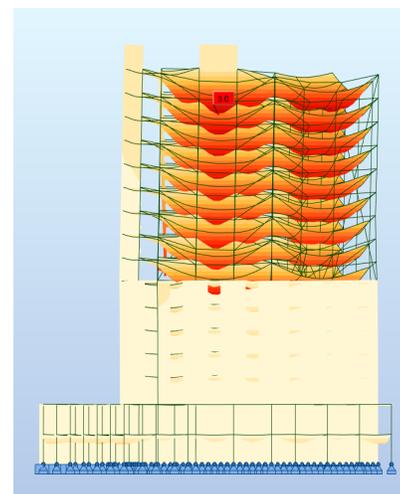


Рис. 18. Моделирование деформации Концепции 5.  
а) Общий вид б) Вид спереди



В то же время, анализируя деформаций конструкции на рис. 18 **Ошибка! Источник ссылки не найден.**, наблюдается положительная динамика с точки зрения горизонтальных деформаций. Предполагается, что внешняя несущая рама воспринимает не только вертикальные нагрузки, но также за счет устройства вертикальных связей большого размера удалось добиться увеличения дополнительной жесткости конструкции в верхней части здания.

**Итог исследования.** Рассмотрев результаты расчетов разработанных моделей многоэтажных деревянных зданий, можно с большой долей уверенности сказать, что одна из поставленных задач по разработке деревянных зданий решена. Исходя из анализа полученных результатов расчетов, вот несколько ключевых моментов для каждой рассматриваемой модели:

**Концепция 1.** Согласно диаграммы поперечных усилий Концепции №1 большой вклад в общую устойчивость к горизонтальным воздействиям вносит монолитное ядро жесткости (Рис. 11). Но стоит отметить, что ядро жесткости плавно воспринимает поперечные силы от колонн с 8-го этажа. С 8-го по 16-й этажи деревянные колонны способствуют устойчивости несущей конструкции под действием горизонтального ветрового воздействия.

**Концепция 2.** В связи с добавлением диафрагм жесткости в конструкцию Концепции 2, изгибающие моменты между колоннами удалось равномерно распределить между собой по сравнению с результатами Концепции 1.

Стоит отметить, что большую часть нагрузки воспринимают деревянные стены. Общее распределение всей вертикальной нагрузки между элементами на деревянные колонны составляет 5%, 40% приходится на монолитное железобетонное ядро и 55% - на деревянные внутренние стены из CLT панелей.

**Концепция 3.** Согласно графику изгибающих усилий элементов Концепции 3 из-за незначительного увеличения массы несущей конструкции, наблюдается незначительное увеличение изгибающих усилий. Значения изгибающих усилий колонн и монолитного ядра жесткости имеют более равномерный характер по всей высоте здания из-за придания дополнительной жесткости посредством устройства внешних деревянных стен.

#### **Концепция 4**

Рассматривая Концепцию 4, удалось снизить значения изгибающих усилий в элементах по сравнению с Концепцией 1 при помощи добавления диагональных связей на фасаде здания. Но добиться значительного распределения изгибающих усилий элементов конструкции не удалось.

**Концепция 5.** Разработка несущей конструкции Концепции 5 выполнялась с учетом результатов проведенных расчетов несущих систем предыдущих моделей, совмещая положительные стороны применяемых ранее технологических решений.

Разработанная модель показала равномерное распределение как вертикальных, так и изгибающих усилий между всеми несущими элементами.

После оптимизации Концепции 5, удалось добиться переноса почти всей части нагрузки на внешние деревянные колонны, разгрузив нижнюю часть здания, а также добиться уменьшения горизонтальных деформаций здания.

Анализируя диаграмму вертикальных усилий Концепции 5, было замечено, что величины воспринимаемых вертикальных усилий внешними несущими деревянными колоннами и монолитным ядром жесткости почти равны, а в нижней части даже превышают. Поэтому было решено выяснить какая доля полезной нагрузки приходится на внешние деревянные колонны, а какая доля на монолитное ядро жесткости.

