

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный институт
институт
Строительные конструкции и управляемые системы
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
С. В. Деордиев
подпись инициалы, фамилия
«__» _____ 20__ г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Исследование НДС каркасов многоэтажных зданий из CLT панелей при
действии особых нагрузок

Тема

08.04.01 Строительство

код и наименование направления

08.04.03.01 Теория и проектирование зданий и сооружений

код и направление магистерской программы

Научный руководитель	_____	доцент кафедры канд.техн.наук	<u>Н. И. Марчук</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>В. В. Одегов</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	_____	_____
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Красноярск 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. Современное состояние проектирования многоэтажных зданий из древесины перекрестно клееной.....	4
1.1 Обзор многоэтажных объектов из древесины перекрестно клееной	7
1.2 Нормативная документация по многоэтажному строительству из CLT....	12
1.3 Свойства древесины перекрестно клееной	13
1.4 Структура CLT панелей.	17
1.5 Методики расчета поперечно-клееной древесины.....	20
1.6 Методы расчета многоэтажных зданий из CLT.....	24
Выводы по 1 главе:	28
ГЛАВА 2. Анализ расчета CLT плит перекрытия с учетом ортотропных и изотропных свойств древесины.....	29
2.1 Моделирование материалов. Ортотропная упругость.	29
2.2 Расчет CLT панели перекрытия.....	31
2.3 Расчет панелей из CLT в ПК Ansys.....	34
2.4 Расчеты CLT плиты в ПК ЛИРА 10.12.	43
2.5 Топологическая оптимизация CLT плиты перекрытия.	45
2.8 Параметрическая оптимизация по материалу.....	53
Основные выводы по 2 главе	56
ГЛАВА 3. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ НДС ДЕРЕВЯННОГО МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ ИЗ CLT ПАНЕЛЕЙ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ.....	57
3.1. Разработка пространственной расчетной модели многоэтажного здания из CLT панелей ПК ЛИРА 10.12	57
3.2. Статический расчет.....	62
3.3. Расчет на сейсмические воздействия линейно- спектральным методом (по СП 14.13330.2018 г).	72
3.4. Расчет на действие акселерограмм	84
3.5 Разработка пространственной расчетной модели многоэтажного каркаса здания	94
3.6. Расчет на сейсмические воздействия линейно- спектральным методом (по СП 14.13330.2018 г)	104
Основные выводы по 3 главе.....	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	129

Список использованных источников	131
ПРИЛОЖЕНИЕ А Физико-механические характеристики CLT панелей	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Б - Сертификаты соответствия CLT панелей	137

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы:

На сегодняшний день существует неоспоримый факт, что Россия является самой крупной лесной державой в мире. По площади лесов Российская Федерация занимает лидирующую позицию в мире. Запасы древесины в России составляют одну четвертую часть мировых запасов леса, а их общее количество, пригодное для рубки, — 1,4 млрд м³, при этом ежегодный прирост — 830 млн м³ [1]. Общий экспорт по основной продукции лесопромышленного комплекса (ЛПК) России в 2019 г. составил около 12,3 млрд долл., основными экспортно-ориентированными секторами были изготовление пиломатериалов (экспорт составил почти 80 % общего производства) и древесных плит (экспорт более 40 %, главным образом за счет березовой фанеры) [2].

Однако несмотря на наличие таких запасов ресурса древесины деревянное домостроение в России не является:

- динамично развивающимся сектором жилищного строительства;
- драйвером развития российского ЛПК.

Одной из основных причин увеличения экспорта древесины – это «эко-бум» за рубежом. Именно там древесина подвергается глубокой и безотходной переработке и именно там формируется максимальная добавленная стоимость этого ресурса.

Мировой опыт показывает, что деревянное домостроение является дешевой, быстро возводимой, экологичной и удобной технологией строительства [3-7]. Наибольшее использование древесины в качестве основы при строительстве домов отмечается в США (95%), Финляндии (90%), Канаде (83%), Швеции (78%), а в России всего (12%) [8-9]. Канада, Финляндия и Швеция являются лидерами по объему экспорта деревянных домов заводского изготовления. Доля экспорта в лесной промышленности Финляндии находится на уровне 22% от всего экспорта страны на 2019 [8].

В связи с появлением первых многоэтажных зданий из перекрестно клееной древесины (CLT) в России и растущей популярностью на многоэтажные здания из клееной древесины по всему миру, проблема обеспечения их безопасности при землетрясениях является одной из важнейших и особенно прогноз их поведения при сильных землетрясениях.

Действующая нормативная и методическая литература по расчету и проектированию деревянных многоэтажных зданий с различными типами конструктивных схем еще находятся на стадии проработки, а такие вопросы, как учет ортотропной структуры CLT многоэтажных зданий и их расчёт на сейсмические воздействия недостаточно изучены. В связи с этим, возникает необходимость проведения расчетов, анализа и исследования НДС многоэтажных зданий из CLT панелей применительно к условиям Сибири на статические и сейсмические воздействия различной интенсивности.

Степень разработанности проблемы: Исследованием физико-механических свойств древесины занимались: Е.К. Ашкенази, Ф.П. Белянкин, С.И. Ванин, В.Н. Глухих, А.Б. Губенко, Д.И. Журавский, В.И. Жаданов, Е.М. Знаменский, А.М. Иванов, Ю.М. Иванов, И.С. Инжутов, А.В. Калугин, Г.Г. Карлсен, Л.М. Ковальчук, А.М. Копейкин, Б.В. Лабудин, Н.Л. Леонтьев, В.И.

Объект исследования: многоэтажные (панельное и каркасное) здания, выполненные из CLT панелей и клееных деревянных конструкций.

Предмет исследования: Напряженно-деформированное состояние (НДС) многоэтажных зданий из CLT панелей и клееных деревянных конструкций.

Методы исследования: теоретический анализ и конечно-элементное моделирование многоэтажных деревянных зданий в расчетных программных комплексах; статистическая обработка полученных материалов исследования.

Цель работы: Анализ и исследование напряженно-деформированного состояния многоэтажных деревянных зданий, выполненных из CLT панелей, при сейсмических воздействиях.

Задачи:

-Обзор существующих решений в области расчетов многоэтажных зданий из CLT панелей.

-Численные исследования напряженно деформированного состояния ортотропных CLT панелей с элементами оптимального проектирования.

-Численные исследования напряженно-деформированного состояния зданий из CLT панелей (стенной и каркасной конструктивной схемы) с учетом конструктивных решений, на действие сейсмических нагрузок.

-Анализ и сопоставление результатов численных исследований многоэтажных зданий из CLT панелей различной конструктивной схемы, при действии сейсмической нагрузки и рекомендации по их расчету и конструированию.

Научная новизна:

-Разработаны конечно-элементные модели многоэтажных зданий из CLT панелей с учетом ортотропных свойств древесины и результаты численных исследований при сейсмических воздействиях различной интенсивности.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы представлены на международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: Проспект Свободный» СФУ (г. Красноярск, 2022г.).

На защиту выносятся:

-Разработаны конечно-элементные модели многоэтажных зданий из CLT панелей

-Результаты оптимального проектирования CLT панели с учетом ортотропных свойств материала

-Результаты численных исследований НДС многоэтажных зданий из CLT панелей при действии сейсмической нагрузки, в соответствии с действующими строительными нормами на территории РФ.

Глава 1. Современное состояние проектирования многоэтажных зданий из древесины перекрестно клееной

1.1 Обзор многоэтажных объектов из древесины перекрестно клееной

Древесина – возобновляемый природный материал, применяемый во многих отраслях промышленности и народного хозяйства. Применение древесины в строительстве растет за последние годы. По данным Росстата, в 2020 году объем ввода деревянных домов составил 9350 тысяч м², что на 520 тысяч м² (+5,9%) больше, чем в 2019 году. Доля деревянного домостроения в России к 2025 году может вырасти до 20%, заявил глава Минпромторга Денис Мантуров в ходе «правительственного часа» в Госдуме. По его словам, Минпромторг нацелен на увеличение объёмов деревянного домостроения. Первые многоэтажные деревянные дома появятся в Вологодской области. Строит их Segezha Group. В апреле Segezha Group получила разрешение на строительство первых в России многоквартирных многоэтажных домов из CLT-конструкций собственного заводского производства. Речь идет о двух четырехэтажных домах. Их общая площадь — 3,5 тыс. кв. м, высота зданий — 15 м. «За счёт масштабирования подобных проектов мы рассчитываем к 2025 году увеличить применение продукции деревянного домостроения в жилищном строительстве с нынешних 10% до 20%», — сказал Денис Мантуров [10].



Рисунок 1.1 - Визуализация многоэтажных домов из CLT в Соколе Вологодской области (Фото: Segezha Group)

Дерево как строительный материал сейчас набирает высокие темпы развития. Во многих ведущих странах строят жилые и общественные здания из деревянных конструкций. Чаще всего при строительстве таких объектов используют клееную древесину, в частности панели из CLT и LVL брус. Примером таких сооружений является объект Brock Commons в Канаде. У проекта Brock Commons несколько особенностей. Во-первых, это не элитная жилая и не коммерческая недвижимость, как большинство построенных до сих пор высотных деревянных зданий. Brock Commons - университетское общежитие. Стоимость строительства проекта не должна быть слишком высокой и существенно превышать затраты на строительство такого же класса объектов из традиционных строительных материалов. При этом инновационные технологии, а также деревянное домостроение с отсылкой к природоохране и экологии - значимые для имиджа университета факторы. Поэтому, во-вторых, был выбран проект с гибридной конструкцией. Бетон выбран в качестве материала для фундамента, цокольного этажа и несущих башен, обеспечивающих боковую устойчивость. Каркас, межэтажные перекрытия 17-деревянных этажей изготовлены из инженерной древесины (деревянный клееный брус и многослойные плиты - CLT панели), обшивка и оконные блоки - металл и деревокомпозиты (панели ДВП), каркас крыши и кровля — металл [11].

Brock Commons имеет деревянный каркас, который формируют колонны из клееной балки (Glulam) с предустановленными узлами быстрого соединения. Межэтажные перекрытия образуют панели (2,85x4,0 м) из пятислойной перекрестно-клееной древесины. Собранный каркас будет надежно перераспределять и выдерживать вертикальную нагрузку от 17 этажей, а ее связи с бетонными колоннами обеспечат передачу на последние боковые нагрузки. Такая конфигурация каркаса и перекрытий как несущих элементов здания позволяет, при использовании древесины, удовлетворить новым

требованиям (2015 года) сейсмоустойчивого дизайна Национального строительного кодекса Канады (National Building Code of Canada).

Стены здания образуют изготовленные заранее фасадные панели с установленными окнами. Каркас панели (длина секции 8 м, высота 2,81 м) - сталь. Термоизоляция - стекловолоконные маты. Облицовка - древесноволокнистые плиты высокого давления с содержанием древесных волокон 70% и термоотверждаемым полимерным связующим. Фасадные панели декорированы под массив дерева или однородный черный матовый строительный материал. Для защиты от непогоды панели ламинированы гидроизоляционным покрытием. Все деревянные конструкции внутри здания защищены несколькими слоями гипсокартона, что существенно повышает уровень пожарной безопасности, а также упрощает отделочные работы.



Рисунок 1.2 - Общежитие в Канаде Brock Commons

Другой известный объект из дерева Мьесторнет был признан Советом по высотным зданиям и городской среде обитания (CTBUH) как самое высокое деревянное здание в мире, а также занесен в Книгу рекордов Гиннеса. Башня также получила множество наград и признаний, таких как New York Design Awards, Norwegian Tech Awards и CTBUH Award of Excellence. 19-этажное деревянное здание было открыто в марте 2019 года и имеет общую площадь около 11 300 квадратных метров. Для гостей отеля Мьесторнетотель имеются апартаменты, офисы, ресторан и места общего пользования, а также

плавательный зал в прилегающей пристройке на первом этаже. Это около 4700 квадратных метров в размере, построенных в древесине [3].

Высота: 85,4 м

Этажность: 18

Площадь: 11 300 м²

Срок сдачи: Март 2019

Производитель CLT-панелей: Moelven

Мьесторнет был разработан норвежской студией Voll Arkitekter для AV Invest. Деревянные конструкции были установлены норвежской фирмой Moelven Limtre, в том числе несущие конструкции из клееного бруса. Поперечные клееные брус использовались для лестничных клеток, лифтовых шахт и балконов.

Поскольку основные вертикальные / боковые конструктивные элементы и системы перекрытий Мьесторнет построены из древесины, здание считается цельнодеревянной конструкцией, которая может включать использование локализованных недревесных соединений между деревянными элементами. Он также может включать в себя недревесные полы, если палубы поддерживаются основной конструкцией, выполненной из дерева (опирающейся на деревянные балки). В Мьесторнете на верхних семи этажах были использованы бетонные плиты, чтобы соответствовать критериям комфорта и акустики.



Рисунок 1.3 – Мьесторнет Tower.

Следующим по высоте деревянным зданием является 24-этажная башня Хохо высотой 84 м (276 футов) в Вене, Австрия. Однако это здание представляет собой деревянно-бетонное композитное здание, поскольку оно имеет бетонное ядро, стабилизирующее здание, согласно определению СТБУН [13].

Высота: 84 м

Этажность: 24

Площадь: 25 000 м²

Срок сдачи: Апрель 2019

Производитель CLT-панелей: HASSLACHER NORICA TIMBER

Также существует ряд жилых домов средней этажности в Швеции, Финляндии, Австрии и других странах Европы.

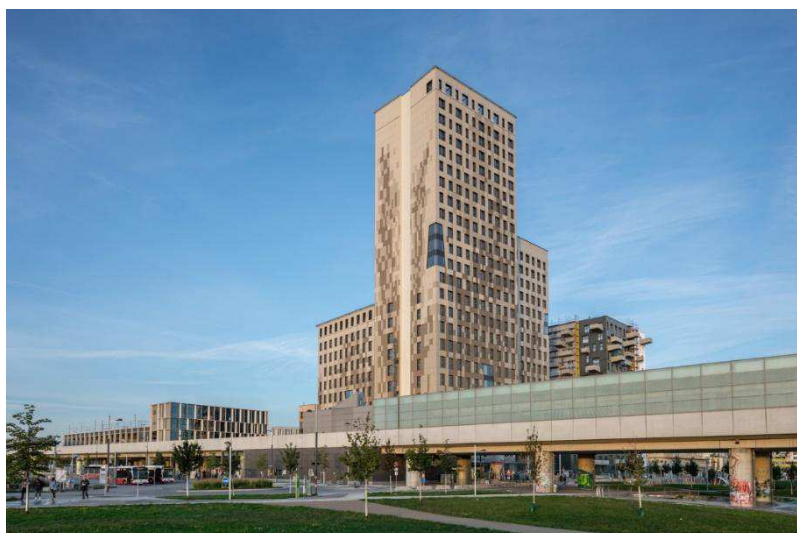


Рисунок 1.4 – Мьесторнет Tower.

Деревянные конструкции уже сейчас могут составить серьезную конкуренцию железобетону и металлу. Это можно подтвердить преимуществами дерева как строительного материала:

- Возможность комбинированной отделки внутренних и наружных стен без подготовительных работ.
- Допустимость использования кросс-брус панелей в межэтажных перекрытиях.
- Возможность реализации любого архитектурного стиля.

- Стабильность размеров и статическая прочность во всех направлениях.
- Возможность 100% отделки и разводки сетей на заводе-изготовителе.
- Низкая теплопроводность (0,13 Вт/мК) и высокая удельная теплоемкость (2,10 кДж/кг).
- Снижение сроков строительства в два раза. Деревянная монолитная плита, склеенная в заводских условиях из высушенной древесины, не требует штукатурки, тем самым позволяя сократить время отделочных работ и сроки ввода здания в эксплуатацию.
- Возможность подбора на заводе лицевых ламелей по породам и сортам для финишной отделки.
- Увеличение внутреннего пространства за счет уменьшения толщины стен (на 1/3 по сравнению с бетоном и клееным брусом).