После разделения собственного веса конструкции и воспринимаемой нагрузки процентное отношение значительно поменялось. Так от всей воспринимаемой нагрузки внешняя несущая рама воспринимает порядка 70–80%, а монолитное ядро жесткости 25–40%. Остальное это вес самих конструкций. Это объясняется удельным весом несущей конструкции. Плотность монолитного железобетона выше плотности древесины в три раза, но нагрузку, которую может воспринять древесина 1,5–2 раза. Данное разделение показана диаграмме продольных усилий Концепции 5 на рис. 19.

В заключении проведенных исследований стоит отметить, что согласно представленных выше диаграмм усилий и напряжений несущих деревянных элементов каждый рассматриваемый

вариант несущей конструкции, где в качестве основного материала выступает дерево, имеется ряд плюсов и минусов, но в сочетании которых можно добиться желаемых результатов.

### Технико-экономический анализ конструкции.

Для первоначальной оценки целесообразности конструкции с экономической точки зрения, возможно сравнение общей массы конструкции, т. к. от количества применяемого материала зависит окончательная стоимость реализации проекта.

Согласно рис. 20, большая часть веса приходится на нижнюю половину здания. Самая тяжелая конструкция получилась у Концепции №5. Большой вес обосновывается применением дополнительной внешней конструкции.

Самыми легкими конструкциями являются Концепции №1; №3; №4 (стоечно-балочная система, внешние стены, с внешними диагональными связями). Промежуточное значение веса конструкции имеет Концепция №2, где применялись внутренние диафрагмы жесткости из дерева.

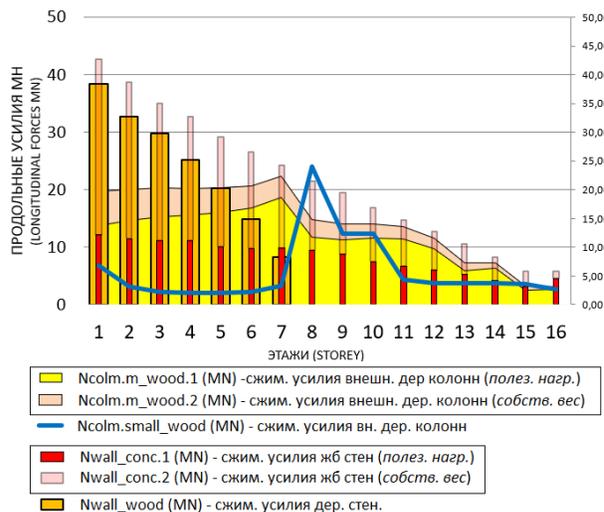


Рис. 19. Разделение продольных усилий несущих элементов Концепции 5.2

Для анализа распределения веса несущих конструкций Концепций была составлена диаграмма, отражающая разделение веса между всеми несущими элементами Концепций (см. Рис. 21). Большая часть веса относится к железобетонному ядру жёсткости, что объясняется большой плотностью применяемого материала.

Исходя из анализа веса конструкции на рис. 21 самая легкая несущая конструкция является Концепция 1, так как применяется минимум конструктивных элементов. Напомним, что данный вариант несущей конструкции полностью повторяет несущую конструкцию эталонного образца из монолитного железобетона, вес которого в два раза больше деревянного аналога и составляет 14,4 тыс. тонн.

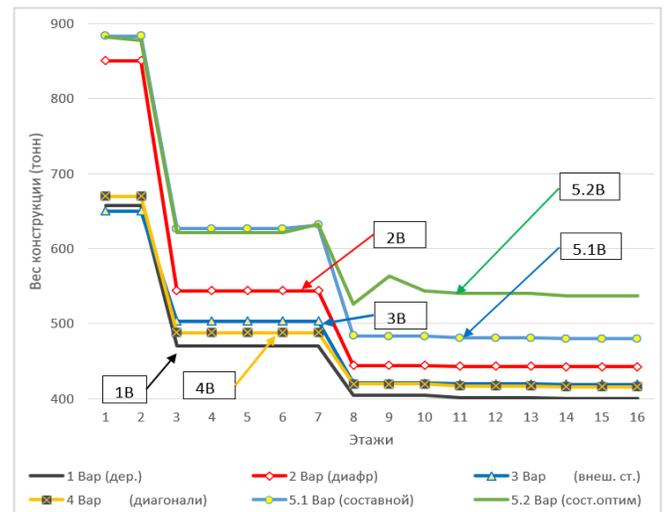


Рис. 20. Распределение общего веса Концепций.

Помимо веса, итоговая стоимость возведения зависит от количества элементов, из которых состоит конструкция здания. Ведь общее количество элементов дает представление о количестве манипуляций во время строительства, таких как доставка, подъем элемента на этаж и дальнейшая установка и монтаж.

Для этого было просуммировано количество всех несущих элементов рассматриваемых Концепций. Результаты количественного анализа элементов конструкции представлены на рис. 22.

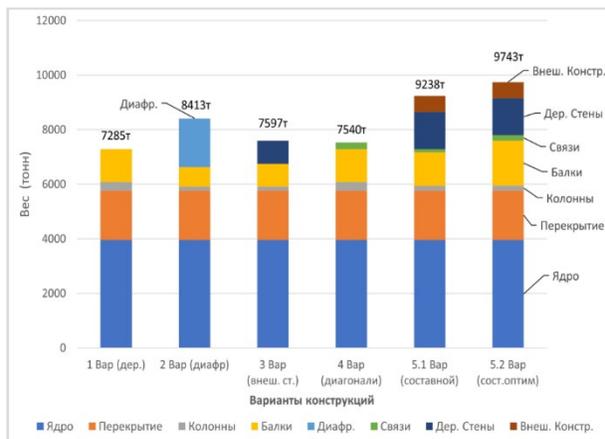


Рис. 21. Распределение общего веса конструкций деревянных зданий.

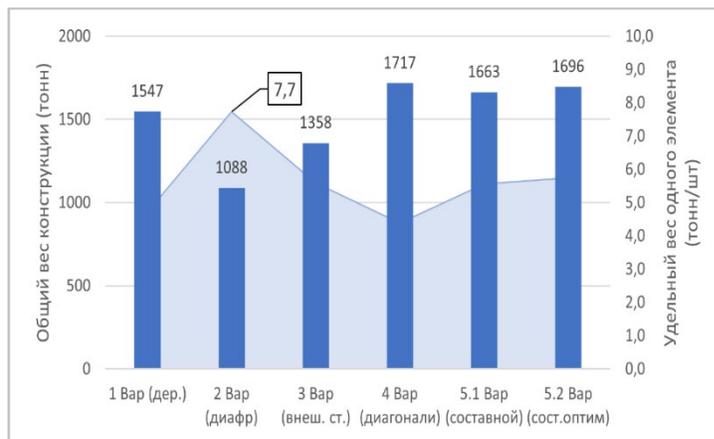


Рис. 22. Диаграмма веса и количества элементов несущей конструкции Концепций

**Анализ деформации конструкции.** В соответствии с нормативными требованиями и правилами проектирования высотных здания, предельные горизонтальные перемещения верха высотных зданий определяются эстетико-психологическими, психофизиологическими и технологическими требованиями и устанавливаются в зависимости от принятых архитектурно-планировочных решений проектируемого здания и ближайшей застройки.

При расчёте рассматриваемых Концепций был произведен анализ деформаций по различным направлениям, результаты которых продемонстрированы на рис. 23. В горизонтальном направлении расчет деформаций несущей конструкции здания выполнялся по осям X и Y. В вертикальном направлении расчет деформаций здания выполнялся по оси Z. Суммируя деформации по всем трем направлениям в программном комплексе выполнялся расчет общей деформации конструкции здания.