1.2 Нормативная документация по многоэтажному строительству из CLT

В нашей стране сейчас активно развивается нормативная база в области проектирования конструкций из дерева с 2015 года. За это время выполнено девять научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) по определению нормируемых параметров деревянных конструкций. Для развития деревянного домостроения были приняты 29 стандартов и 6 сводов правил. Среди них два ключевых СП, принятых в 2019 году. Это СП 451.1325800.2019 «Здания общественные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования» и СП 452.1325800.2019 «Здания жилые многоквартирные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования», которые разрешили проектирование зданий с применением деревянных конструкций высотой до 28 метров, вместо ранее разрешенных максимум трех этажей. Разработке нормативных документов предшествовали научные исследования по обеспечению пожарной безопасности.

В 2020-м году выполнялся цикл НИОКР по определению прочностных характеристик новых плит клееных из пиломатериалов с перекрёстным расположением слоёв (CLT). Это новый деревянный строительный материал,

который прессуется в виде большой плиты. Такая плита характеризуется высокой несущей способностью, высокой стабильностью размеров, ударостойкостью, эффективностью звукоизоляции и теплоизоляции, экологичностью. Древесина также может использоваться в качестве заменителя бетонного материала для строительства здания, который изготовлен в блочном виде на заводе.

В этом году также ведутся работы над проектами ГОСТ Р «Плиты клееные из пиломатериалов с перекрестным расположением слоев. Технические условия» и ГОСТ Р «Плиты клееные из пиломатериалов с перекрестным расположением слоев. Методы определения прочностных и упругих характеристик». Кроме того, разрабатываются проект изменений в СП 299.1325800.2017 «Конструкции деревянные с узлами на винтах. Правила проектирования» и проект изменений в СП 382.1325800.2017 «Конструкции деревянные клееные на клеенных стержнях. Методы расчета».

В связи с активной разработкой новых нормативных документов по проектированию многоэтажных домов из древесины перекрестно клееной, исследование напряженно-деформированного состояния многоэтажных зданий из CLT панелей при действии сейсмической нагрузки является актуальным вопросом.

1.3 Свойства древесины перекрестно клееной

CLT панель состоит из нескольких слоев древесины, и её характеристики тесно связаны с механическими свойствами цельной древесины. Для понимания механических характеристик CLT панели, рассмотрим характеристики исходной древесины.

Древесина является органическим, ортотропным материалом со свойствами, оптимальными для внешних воздействий, которым подвергаются деревья. Ствол дерева имеет круглую форму, чтобы противостоять ветровой нагрузке, а его ветви несут на себе листья или иглы, которые участвуют в процессе фотосинтеза. Существенное влияние на ортотропные свойства

древесины оказывает ее анатомическое строение (макростроение). Расположенная между древесиной и корой тонкая прослойка образовательной ткани (камбий) содержит два типа живых начальных клеток (инициалей), из которых преобладающим является тип инициалей, имеющих сильно вытянутую форму и образующих в дереве анатомические элементы, ориентированные вдоль его оси. [14]

Древесина хвойных и лиственных пород состоит из различного набора анатомических элементов, для которых общей является их упорядоченная волокнистая структура. Механическую (опорную) функцию в древесине хвойных пород выполняют в первую очередь трахенды, которые расположены в растущем дереве главным образом вертикально и составляют 90% объема древесины. Строение лиственной древесины несколько менее упорядоченно. Механическую функцию выполняют здесь волокна либриформа и волокнистые трахеиды. Волокнистые трахеиды и волокна либриформа объединяются общим понятием «древесное волокно».

Расположение древесных волокон вдоль оси дерева обуславливает резкое различие механических свойств древесины вдоль и поперек ствола. Это различие усиливается влиянием ориентации микрофибрилл в клеточных стенках и ориентации части молекул целлюлозы в микрофибриллах.

Таким образом, различие в характеристиках свойств древесины вдоль и поперек волокон обусловлено ее макро- и микростроением.

Модули упругости для направления вдоль волокон почти в 40 раз больше, чем поперек (ель), а предел прочности при сжатии в 10 раз, при растяжении в 20-30 раз. Отношения величины модуля упругости вдоль и поперек волокон для древесины хвойных пород в среднем оказывается более высоким, чем для древесины лиственных. Объясняется это менее упорядоченным строением древесины лиственных пород и относительно большим влиянием сердцевинных лучей на их жесткость в поперечном направлении [14].

Напряжение в направлении волокон почти линейно до момента разрушения. Сначала происходит небольшая пластическая деформация, затем

раскалывание и резкое падение несущей способности. Общая форма для растяжения параллельно и перпендикулярно зерну существенно не отличается, за исключением предельной прочности, поскольку предельная прочность в перпендикулярном направлении составляет от 1 до 5% от прочности в продольном направлении. На уровне материала возможны два режима разрушения. Либо волокно разрушается, либо вытягивается из матричного материала. Как правило, при растяжении древесины возникают смешанные режимы разрушения, поэтому результаты испытаний трудно перенести на математические модели. Результаты испытаний необходимо размазать по нескольким испытаниям, чтобы получить среднее поведение. Типичные кривые напряжение-деформация для древесины при растяжении параллельно и перпендикулярно направлению волокон показаны на рисунке 1.4.

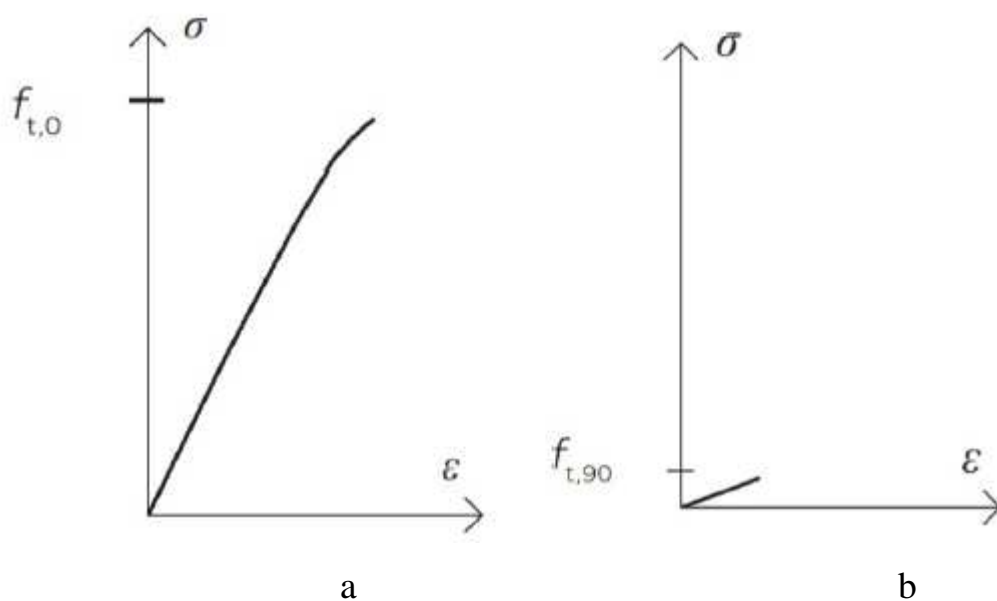


Рисунок 1.4: Типичные кривые напряжение-деформация для древесины при растяжении параллельно (a) и перпендикулярно (b) направлению волокон.

Однако сжатие древесины - это близко к вязкому разрушению. Сжатие в осевом направлении приводит к высокой прочности, с падением текучести и последующим плато [15]. Слишком высокая нагрузка приводит либо к смятию, либо к вдавливанию волокон в другие волокна. При возникновении смятия способность воспринимать более высокие нагрузки снижается, и такое

поведение можно классифицировать как пластификацию. Если клетки древесины сжимаются в перпендикулярном направлении, клетки трубки раздавливаются. Для этого требуется небольшая сила, и, следовательно, при сжатии перпендикулярно волокнам прочность и жесткость низкие. Однако, когда все трубчатые клетки раздавлены, уровень напряжения может снова возрасти из-за уплотнения. Если древесина сжимается под углом к зерну, поведение может быть иным. При угле от 10 до 45° активизация растяжения и сдвига приводит к более хрупким режимам разрушения. Дальнейшее увеличение угла приводит к чистому разрушению при сжатии перпендикулярно зерну. Типичные кривые напряжение-деформация для древесины при сжатии параллельно и перпендикулярно направлению волокон показаны на рисунке 1.5.

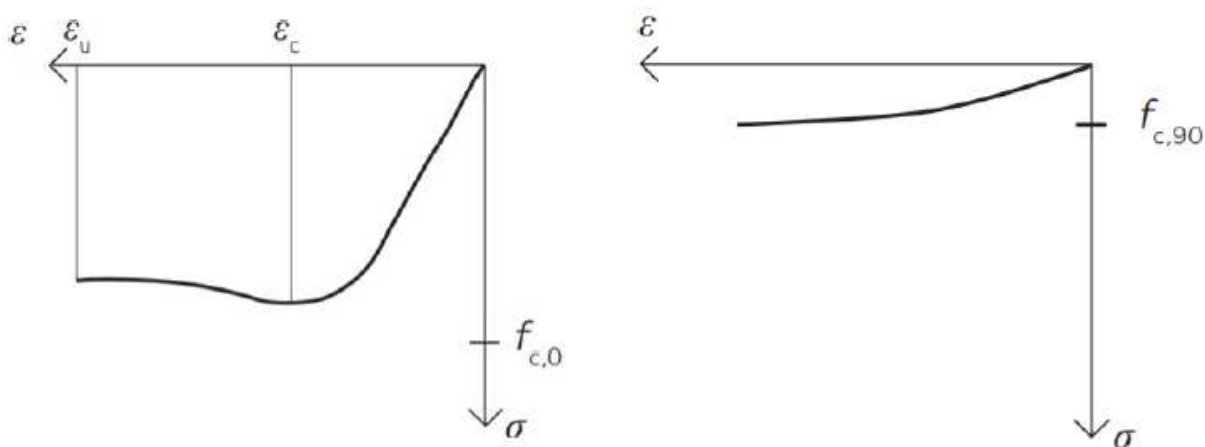


Рисунок 1.5 - Типичные кривые напряжение-деформация для древесины при сжатии параллельно (а) и перпендикулярно (б) направлению волокон [3].

Испытания древесины на сдвиг, скорее всего, являются самыми сложными испытаниями. В зависимости от метода испытания, пики напряжения могут вызвать преждевременное разрушение, а образцам может не быть позволено следовать своим собственным плоскостям разрушения, что может привести к неточным значениям. Масштаб проблемы легко понять, если посмотреть на значения, полученные в результате различных испытаний ели. Van de Kuilen и Leijten [16] приводят среднее значение прочности при сдвиге

9,1 МПа, в то время как Grosse [17] приводит значения от 6,3 до 11,3 МПа. Денцлер и Глос [18] провели испытания согласно EN 408 со склеенными стальными пластинами и получили средние значения от 3,3 до 4,4 МПа. Разброс между представленными значениями довольно высок и составляет от 3,3 до 11,3 МПа. Разрушения при сдвиге обычно хрупкие, как и при растяжении. Разрушение по способу II всегда происходит в плоскости LT или LR и обычно следует за годовыми кольцами. Обычные разрушения при сдвиге обычно следуют зигзагообразной кривой, следуя тангенциальной плоскости и перескакивая в радиальном направлении на другую тангенциальную плоскость. На микроскопической плоскости разрушения при сдвиге демонстрируют тот же механизм разрыва, что и при растяжении перпендикулярно зерну [18].

1.4 Структура CLT панелей

CLT панель включает по меньшей мере три слоя клееных досок или досок, изготовленных из хвойной или лиственной древесины. Каждый слой расположен под углом 90 градусов к следующему. Панели CLT состоят из досок толщиной от 20 до 60 мм, а сырьем служит древесина с классификацией прочности в соответствии с СП 64.13330.2017 деревянные конструкции. Содержание влаги в слоистых материалах должно составлять от 8 до 15 %, когда они склеены вместе. Наилучшее сцепление получается, когда содержание влаги во время использования близко к равновесному, что сводит к минимуму расщепление древесины. Однако некоторое расщепление неизбежно, но обычно это не оказывает никакого вредного воздействия на несущую способность панели. При создании поперечного сечения CLT обычно используется древесина более высокой прочности в поверхностных слоях и в основном направлении нагрузки, где напряжения являются наибольшими [19].

Ортотропные свойства материала древесины и поперечная укладка обеспечивают относительно сложное деформационное поведение CLT. Оно представлено двумерным многослойным композитом с толстыми и сильно анизотропными слоями. Высокое соотношение жесткости в направлении

волокон продольных слоев и низкий модуль поперечного сдвига поперечных слоев вызывают высокие деформации сдвига по толщине пластины. Поперечные деформации сдвига сильно прерывисты на границах раздела слоев, в то время как напряжения сдвига непрерывны и сильно не линейны по толщине [20].

Основной структурной проблемой, связанной с изгибом пластин CLT, является низкая прочность среза поперечных слоев, что приводит к вращению волокон и так называемому разрушению при сдвиге, при прокатке [20]. Явление сдвига при трении, когда на границе раздела слоев возникает плоскость продольного сдвига, часто имеет решающее значение при определении прочности панелей. Прочность на сдвиг и модуль упругости сами по себе зависят от многих факторов, таких как размеры досок CLT и породы древесины. Для количественной оценки модуля сдвига при качении были разработаны различные модели, но ни один единый метод не был принят повсеместно. Описанные выше характеристики материала CLT усложняют надлежащее и точное кинематическое описание материала. Для интенсивного и безопасного использования CLT в тяжело нагруженных конструктивных элементах, задачи на этапе проектирования требуют применения сложных численных моделей [20].

По сравнению с компонентами, изготовленными из конструкционной древесины, компоненты, изготовленные из CLT, обладают большей прочностью и меньшим разбросом значений. Для конструкционной древесины прочность определяется самым слабым поперечным сечением, таким как сучок, зубчатое соединение или какой-либо другой дефект. С другой стороны, в CLT смешивают доски с разной прочностью, и риск того, что у них будет самое слабое поперечное сечение в одном и том же направлении и слой, очень мал. Обычно это называется системным эффектом [20].

Различные способы разрушения CLT панели связаны с анатомией древесины, а также взаимодействием между ее отдельными досками.

Классификацию различных режимов трещин можно увидеть на рисунке 1.6 с описанием ниже.

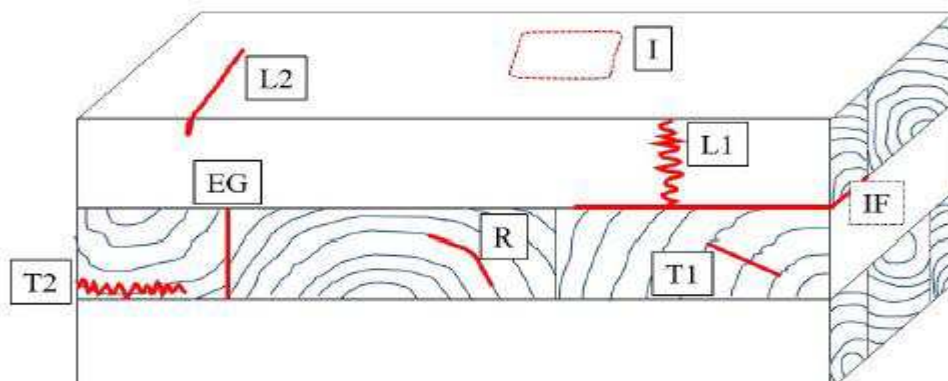


Рисунок 1.6 - Классификация режимов трещин в CLT.

- L1: Разрушение при растяжении в направлении волокон, когда трещина растет перпендикулярно волокнам.
- L2: Разрушение при сжатии в направлении волокон, что приводит к разрушению с перегибом из-за нестабильности клеток древесины.
- I: разрушение при вдавливании перпендикулярно волокнам, часто характеризуется экстремальной пластической деформацией.
- R: Разрушение при растяжении в радиальном направлении, которое в основном происходит в ранних клетках древесины. Разрушение является результатом продольного или скалывающего напряжения сдвига. Поверхность разрушения часто располагается внутри доски, следуя как можно дальше за годовыми кольцами.
- T1: Разрушение при растяжении в поперечном направлении, которое происходит как в ранней, так и в поздней древесине. Разрушение обычно происходит в результате напряжения сдвига качения, с компактной поверхностью разрушения.
- T2: Разрушение при растяжении в поперечном направлении, которое происходит в зоне перехода к соседним плитам и характеризуется почти плоской траекторией трещины.
- EG: Разрушение по слою склеивания досок между собой.
- IF: Разрушение между слоями.

Состоящий из нескольких слоев, CLT является гетерогенным и анизотропным продуктом. Его механические свойства варьируются в зависимости от направления применения силы.

Как правило, режимы разрушения L1 и T2 приводят к глобальному разрушению и отвечают за режим разрушения конструкции. Режимы R и T1 остаются скорее локальными и почти не влияют на эффективную жесткость и прочность [20].

1.5 Методики расчета поперечно-клееной древесины.

В Европе были приняты различные методы для определения жесткости и прочности свойств CLT. Некоторые из этих методов являются экспериментальными по своей природе, в то время как другие являются аналитическими. Другие методы включают в себя сочетание как эмпирических, так и аналитических подходов, основанных на модельных испытаниях. Экспериментальная оценка включает определение свойств при изгибе путем испытания полноразмерных панелей или секций панелей. Проблема с экспериментальным подходом заключается в том, что каждый раз, когда изменяется раскладка, тип материала или любой из производственных факторов меняются параметры, необходимо проводить дополнительные испытания для оценки свойств этих изделий. Аналитический подход, подтвержденный данными испытаний, предлагает более общую и менее затратную альтернативу. Такой аналитический подход может в целом предсказать прочность и жесткость свойства панелей из CLT, основываясь на свойствах материала древесины, из которых состоит панель. В течение последних двух десятилетий были разработаны различные типы аналитических моделей для оценки основных механических свойств панелей из CLT. В данном разделе представлена только основная информация по трем наиболее часто используемым методам [21].

Наиболее распространенный аналитический подход в Европе основан на «Теории механически соединенных балок». Как следует из названия, этот метод был первоначально разработан для балок (например, I или T-образные

балки), соединенных механическими креплениями с определенной жесткостью, равномерно расположенными по длине балки. Этот метод, также называемый методом γ (Гамма), включен в Приложение В Еврокода 5 (EN 2009). Согласно этому методу, свойства жесткости механически соединенных балок определяются с помощью «эффективной изгибной жесткости» $(EI)_{\text{eff}}$, которая зависит от свойств сечения балок и «коэффициента эффективности соединения» γ . Коэффициент γ зависит от жесткости крепежных элементов, при этом $\gamma = 1$ представляет собой полностью склеенный элемент, а $\gamma = 0$ - полное отсутствие соединения. Этот подход обеспечивает только закрытое (определенное) решение для дифференциального уравнения поддерживаемых балок/панелей с синусоидальным распределением нагрузки; однако различия между определенным решением и решением для равномерно распределенной нагрузки или точечной нагрузки минимальны и поэтому приемлемы в инженерной практике. Поскольку панели из CLT являются клееными изделиями, не имеющими механических соединений, потребовались некоторые изменения в теории, чтобы сделать ее применимой. Если мы предположим, что только плиты, ориентированные в продольном направлении, несут нагрузку, то мы можем принять во внимание жесткость на сдвиг поперечных слоев как жесткость (или деформацию) вызванную «воображаемыми крепежными элементами», соединяющими продольные слои. Другими словами, продольные слои панелей из CLT рассматриваются как «балки», соединенные «механическими крепежными элементами» (распорками), жесткость которых равна жесткости сдвиговой деформации поперечных слоев. Этот метод игнорирует влияние сдвиговых деформаций в продольных слоях на общий прогиб панели. В зависимости от компоновки поперечного сечения, доля сдвиговой может составлять до 30% от деформации изгиба. Другим недостатком этого метода является тот факт, что $(EI)_{\text{eff}}$ зависит от пролета и, таким образом, является величиной, зависящей от системы. Кроме того, использование этого метода для

CLT-панелей с общим количеством семь или более слоев требует некоторых модификаций, которые делают его громоздким [21].

Также в Европе был разработан метод «**Аналогии сдвига**», который применим для сплошных панелей с поперечными слоями. Методика учитывает сдвиговую деформацию параллельных и поперечных слоев и не ограничивается определенным количеством слоев в панели. Аналогично методу Гамма, этот метод также использует $(EI)_{\text{eff}}$ при расчете жесткости на изгиб. Деформация сдвига между слоями вводится через новый член жесткости на сдвиг, обозначаемый как $(GA)_{\text{eff}}$. Хотя этот метод не дает «закрытого решения», он достаточно точен для панелей из CLT. По этим причинам данный метод был использован для определения жесткостных свойств панелей из CLT при нагрузке, перпендикулярной лицевой поверхности, как в стандартах PRG 320, так и в стандарте CSA O86.

Теория балок Эйлера-Бернулли широко используется в структурном анализе и проектировании, и в большинстве руководств по проектированию элементов конструкций из любого материала используется исключительно эта теория. Основным недостатком теории балок Эйлера-Бернулли является то, что она неточна для балок с большой высотой сечения, в которых высота сечения не является пренебрежимо малой по сравнению с длиной. Теория балок Тимошенко является расширением теории балок Эйлера-Бернулли, которая включает деформации сдвига и эффекты вращательного изгиба при разработке основных уравнений, что делает ее пригодной для прогнозирования поведения толстых балок и многослойных композитов (балки/плиты), таких как CLT. Теория балок Тимошенко широко используется в Европе и в нескольких специализированных компьютерных программах для CLT [21].

Бласс и Феллмозер (2004) применили «Теорию композитов» (также называемую «к-методом») для прогнозирования некоторых расчетных свойств CLT. Однако этот метод не учитывает сдвиг деформацию сдвига в отдельных слоях. Этот метод достаточно точен для панелей с высоким отношением пролета к глубине.

В 2015 году Шахневаз и др. [22] подтвердили «Теорию механически соединенных балок», сравнив ее с экспериментальными данными испытаний балки и стенки CLT, опубликованными в канадском руководстве CLT. Модель FEA была разработана с использованием Ansys, а соединение между слоями в панели было смоделировано с использованием контактных элементов с высоким коэффициентом трения, основанным на жесткости клея. Модель дала результаты с разницей примерно в 10% по сравнению с экспериментальными данными относительно упругой жесткости. Серрано и Энkvист [23] смоделировали трехслойные панели CLT с усилием сжатия на верхней поверхности. Они заявили, что для более точного анализа следует рассмотреть взаимодействие между отдельными слоями. Они также обнаружили, что при низких нагрузках на границе раздела слоев возникают большие деформации. Чтобы полностью отразить поведение после пика, была предложена модель ортотропного пластичного материала. Богенспергер и др. [24] исследовали разрушение при изгибе и сдвиге в панелях CLT при концентрированных нагрузках. Для упрощения напряжениями при взаимодействии между слоями пренебрегли. Материал был смоделирован как ортотропный с упруго-пластическими свойствами. Результаты FEA были примерно на 20% ниже по сравнению с экспериментальными значениями для линейно-упругого отклика. Для нелинейной стадии механическая прочность была сильно завышена. Чтобы представить размягчение из-за разрушения при растяжении во внешних ламелях, небольшой части FEA-модели были присвоены свойства повреждения, что улучшило постлинейное поведение.

Сааведра Флорес и др. [25] исследовали разрушение панелей CLT при сдвиге, используя многомасштабный подход. Стратегия моделирования включала информацию о материалах в нано-, микро- и миллиметровом масштабе. Растрескивание было смоделировано путем введения в модель когезионных факторов. Прогнозируемые результаты в целом хорошо согласуются с экспериментальными результатами, с завышением первого режима отказа примерно на 10%. Сандхаас и др. [26] использовали составную

3D-модель древесины, которая может определять режимы разрушения и комбинировать как пластичные, так и хрупкие переломы в рамках одной и той же модели. Модель разработана с использованием подхода непрерывного повреждения, в котором можно моделировать прогрессирующее разрушение. Определяются восемь различных режимов разрушения древесины, а также параметры размягчения после того, как произошло повреждение. Модель материала программируется как подпрограмма в Abaqus [27], которая проверяет наличие повреждений в соответствии с различными критериями отказа на каждом временном шаге и обновляет матрицу жесткости, если происходит сбой. Этот подход позволяет идентифицировать режимы разрушения и визуализировать эволюцию повреждений в материале. Анализ дал удовлетворительные результаты с точки зрения жесткости и несущей способности.

Результаты FEA были примерно на 20% ниже по сравнению с экспериментальными значениями для линейно-упругой реакции. Для нелинейной стадии механическая прочность была значительно завышена.

Чтобы представить размягчение из-за разрушения при растяжении во внешних ламелях, небольшой части FEA-модели были приданы свойства повреждения, что улучшило нелинейное поведение [25].

1.6 Методы расчета многоэтажных зданий из CLT

Исследованиями расчета напряженно-деформированного состояния многоэтажных зданий занимались А. Готкадзе, Е.Е. Васин и Е.Г. Шабикова [28]. В ходе их исследований был предложен алгоритм расчёта ДКП панелей с учётом действия строительных норм и правил РФ (рисунок 1.7). Также был проведен статический расчёт 4-х этажного здания из ДКП панелей в расчётном комплексе Dubal (рисунки 1.8-1.9), расчёта на сейсмическую нагрузку проведено не было.

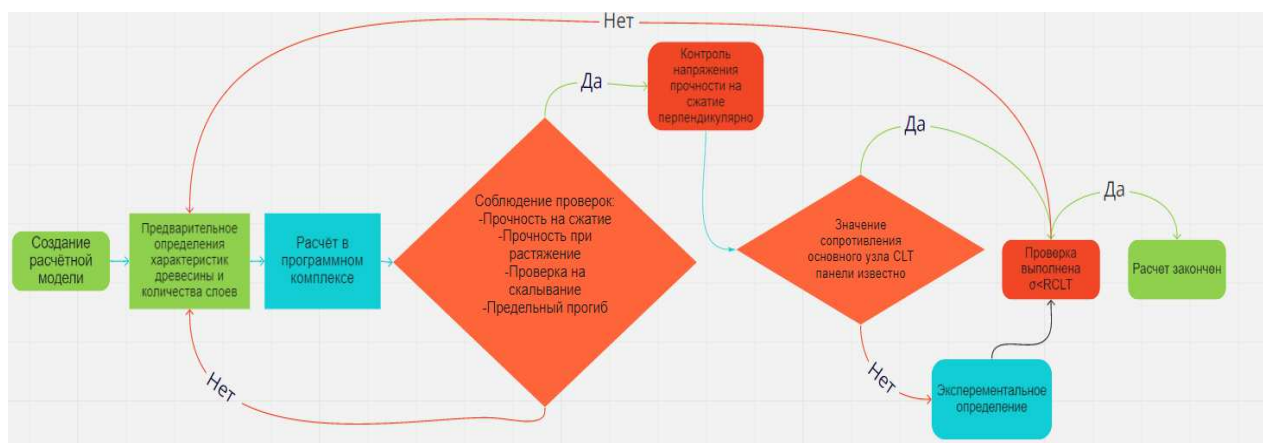


Рисунок 1.7 – Алгоритм расчёта ДКП

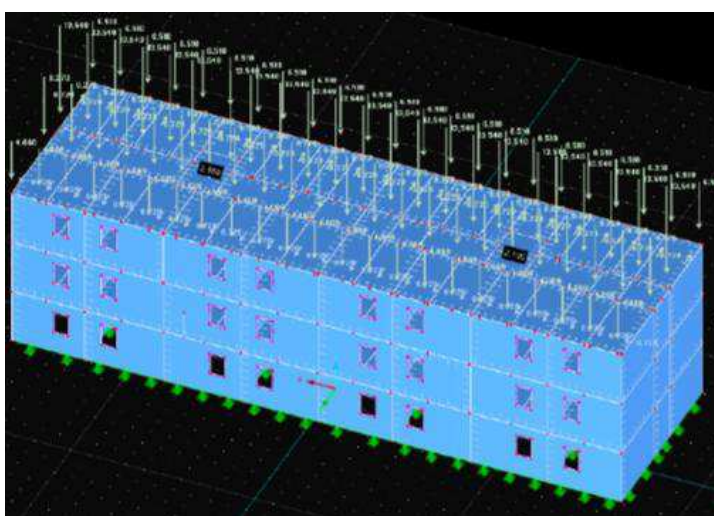


Рисунок 1.8 - Проектная схема здания в Dlubal.

Для оценки предельного состояния проверке подлежат общий относительный прогиб плиты под действием нагрузки (комбинация нагрузок от собственного веса панелей и эксплуатационной нагрузки) и предельные прогибы. Как видно на рисунке 1.9 предельный прогиб составил 9,2 мм при допустимом прогибе в 20 мм.

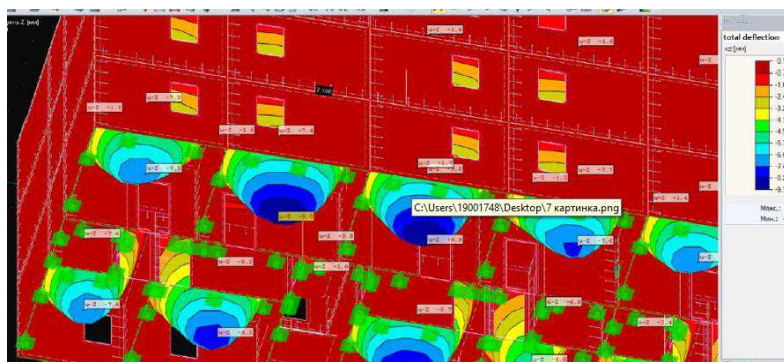


Рисунок 1.9 - Значения вертикальных прогибов

В результате авторами была установлена первичная методика статического расчета здания из CLT панелей с использованием Revit, RFEM, а также по результатам исследований была определена величина допустимых локальных напряжений несущего узла. Дальнейшие испытания материалов на растяжение, сжатие, сопротивление стружке, прогиб и локальную деформацию в соединениях могут быть выполнены в программе RFEM (finite element structural analysis program).

Проблемой исследования напряженно-деформируемого состояния многоэтажных каркасов зданий на сейсмическое воздействие также занимались авторы Prof. Gianmarco De Felice, Prof. Vlatka Rajčić, Student: Elisa Moretti [29], ими был проведен линейный динамический анализ:

Линейный динамический анализ состоит из:

- * Определения способов вибрирования конструкции (модальный анализ);
- * Расчёта эффектов сейсмического воздействия, представленных спектром отклика проекта для каждого из выявленных колебательных режимов.;

Нормативная документация Чехии требует, чтобы все режимы рассматривались с массой участия более 5% и чтобы сумма не превышала 85%.

В случае рассматриваемых сил 100% в направлении x и 30% в направлении y был получен сдвиг максимальной суммы 93,7 мм. [29].