Согласно представленным результатам на рис. 23 значения горизонтальных деформаций полностью удовлетворяют установленным требованиям. Но стоит отметить, что представленные значения горизонтальных значений установлены без учета деформаций основания здания. Значение допустимой горизонтальной деформации  $h/500$  здания предполагает совместную деформацию несущей конструкции здания и основания здания. При расчете конструкции здания в качестве

фундамента здания было заложено жесткое основание, без возможности деформации и смещения. Таким образом, при дальнейшем проектировании, остается довольно большой запас допустимых горизонтальных деформаций всего здания в целом.

**Динамический анализ.** Поскольку древесина обладает различными динамическими свойствами, а также учитывая высокую степень гибкости высотных зданий, при действии динамической нагрузки несущая конструкция здания может показывать различное динамического поведение. Вибрация и движения здания отрицательно влияют на комфортную обстановку внутри здания, которую ощущают находящиеся внутри люди.

При помощи данной компьютерной программы появилась возможность динамического модального анализа для нескольких режимов колебаний.

Значения, полученные в результате модального расчета конструкции, отображены на рис. 24. В нашем случае полученные значения не должны превышать кривую значений (1) для «Офисных зданий».

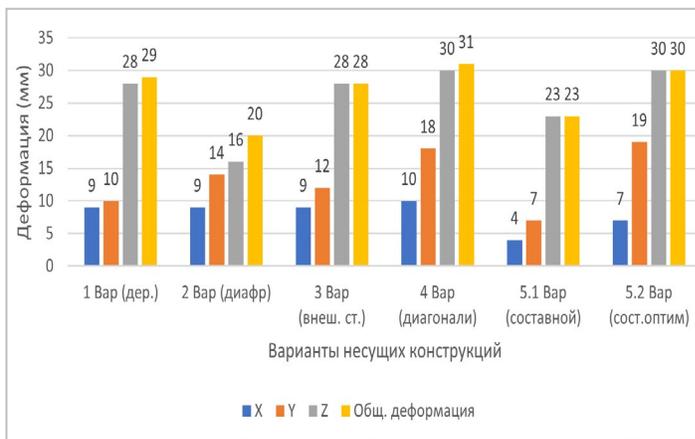


Рис. 23. Деформаций конструкции Концепций.

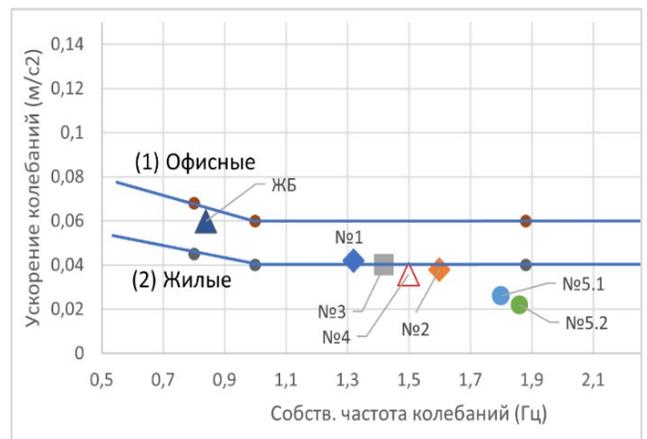


Рис. 24. Результат динамических расчетов.

Согласно полученных результатов на рис. 24, значения частоты собственных колебаний и ускорения несущих конструкций разработанных концепций не превышают допустимые значения для офисных зданий. При сравнении с показателями эталонного образца, значения собственной частоты колебаний конструкций значительно больше железобетонной конструкции.

## 5. Выводы и рекомендации

В данной работе была опущена экономическая часть анализа конструкций и остается вопрос о положении данных конструкций на рынке многоэтажных зданий. Экономическое сравнение ориентировочной стоимости деревянных и аналогичных железобетонных многоэтажных здания освещалось в ранее представленной работе.

В процессе научного исследования выявлено, что основными ограничениями при разработке несущей конструкции деревянного здания являются архитектурные требования, конструктивные проблемы, пожарная безопасность и специфика расчета деревянных конструкций.