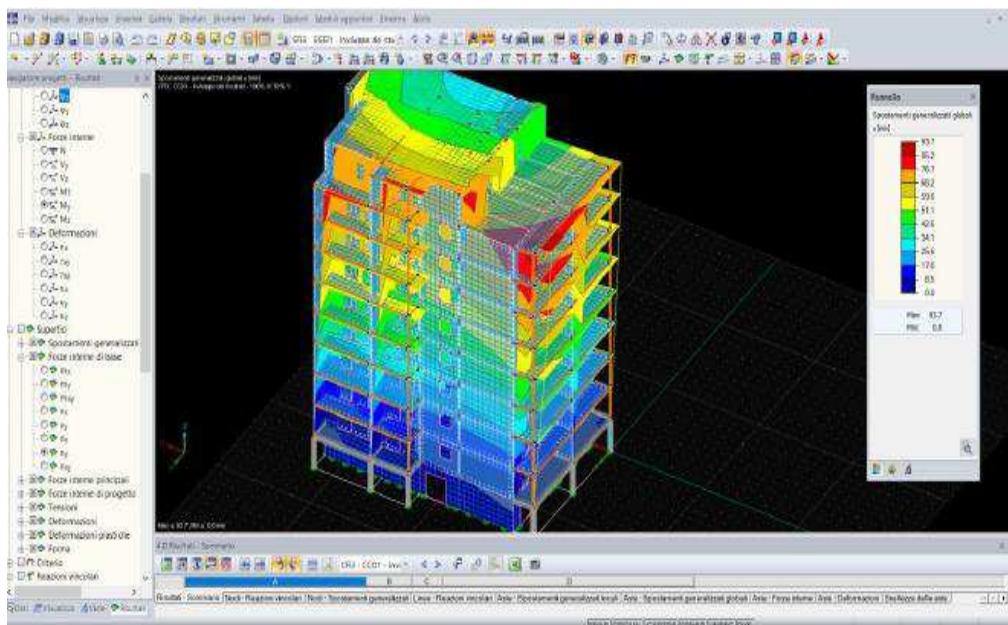


Рисунок 1.10 - Динамический анализ 100%X-30%Y результатов

В случае рассматриваемых сил 100% в направлении у и 30% в направлении х мы имеем максимальное смещение 123,4 мм

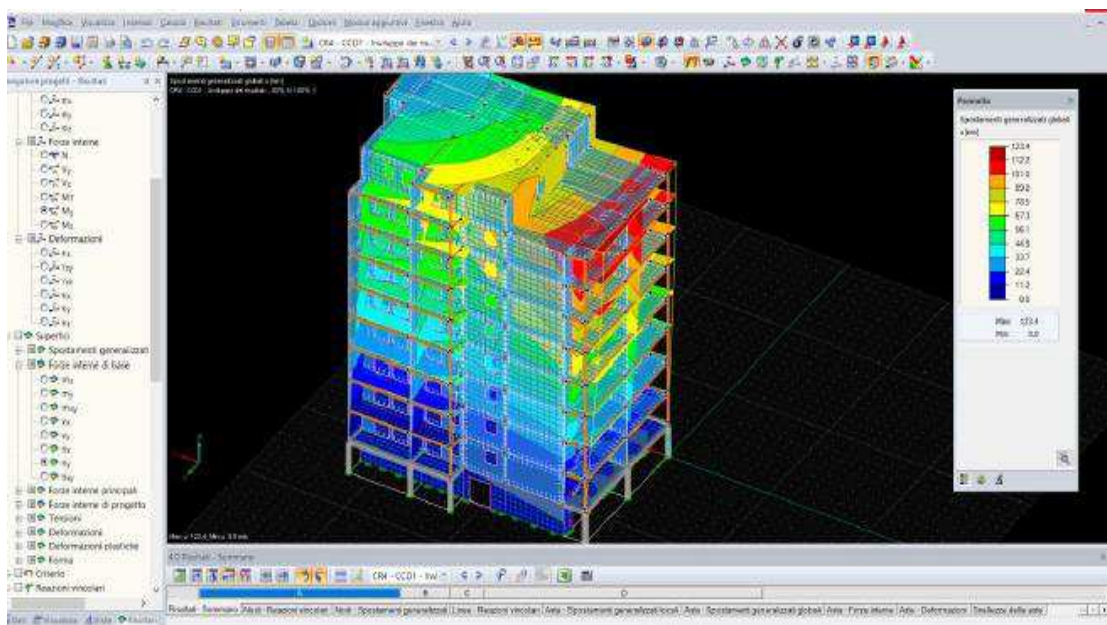


Рисунок 1.11 - Динамический анализ 100%Y-30%X результаты

В ходе исследования было произведен динамический расчет на действия сейсмической нагрузки 10-ти этажного здания, общей высотой 30 метров. Первый этаж спроектирован из бетона, в то время как остальные этажи выполнены из ДКП.

Выводы по первой главе:

Выполнив обзор литературы, в которой был отражен российский и зарубежный опыт проектирования многоэтажных зданий из древесины перекрестно клееной, а также теоретические подходы к расчету древесины перекрестно клееной, с учетом ортотропных свойств материала, можно сделать следующие выводы:

1) Строительство многоэтажных зданий и сооружений из клееной древесины широко распространено за рубежом, появляются многоэтажные здания, каркас которых полностью выполнен из древесины. В России также начинают строиться первые многоэтажные объекты из CLT, одним из первых станет жилой район в Вологодской области от Segezha Group.

2) Российская нормативная база в области проектирования общественных, жилых многоэтажных зданий и сооружений из клееной древесины находится в стадии активного формирования. Уже выпущены первые нормы и правила, разрешающие строительство многоэтажных зданий из CLT высотой до 28 метров включительно. Специальные нормы и правила при расчете на особые нагрузки, в частности, сейсмические пока не разработаны.

3) Мировой опыт показывает разнообразие подходов к расчету панелей из древесины перекрестно клееной, некоторые из них являются экспериментальными, основанными на тестировании моделей. В практике используют: балочную теорию расчета Тимошенко, теорию Аналогии со сдвигом, теорию пучков Эйлера-Бернулли, «Теорию композитов» (также называемую «k-методом»). В России пока формируются нормативные документы по существующим теориям расчета.

ГЛАВА 2. Анализ расчета CLT плит перекрытия с учетом ортотропных и изотропных свойств древесины

2.1 Моделирование материалов. Ортотропная упругость.

Древесина и композиты из них трудно поддаются моделированию. Материал древесины неоднороден, сильно анизотропен, имеет различную прочность при сжатии и растяжении, а также вязкие и хрупкие режимы разрушения, происходящие одновременно. Все эти вопросы часто приводят к численным проблемам, и подходы для моделирования древесины обычно выбираются в зависимости от конкретного применения. Хрупкое моделирование можно проводить с помощью механики разрушения с использованием континуальной структуры, а вязкие модели могут включать теорию пластичности с использованием ортотропных критериев текучести, таких как критерий Хилла или критерий Цай-Ву [21].

Древесину можно рассматривать как композит природного происхождения, состоящий из трубчатых клеток в лигниновой матрице. Благодаря такой структуре древесина обладает различными свойствами в разных направлениях. Сама древесина может рассматриваться как ортотропный материал с тремя главными материальными осями.

Первая - в продольном направлении, а две другие - в тангенциальном и радиальном направлениях [21]. Основные направления ортотропной структуры материала показаны на рисунке 2.4

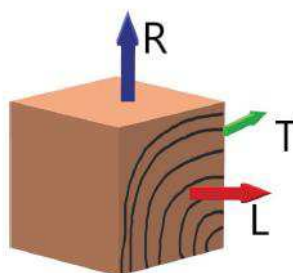


Рисунок 2.1 – Направления материала

Жесткость и модуль сдвига в различных направлениях показаны на рисунке 2.5

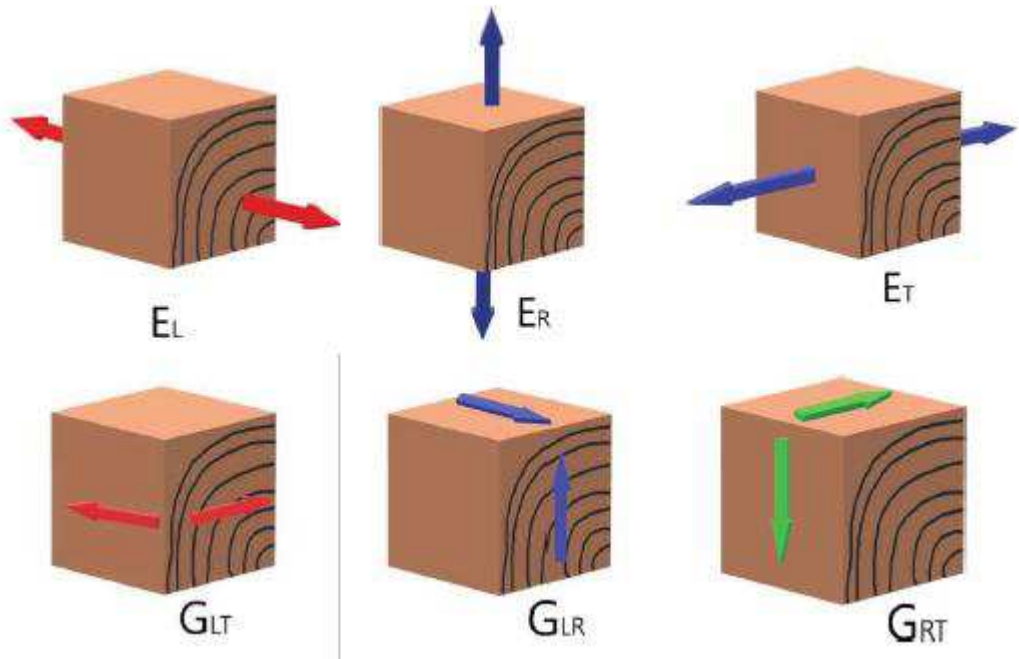


Рисунок 2.2 – Модуль жесткости и сдвига в различных направлениях

Ортотропные материалы - такие материалы, в которых есть по крайней мере две плоскости симметрии, где свойства материала не зависят от направления в пределах каждой плоскости [14].

Фундаментальный закон Гука для ортотропного материала может быть представлен в виде:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{LR} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{RT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{LR} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{RT} \end{bmatrix}$$

Рисунок 2.3 – Матрица жесткости

с обозначениями для направлений в соответствии с рисунком 2.2.

Матрица

соответствия состоит из 12 переменных, но из-за требований симметрии соотношения между коэффициентами Пуассона даны в виде:

$$\frac{\nu_{LR}}{E_L} = \frac{\nu_{RL}}{E_R} \quad \frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T} \quad \frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T}$$

сократив при этом количество независимых переменных до 9.

2.2 Расчет CLT панели перекрытия

С целью дальнейшего исследования напряженно-деформированного состояния деревянного 9-ти этажного здания из CLT панелей, была выполнена серия расчетов и анализ НДС отдельной панели из CLT в ПК Ansys и ПК Лира Софт. Были верифицированы физико-механические свойства древесины перекрестно клееной и проведен сравнительный анализ двух моделей с учетом ортотропных свойств и изотропных свойств древесины перекрестно клееной. Далее на основе полученной модели материала была проведена параметрическая оптимизация в АК Ansys и получены усредненные физико-механические свойства для многослойной панели.

Анализ влияния ортотропной структуры материала был выполнен для модели панели размером 3x6 м., толщиной 165 мм., состоящей из 5 слоев по 33 мм., склеенных друг с другом (рисунок 2.4). Геометрические характеристики CLT панели соответствуют заявленным производителем на территории России Промстройлес [30]. Плита закреплена по двум коротким сторонам шарнирно-подвижной опорой справа и шарнирно-неподвижной опорой слева. Расчет панели проводился на сочетании нагрузок: эксплуатационная, собственный вес панели, собственный вес от материала пола. Сбор нагрузок произведен согласно СП 20.13330.2016 нагрузки и воздействия и приведен в таблице 2.1. Тип расчета в ПК Ansys 2021 - статический линейный анализ с учетом линейно-упругих свойств материала и условий опирания.

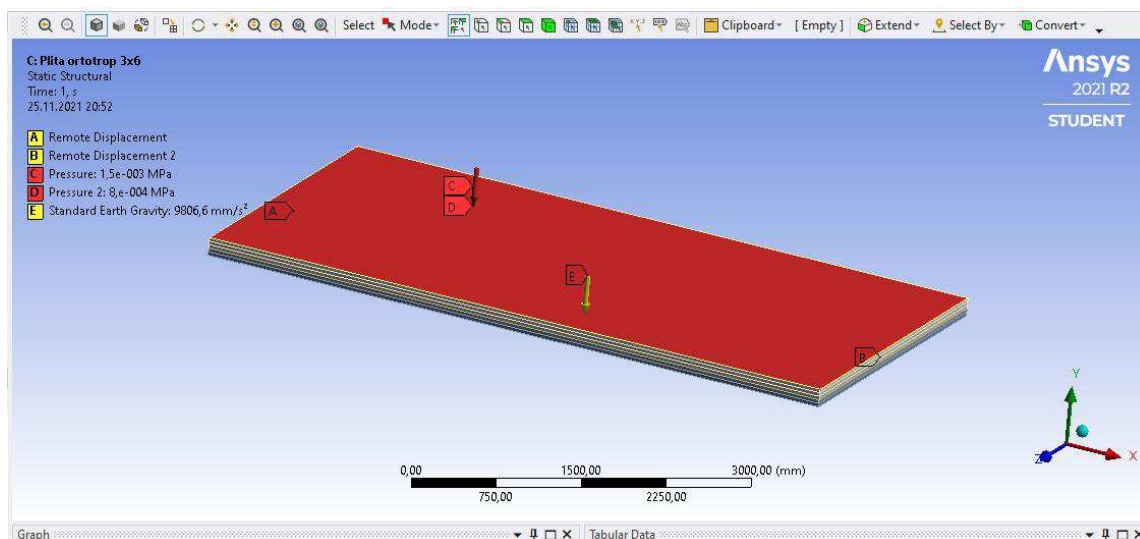


Рисунок 2.4 – Расчетная модель в Ansys

Таблица 2.1 Сбор нагрузок на панель перекрытия

Вид нагрузки	Значение, кН/м ²	Значение, МПа
Собственный вес панели	0,825	0,000825
Эксплуатационная нагрузка	1,5	0,0015
Собственный вес материалов пола	0,8	0,0008
Суммарная нагрузка	3,12	0,00312

Расчет физических характеристик материала плиты

Для расчёта ортотропной плиты, основываясь на фундаментальных исследованиях физико-механических свойств древесины, приведенных в книге Анизотропия древесины и древесных материалов, Ашкенази Е.К. [14], и данных СП 64.13330.2017 ДЕРЕВЯННЫЕ КОНСТРУКЦИИ прил. В.2, а также основываясь на экспериментальных данных подтверждающих физико-механические свойства панелей их CLT, были определены следующие параметры материала в системе координатных осей, показанной на рисунке 2.2.

- E_x = модуль упругости в направлении поверхности x
- E_y = модуль упругости направлении поверхности y
- G_{xz} = модуль сдвига направлении поверхности x

- G_{yz} = жесткость на сдвиг в локальном направлении поверхности у (направление толщины плиты)
- G_{xy} = жесткость на сдвиг в плоскости плиты
- v_{xy} = поперечная деформация в направлении x
- v_{yz} = поперечная деформация в направлении у.

В результате была получена таблица 2.2. физико-механических характеристик CLT панели:

Таблица 2.2 Физико-механические характеристики CLT

Слой/ направление	$E_{\text{прод (x)}}$ МПа	$E_{\text{попер (y)}}$ МПа	$G_{\text{прод(xy)}}$ МПа	$G_{\text{попер (yz)}}$ МПа	$V_{\text{прод.(xy)}}$	$V_{\text{попер.(yx)}}$
Продольное	11700	390	730	73	0,35	0,07
Поперечное	9000	300	560	56	0,35	0,07

Задание полученных физико-механических характеристик продольного и поперечного слоев CLT панели в ПК Ansys 2021 приведено на рисунке 2.5, 2.6.

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	500	kg m ⁻³		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input checked="" type="checkbox"/>	
5	Coefficient of Thermal Expansion	4,69E-06	C ⁻¹		
6	Isotropic Elasticity			<input checked="" type="checkbox"/>	
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio			
8	Young's Modulus	2,278E+10	Pa		
9	Poisson's Ratio	0,3742			
10	Bulk Modulus	3,018E+10	Pa		
11	Shear Modulus	8,2885E+09	Pa		
12	Orthotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>	
13	Young's Modulus X direction	11700	MPa		<input type="checkbox"/>
14	Young's Modulus Y direction	390	MPa		<input type="checkbox"/>
15	Young's Modulus Z direction	390	MPa		<input type="checkbox"/>
16	Poisson's Ratio XY	0,35			<input type="checkbox"/>
17	Poisson's Ratio YZ	0,07			<input type="checkbox"/>
18	Poisson's Ratio XZ	0,07			<input type="checkbox"/>
19	Shear Modulus XY	730	MPa		<input type="checkbox"/>
20	Shear Modulus YZ	73	MPa		<input type="checkbox"/>
21	Shear Modulus XZ	730	MPa		<input type="checkbox"/>
22	Tensile Yield Strength	Tabular			<input type="checkbox"/>
23	Tensile Ultimate Strength	Tabular			<input type="checkbox"/>

Рисунок 2.5 – Продольный слой CLT панели

Properties of Outline Row 3: Wood 1 layer				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	500	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input checked="" type="checkbox"/>
5	Coefficient of Thermal Expansion	4,69E-06	C ⁻¹	
6	Isotropic Elasticity			<input checked="" type="checkbox"/>
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio		
8	Young's Modulus	2,278E+10	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,3742		
10	Bulk Modulus	3,018E+10	Pa	
11	Shear Modulus	8,2885E+09	Pa	
12	Orthotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
13	Young's Modulus X direction	9000	MPa	
14	Young's Modulus Y direction	300	MPa	
15	Young's Modulus Z direction	300	MPa	
16	Poisson's Ratio XY	0,35		<input type="checkbox"/>
17	Poisson's Ratio YZ	0,07		<input type="checkbox"/>
18	Poisson's Ratio XZ	0,07		<input type="checkbox"/>
19	Shear Modulus XY	560	MPa	
20	Shear Modulus YZ	56	MPa	
21	Shear Modulus XZ	560	MPa	
22	Tensile Yield Strength	Tabular		<input type="checkbox"/>
23	Tensile Ultimate Strength	Tabular		<input type="checkbox"/>

Рисунок 2.6 – Поперечный слой CLT панели

2.3 Расчет панелей из CLT в ПК Ansys

Результаты расчета многослойной плиты с учетом ортотропных свойств, при разной густоте сетки КЭ, в виде изополей прогибов и эквивалентных напряжений на комбинацию нагрузок по таблице 2.1 показаны на рисунках 2.7 – 2.14

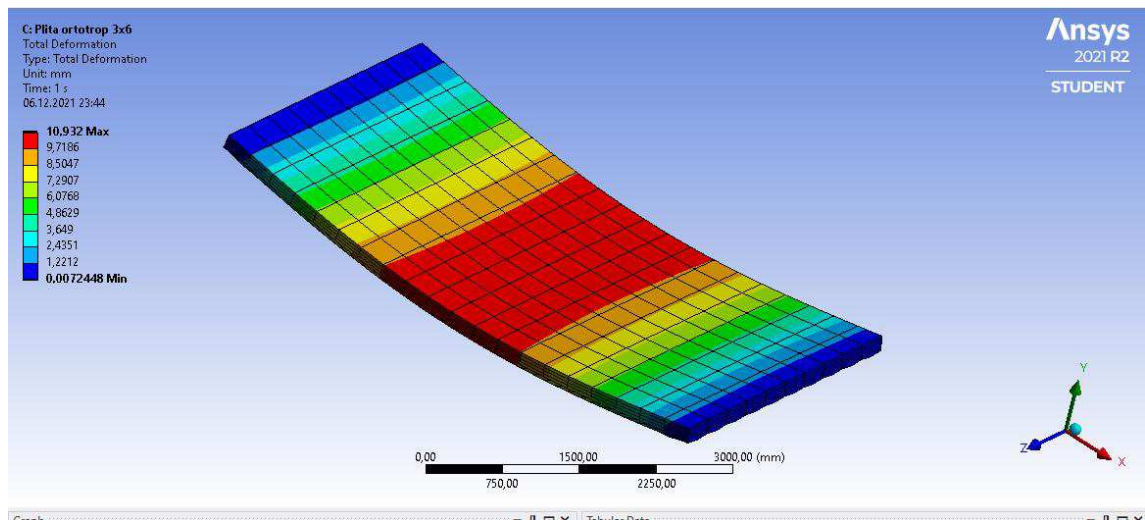


Рисунок 2.7 – Размер сетки 300 мм, максимальные перемещения 10,9 мм.

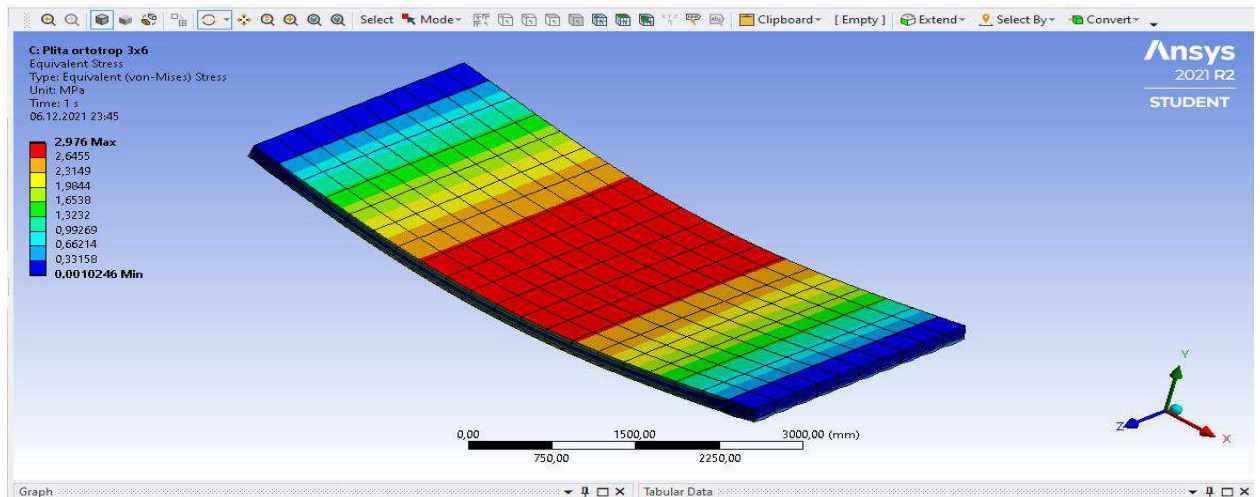


Рисунок 2.8 – Размер сетки 300 мм, максимальные напряжения 2,97 МПа.

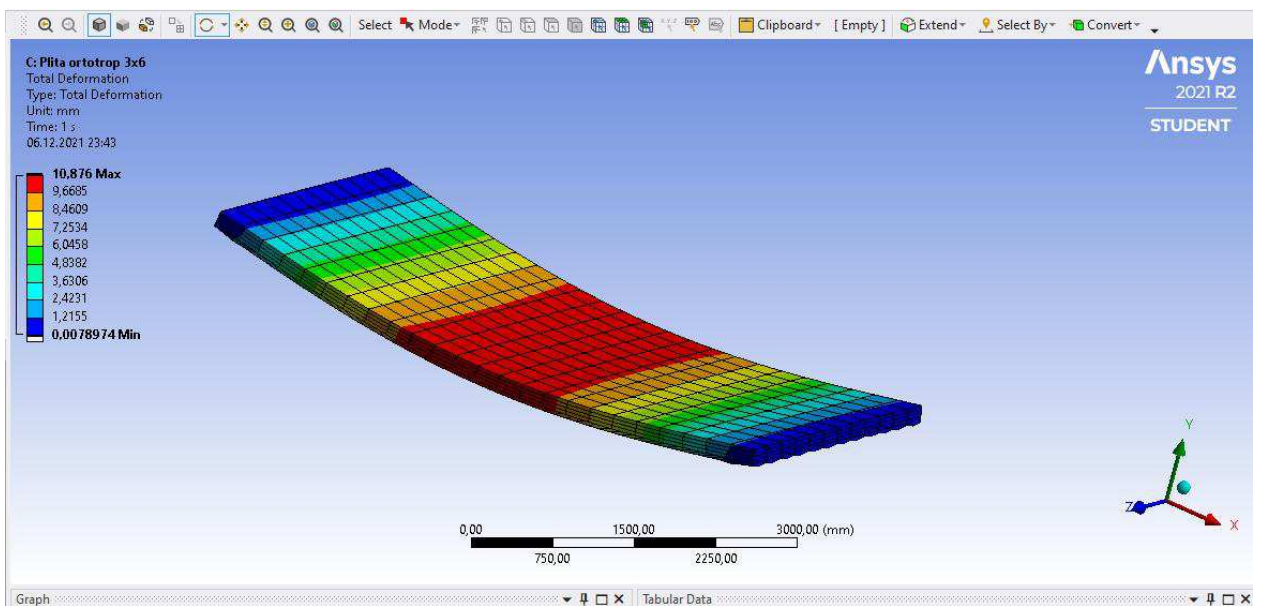


Рисунок 2.9– Размер сетки 250 мм, максимальные перемещения 10,87 мм.

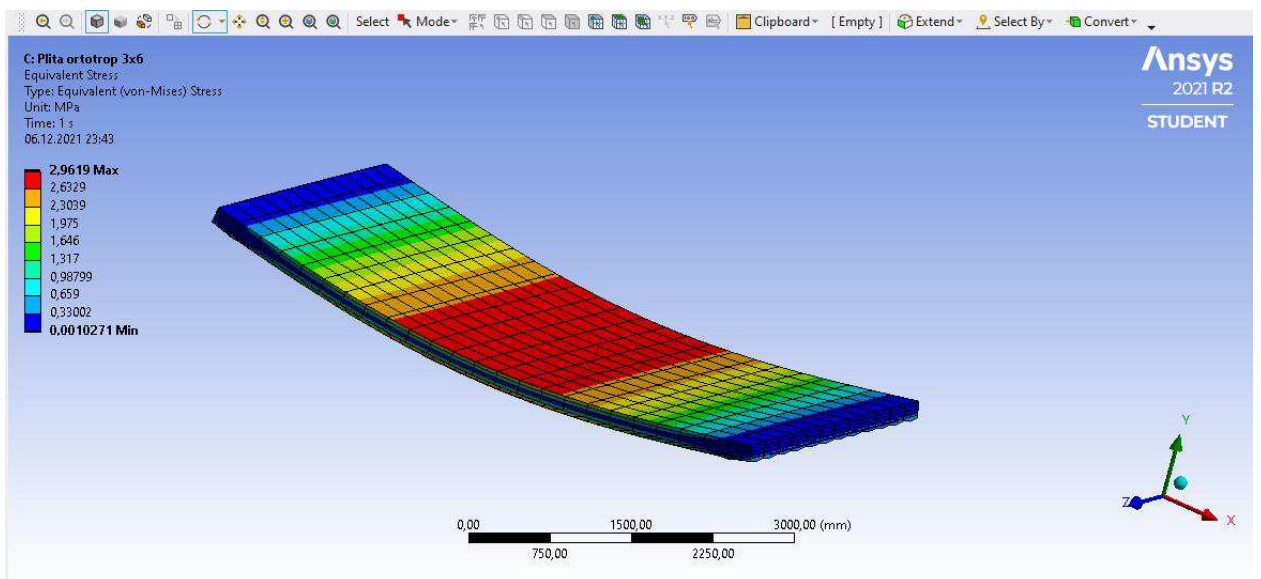


Рисунок 2.10 – Размер сетки 250 мм, максимальные напряжения 2,96 МПа.

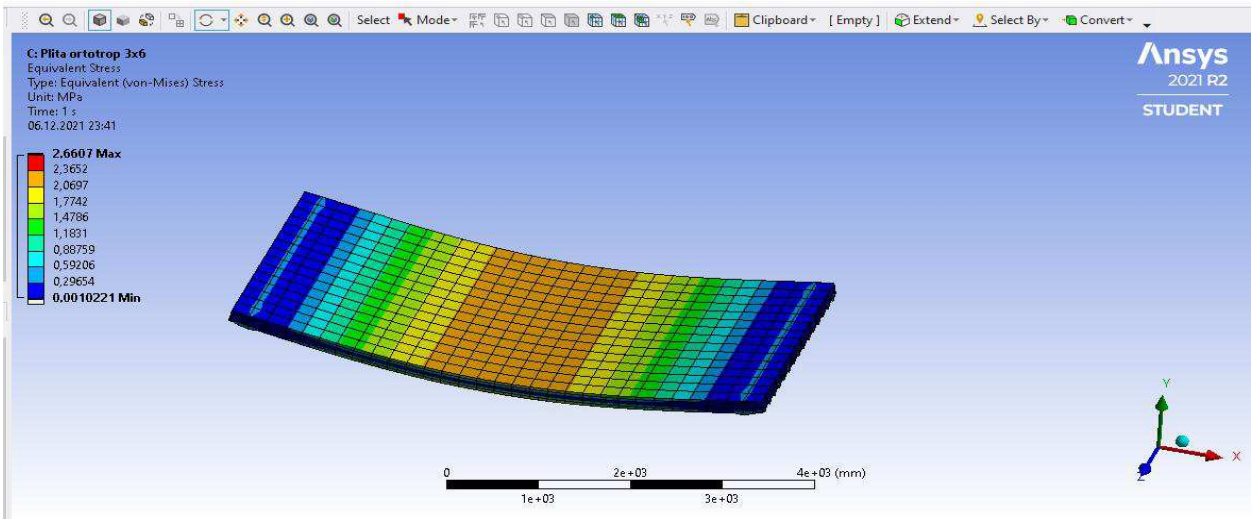


Рисунок 2.11 – Размер сетки 200 мм, максимальные напряжения 2,66 МПа.