К конструктивным проблемам относятся напряжения, возникающие в фундаменте, обеспечение комфорта прибывающих внутри здания людей и проблемы, связанные с особыми свойствами применяемого материала, которые связаны соотношением массы к жесткости или прочности к жесткости деревянных конструкций.

В заключении исследований данного вида строительства стоит обратить особое внимание на то, что одной из основных проблем, которая не освещалась в данной работе, заключается в разности вертикальных перемещений. Это необходимо иметь в виду на начальных этапах реализации проекта всем участникам проекта. В этом случае нужно использовать соединения конструкций воспринимающие данные перемещения, либо предусмотреть мероприятия по уменьшению данной разности перемещений.

## Содержание работы

### Введение

- 1. Анализ существующей ситуации деревянного домостроения в России и за рубежом**
- 2. Исследование конструктивных решений по возведению многоэтажных зданий**
  - 2.1. Внешние факторы влияющие на общее состояние конструкции.
  - 2.2. Физико-механические характеристики разрабатываемой модели
  - 2.3. Конструктивные решения
  - 2.4. Способ сочленение конструкции и несущего ядра жесткости.
  - 2.5. Узлы соединения несущих элементов.
  - 2.6. Пожарной Безопасности (Основные положения).
- 3. Разработка концепций зданий с применением деревянных элементов в несущем каркасе многоэтажного здания**
  - 3.1. Эталонное здание
  - 3.2. Расчет основных элементов конструкции эталонного объекта.
  - 3.3. Разработка пяти концепций зданий
- 4. Сравнительный анализ технико-экономических показателей концепций**
- 5. Выводы и рекомендации**

### Объект и предмет исследования

Объектом исследования выступает смешанный каркас многоэтажного офисного здания, состоящего из деревянных элементов и железобетонного ядра жесткости

Предметом исследования служат прочностные показатели объекта исследования.

### Результаты и их обсуждение

В результате написания научно-квалификационной работы:

- Разработаны конструктивные решения по повышению несущей способности конструктивной системы из дерева многоэтажного здания, удовлетворяющие пожарным требованиям;
- Разработан алгоритм оценки несущей способности конструктивных систем здания при действии комбинаций нагрузок.

- Доказана эффективность применения деревянных конструкций в качестве основных элементов в несущей системе многоэтажного здания.

Цель, поставленная в начале работы, достигнута, задачи выполнены.

Результаты исследований расширяют область применения деревянных конструктивных элементов в строительстве многоэтажных зданий и дают обоснованные методики экспериментальных испытаний путем применения программных вычислительных комплексов и анализа несущей способности строительных конструкций из дерева.

### **Заключение**

Анализируя результаты проведенных исследований прочностных характеристик разработанных Концепций многоэтажных деревянных зданий, каждый рассматриваемый вариант несущей конструкции, имеется ряд плюсов и минусов, но в сочетании которых можно добиться желаемых результатов. Таким образом проведенные исследования по несущей конструкции многоэтажных деревянных зданий показали возможность реализации данных конструкций и конкурентоспособность современным многоэтажным зданиям из монолитного железобетона.

### **Список работ, опубликованных по теме научно-квалификационной работы (диссертации)**

#### **Публикации в изданиях, рецензируемых ВАК**

По теме научно-квалификационной работы Коновалова М.А. сформировано 2 работы, которые на момент защиты научно-квалификационной работы опубликованы в изданиях ВАК РФ:

- Коновалов М.А., Козинец Г.Л. Алгоритм разработки расчетной модели деревянного многоэтажного здания // Вестник МГСУ. 2022. Т. 17. Вып. 4. С. 463–475. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.4.463-475.
- Коновалов М.А. Использование деревянных конструкций в качестве альтернативной замены железобетонным конструкциям в многоэтажном здании // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2022. № 6. С. 17–24. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-7-6-17-24

А также сформирована 1 работа, которые на момент защиты научно-квалификационной работы находятся в печати в изданиях Scopus:

- M Konovalov, G Kozinets. Prospects for the multi-storey buildings construction using wooden structures. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 698 (2019) 022062 doi:10.1088/1757-899X/698/2/022062