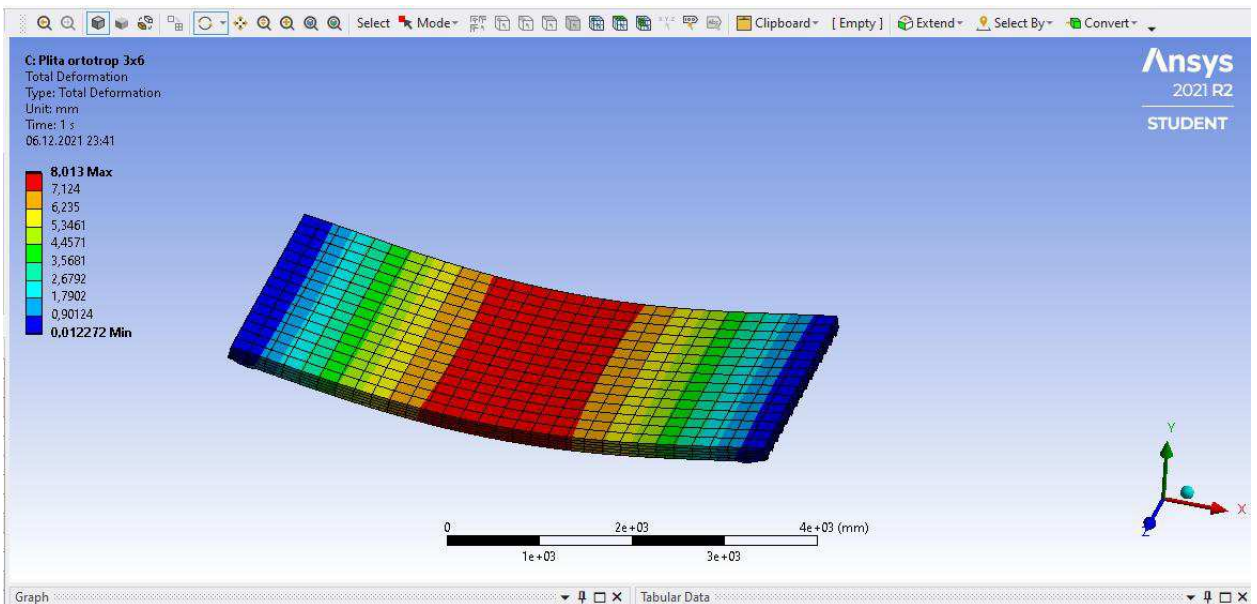


Рисунок 2.12 – Размер сетки 200 мм, максимальные перемещения 8,01 мм.

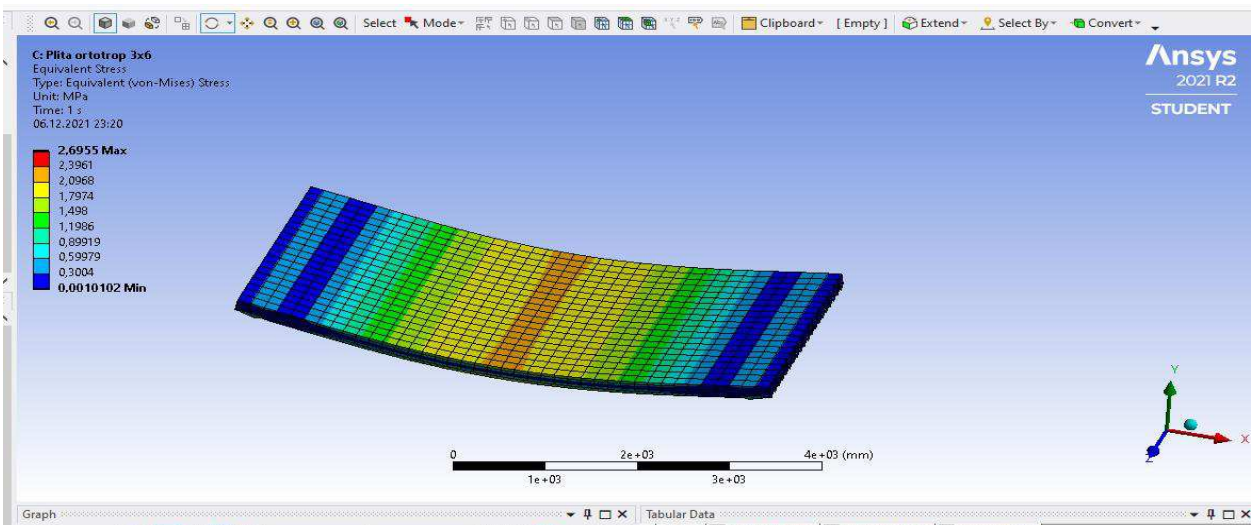


Рисунок 2.13 – Размер сетки 150 мм, максимальные напряжения 2,69 МПа

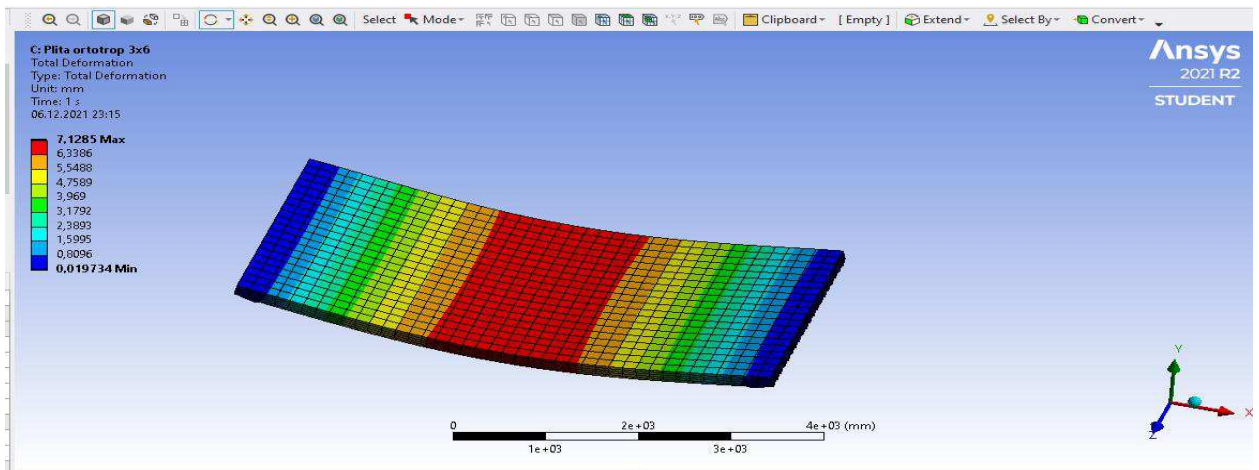


Рисунок 2.14 – Размер сетки 150 мм, максимальные перемещения 7,13 мм.

Таблица 2.3 – Напряжения и перемещения при разном размере сетки.

Размер сетки в мм.	Напряжения в МПа.	Перемещения в мм.
300	2,97	10,9
250	2,96	10,87
200	2,66	8,01
150	2,69	7,13

График зависимостей напряжений и перемещений от размера сетки показан на рисунке 2.15.

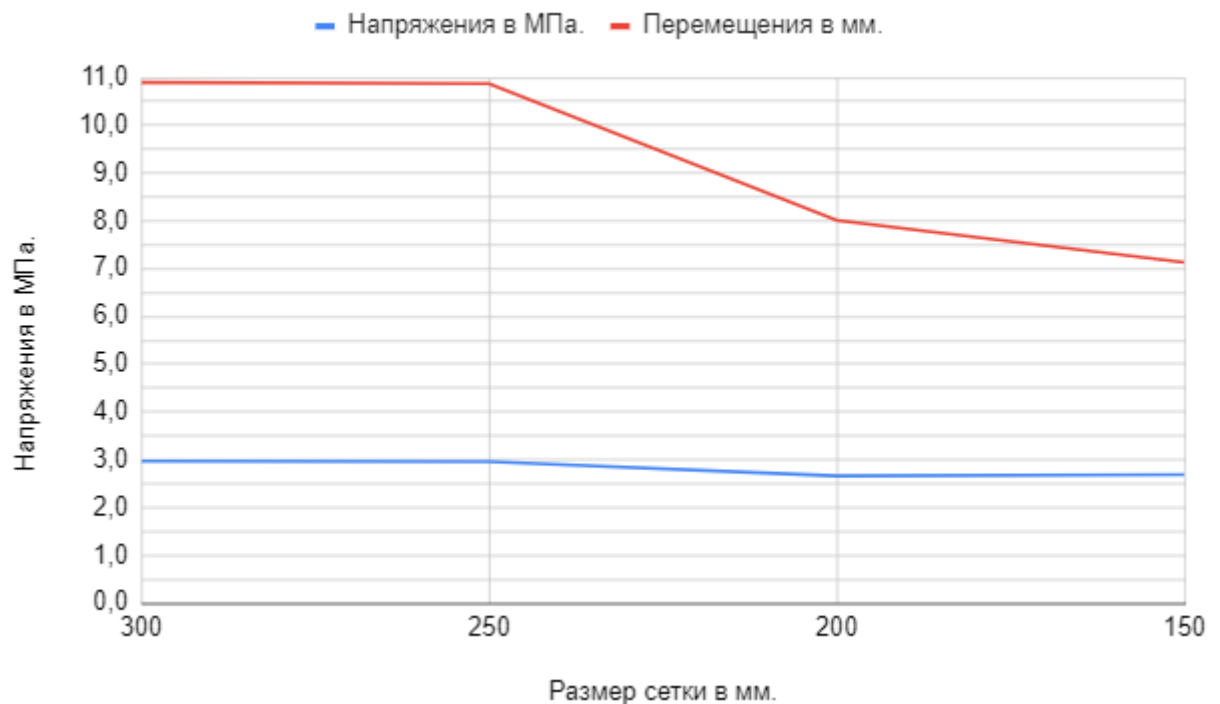


Рисунок 2.15 – График зависимости напряжений и перемещений от размера сетки в ортотропной модели материала.

Как видно из графика, перемещения и эквивалентные напряжения практически стабилизируются при шаге конечно-элементной сетке от 200- 150 мм. Значения перемещений изменяются на 35%, напряжений на 10 % с уменьшением размера сетки.

Для сравнительного анализа влияния свойств ортотропии на НДС плиты рассмотрим более простую ее модель с изотропными свойствами.

Задание физико-механических характеристик изотропной плиты CLT панели в ПК Ansys 2021 приведено на рисунке 2.16.

Properties of Outline Row 5: Wood, IZOTROOP				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	500	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	4,69E-06	C ⁻¹	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio		
8	Young's Modulus	10000	MPa	
9	Poisson's Ratio	0,49		
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa	
11	Shear Modulus	3,3557E+09	Pa	
12	Tensile Yield Strength	Tabular		
13	Tensile Ultimate Strength	Tabular		

Рисунок 2.16 – Изотропные характеристики материала

Результаты расчета изотропной плиты, в том числе при разном размере сетки КЭ, в виде изополей прогибов и эквивалентных напряжений на комбинацию нагрузок, приведенную в таблице 2.4, показаны на рисунках 2.17 - 2.24.

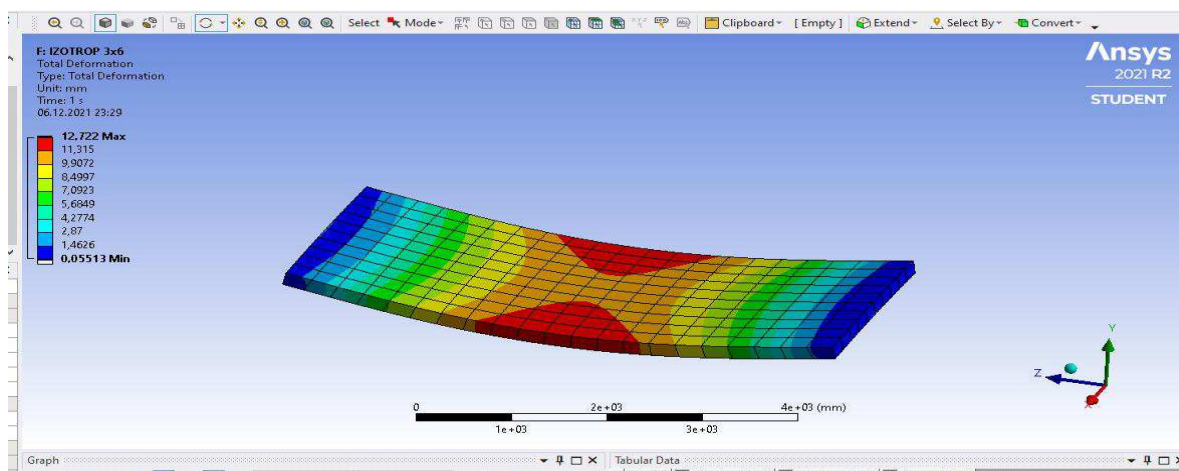


Рисунок 2.17 – Размер сетки 300 мм, максимальные перемещения 12,722 мм.

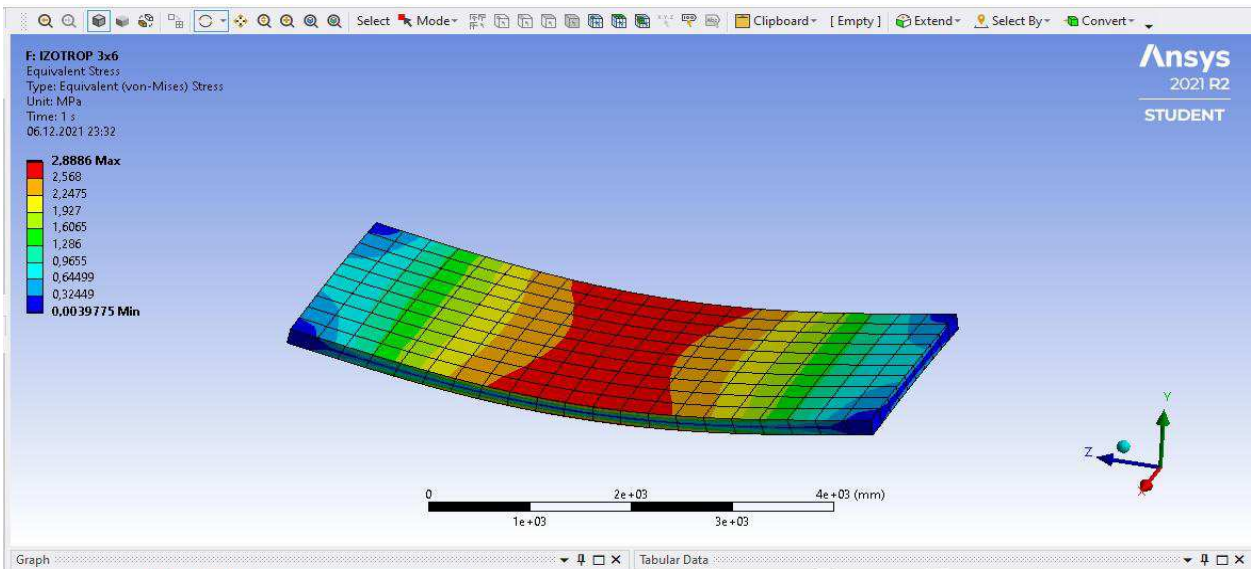


Рисунок 2.18 – Размер сетки 300 мм, максимальные напряжения 2,888 МПа

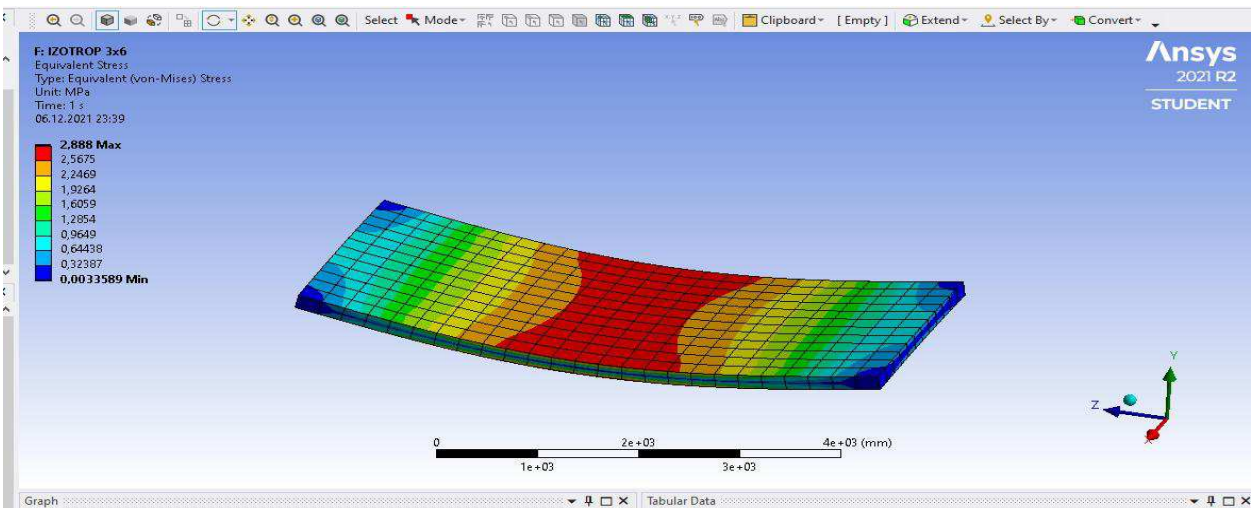


Рисунок 2.19 – Размер сетки 250 мм, максимальные напряжения 2,888 МПа

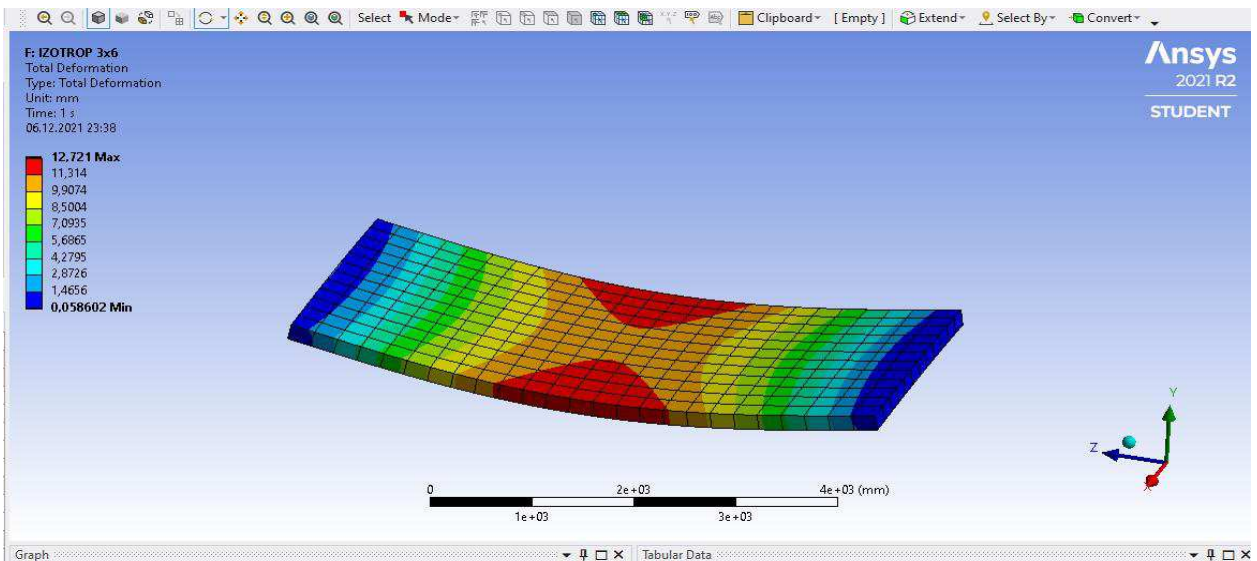


Рисунок 2.20 – Размер сетки 250 мм, максимальные перемещения 12,721 мм.

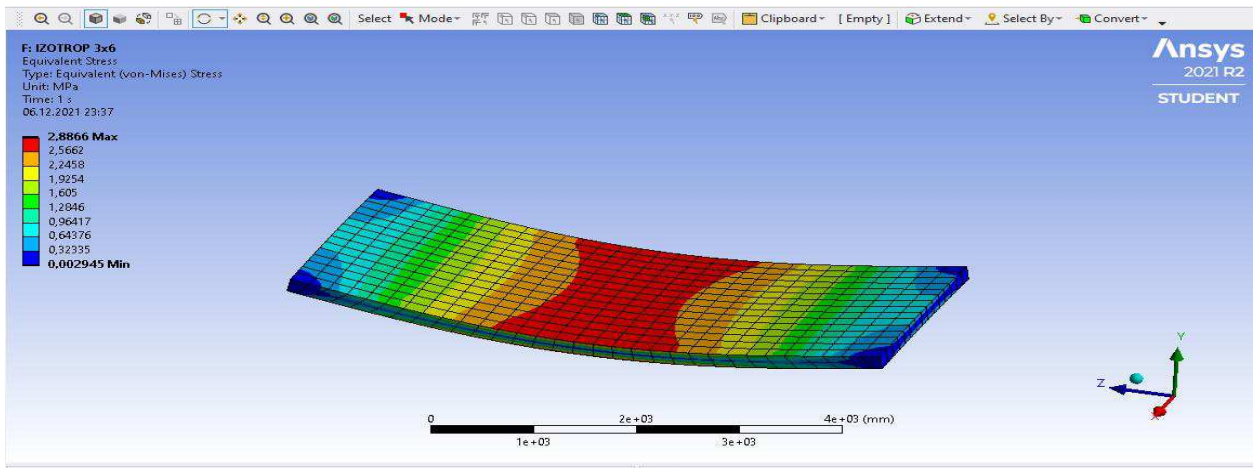


Рисунок 2.21 – Размер сетки 200 мм, максимальные напряжения 2,886 МПа.

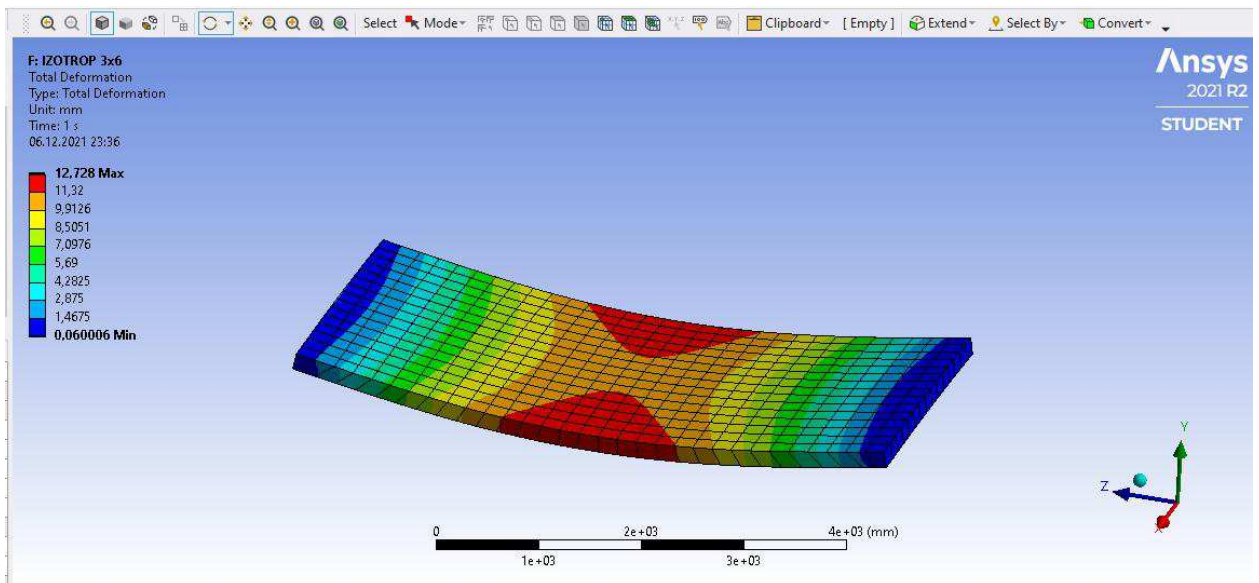


Рисунок 2.22 – Размер сетки 200 мм, максимальные перемещения 12,728 мм.

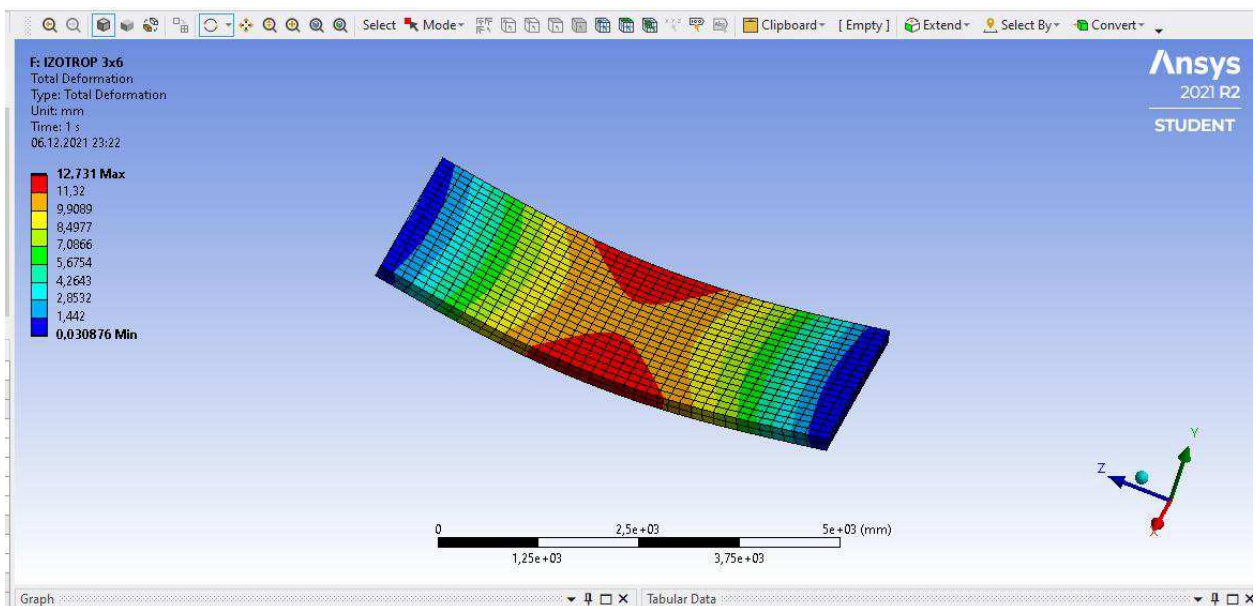


Рисунок 2.23 – Размер сетки 150 мм, максимальные перемещения 12,731 мм.

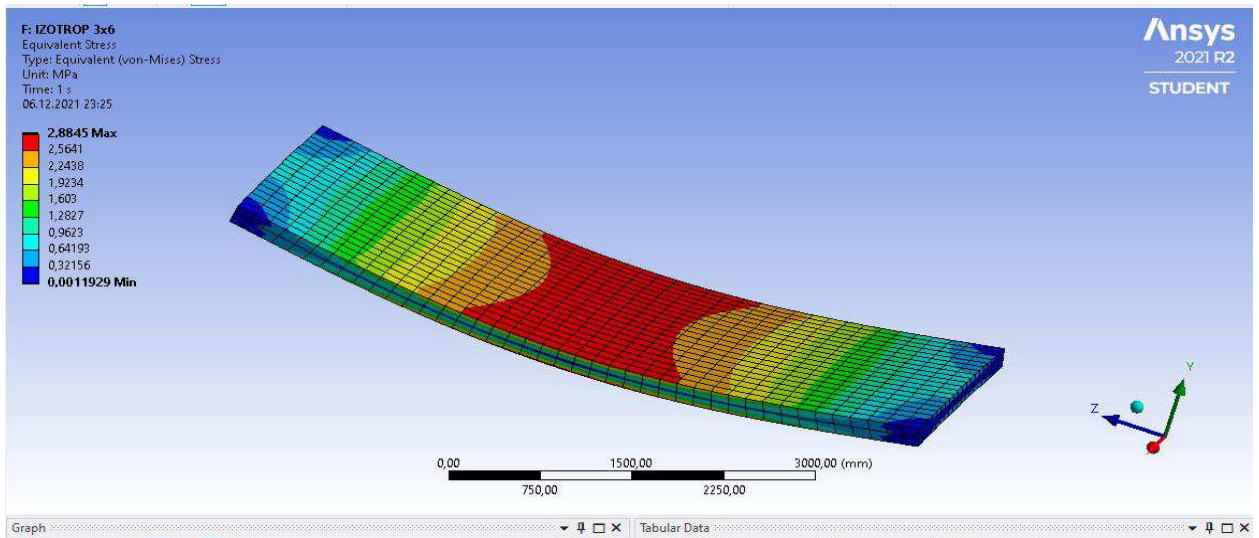


Рисунок 2.24 – Размер сетки 150 мм, максимальные напряжения 2,884 МПа.

Таблица 2.4 – Напряжения и перемещения при расчете на разном размере сетки.

Размер сетки в мм.	Напряжения в МПа.	Перемещения в мм.
300	2,888	12,722
250	2,888	12,721
200	2,886	12,728
150	2,884	12,731



Рисунок 2.25 – График зависимости напряжений и перемещений от размера сетки в ортотропной модели материала

По результатам расчета панели с изотропной моделью материала при разном размере сетки КЭ от 300 мм., до 150 мм., значения напряжений и перемещений изменяются менее чем на 1%.

Для сравнения зависимостей напряжений и перемещений от размера сетки КЭ в изотропном и ортотропном материале построен график – рисунок 2.26. Исходя из расчётов видно, что при изменении размера сетки в изотропном материале значения перемещений и напряжений оставалось неизменным, тогда как в ортотропном материале значения перемещений с изменением размера сетки уменьшились на 33%.



Рисунок 2.26 – График сравнения зависимостей ортотропного материала и изотропного.

При расчёте изотропной и ортотропной плиты при разных размерах сетки КЭ от 300 мм., до 150 мм., были выявлены значительные отклонения в перемещениях, тогда как напряжения оставались сравнительно на одном уровне при изменении размера сетки в изотропной и ортотропной плите (2,6-2,8 МПа). При расчёте изотропной плиты перемещения и напряжения были практически постоянными, перемещения в ортотропной плите увеличивались с

увеличением размера сетки и стабилизировались при размере сетки в 250-300 мм. разница в перемещениях при данном размере составляет 15% между ортотропной и изотропной плитой.

2.4 Расчеты CLT плиты в ПК ЛИРА 10.12.

Для подтверждения достоверности результатов расчета, полученных в ПК Ansys 2021 был проведен расчет идентичной плиты с аналогичными геометрическими характеристиками и комбинацией загрузок в ПК Лира 10.12.

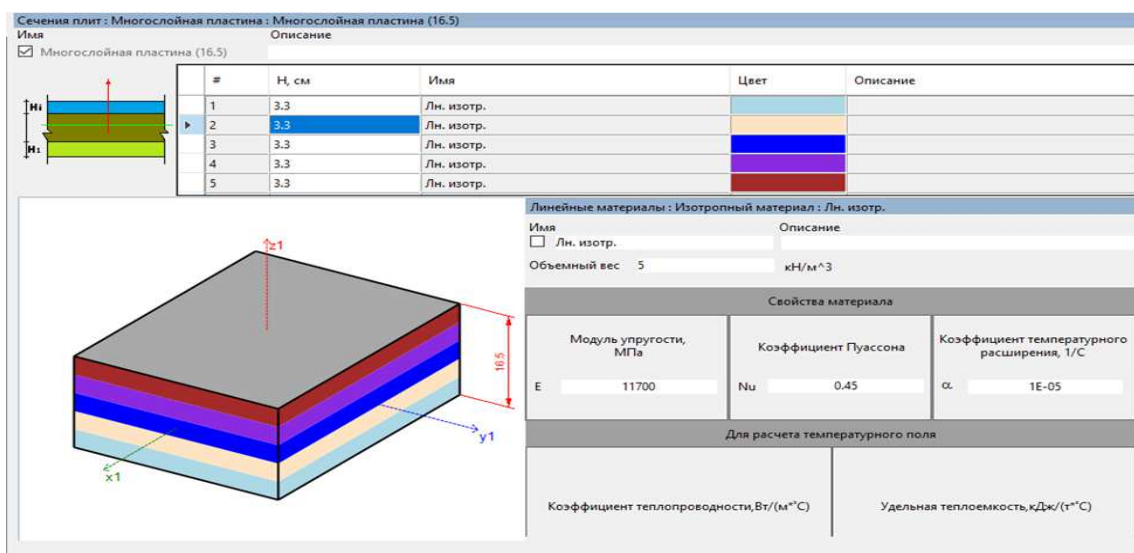


Рисунок 2.27 – Способ задание многослойной плиты с заданием изотропных характеристик для каждого слоя

Результаты расчета плиты из CLT в виде изополей прогибов и эквивалентных напряжений на комбинацию нагрузок показаны на рисунке 2.30.

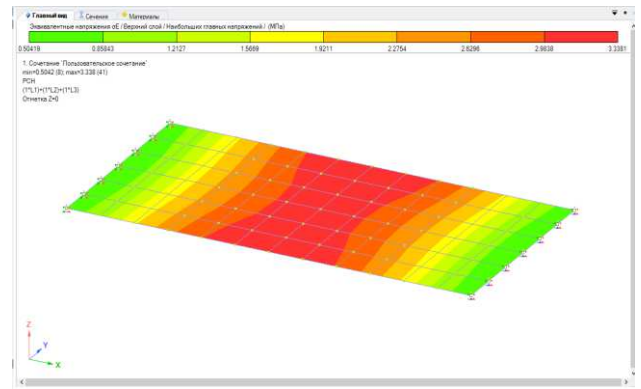
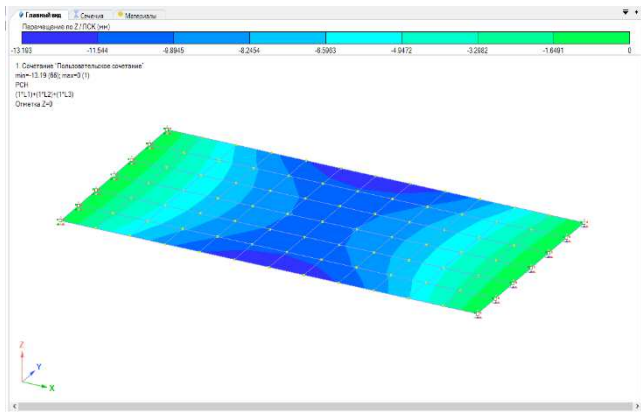


Рисунок 2.30– результаты расчета в ПК Лиры Софт

Сравнение расчета в ПК Лиры и ПК Ansys

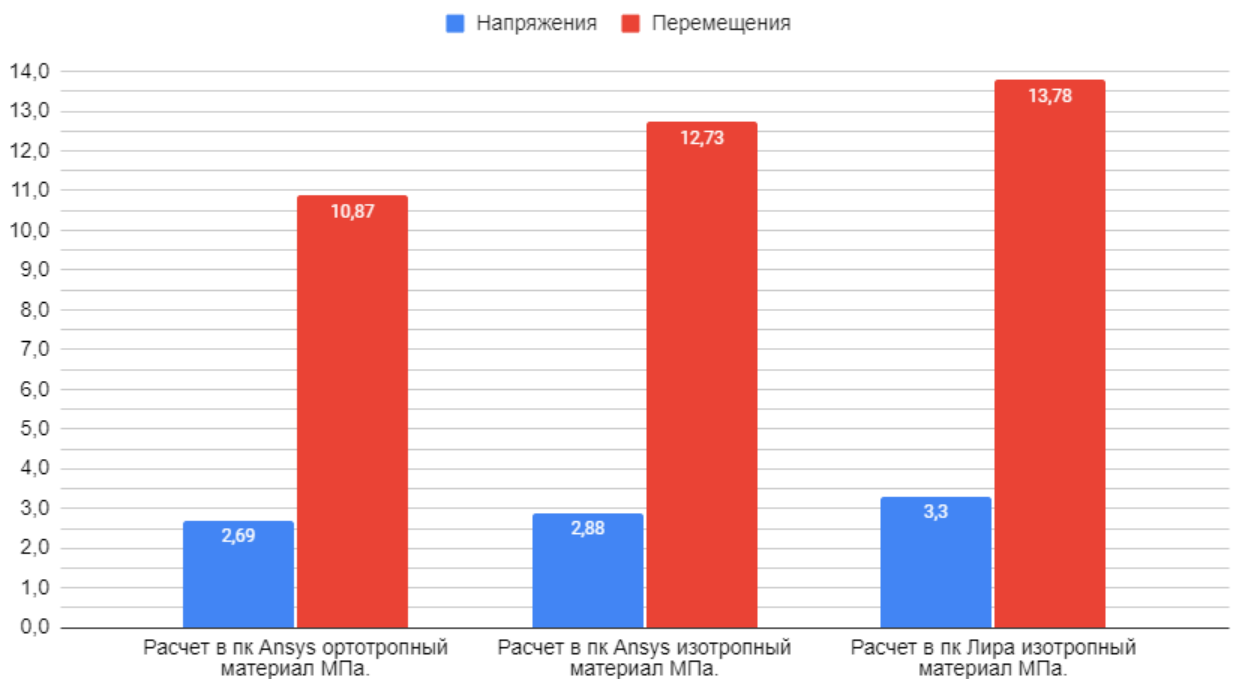


Рисунок 2.31 – Диаграмма полученных данных по напряжениям и перемещениям

Выводы: По результатам расчета было выявлено наилучшая работа ортотропной модели материала. Эквивалентные напряжения в ортотропной модели материала при расчёте в ПК Ansys на 18% процентов меньше, чем в изотропной модели при расчете в ПК Лиры, прогиб на 21%. Также, в данном

расчете было выявлено, что при изменении размера сетки КЭ ортотропной модели материала в ПК Ansys с 300 мм., до 150 мм., перемещения изменились на 35% с 10,9 мм до 7 мм. Полученные данные эквивалентных напряжений при данных нагрузках и ортотропной модели материала совпадают с полученными данными в ходе расчета других специалистов.

2.5 Топологическая оптимизация CLT плиты перекрытия.

Топологическая оптимизация является видом оптимизации формы конструкции, иногда именуемой оптимизацией компоновки. Цель топологической оптимизации состоит в определении лучшего использования материала для исследуемого объекта или конструкции, так, чтобы целевая функция (например, общая жесткость или эквивалентные напряжения) имели максимальное или минимальное значение при наличии существующих ограничений (таких, например, как уменьшение объема или массы). В отличие от традиционной оптимизации, топологическая оптимизация не требует указания параметров оптимизации (то есть независимых переменных, подвергаемых оптимизации) в явном виде. В топологической оптимизации параметром оптимизации является функция распределения материала по объему конструкции.

Общая формулировка проблемы оптимизации заключается в сведении к минимуму или максимуму функции цели f в зависимости от заданных ограничений g_j . Переменные проектирования η_i представляют собой внутренние псевдоплотности, которые определяются для каждого конечного элемента (i) в ходе решения задачи топологической оптимизации. Для каждого элемента псевдоплотности изменяются в пределах от 0 до 1; где $\eta_i \sim 0$ соответствует материалу, который необходимо убрать; и $\eta_i \sim 1$ соответствует материалу, который необходимо оставить.

Целью данной топологической оптимизации состоит в уменьшении материалоемкости клееной древесины и повышении теплоизоляционных и звукоизоляционных свойств без потери несущей способности. Рассматривается

панель из CLT размером 3x6 м, толщиной 165 мм., при тех же граничных условиях, что и в предыдущих расчетах, на действие равномерно распределенной нагрузки $q = 3,12$ кН/м (рисунок 2.33).

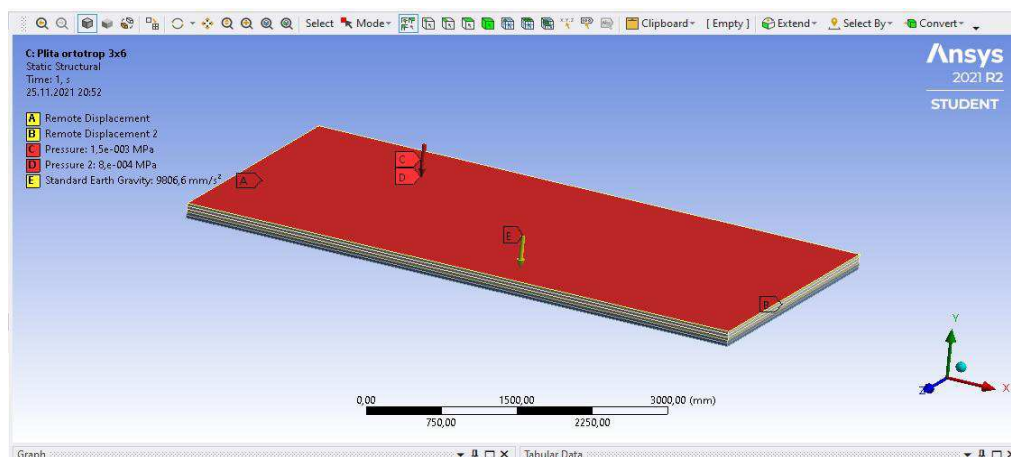


Рисунок 2.32 – Расчетная модель в ПК Ansys

В качестве критерия топологической оптимизации принималось достижение максимальной жесткости при заданном сохранении массы материала от 90% до 30 %.

Для аппроксимации плиты использовался плоский, 8-узловой конечный элемент Shell93c шагом сетки шаг сетки 0.15 м. Для решения задачи топологической оптимизации понадобилось 20 итераций метода последовательного выпуклого программирования. Результаты оптимизации представлены в виде топологических форм при сохранении массы панели от 90% до 30% и сведены в таблицу 2.5.

Критерий массы	Результат топологической оптимизации	
90%		
60%		
30%		

Таблица 2.5 Результаты топологической оптимизации панели.

Как видно из картины распределения псевдоплотностей в таблице 2.5, на полученных проектах плит хорошо просматриваются места с наибольшим и наименьшим распределением материала, т.е. остов (скелет) полученной конструкции, соответствующий действующей на него нагрузке и граничным условиям. При этом наиболее структурированным (где более четко прорисовались зоны с наиболее необходимым материалом – места постановки ребер) получились проекты плиты перекрытия с заданным сохранением массы плиты от 90% до 30% .

По данным топологической оптимизации видно, что при данных нагрузках для уменьшения материалоемкости без потери несущей способности, требуется подкрепить данную панель продольными ребрами жесткости. Для дальнейшей оптимизации панелей и расчета предлагаемого варианта конструкции плиты, был произведен расчет блока здания и дальнейшая топологическая оптимизация панели перекрытия. Геометрические размеры блока в плане 3x9 м., панели перекрытия соединены между собой и рассматриваются как единая плита, опертая по 4 сторонам, толщина исследуемой CLT панели 165 мм. Предварительно был проведен статический расчёт блока здания в ПК Ansys с учетом ортотропной модели материала на действия комбинации загрузок от собственного веса конструкций перекрытия и временной эксплуатационной нагрузки на плиту. Результаты статического расчета представлены на рисунках 2.33.

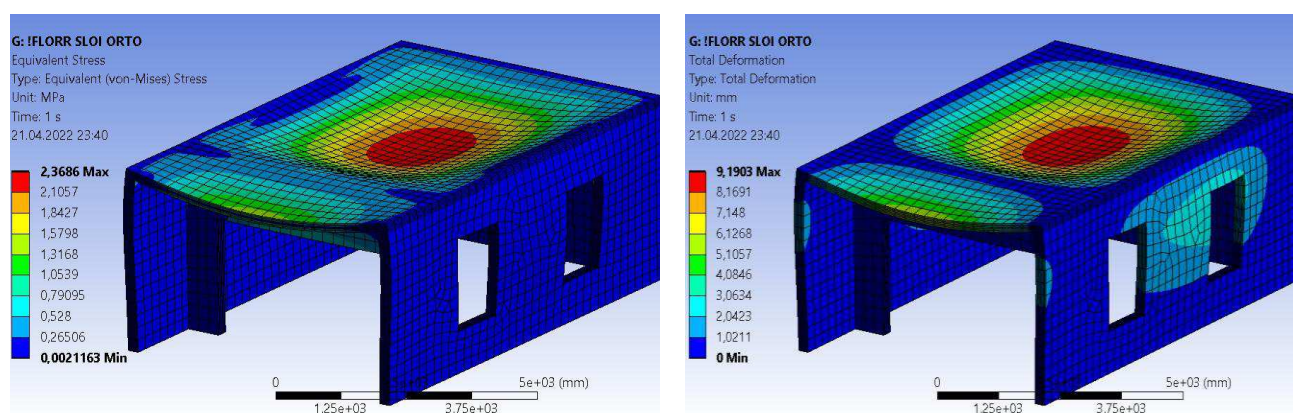
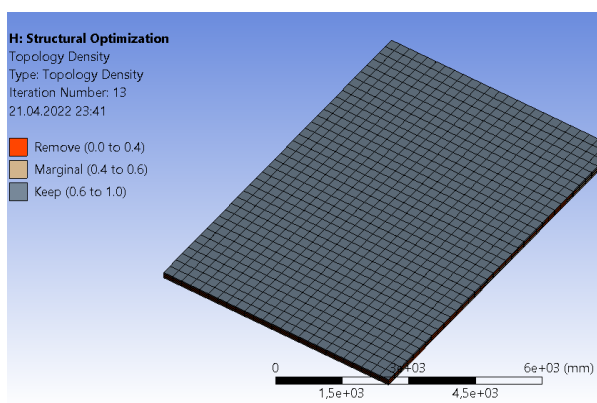
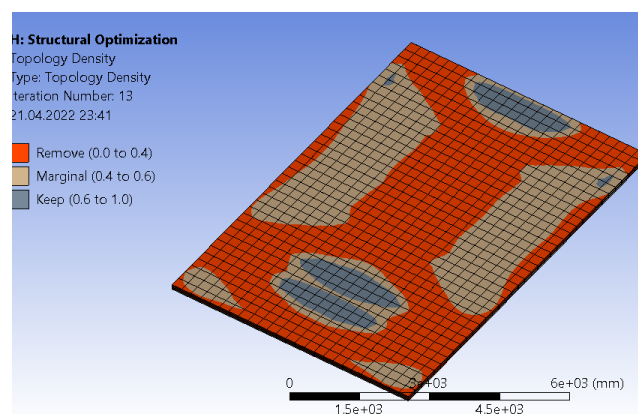


Рисунок 2.33 – Эквивалентные напряжения, максимальное значение 2,36 МПа. максимальный прогиб 9,19 мм.

На рисунках 2.38 представлены результаты топологической оптимизации панели перекрытия с учетом ортотропных свойств материала. На рисунке 2.34 наглядно видно требование оставить верхний и нижний слой панели, тогда как на рисунке 2.40 изображены внутренние слои панели с очертанием требуемых ребер жесткости по короткой стороне плиты. Далее в таблице 2.6 представлены два варианта конструирования панели перекрытия из CLT. Вариант 1 представляет собой ребристую панель перекрытия с двумя слоями CLT сверху расположенных ортогонально по отношению друг к другу, ребра представлены брусом 120x100(h) мм., оптимальный шаг ребер, исходя из расчета, 570 мм. Вариант 2 представляет собой ребристую плиту перекрытия с верхним и нижним расположением слоев из CLT и ребрами жесткости внутри панели. Ребра представлены брусом с сечением 120x100(h) мм., оптимальный шаг ребер, исходя из расчета, 960 мм. Образовавшиеся пустоты в обоих вариантах предлагается заполнить древесным утеплителем по типу «Белтермо». Данные статических расчетов обоих вариантов представлены в таблице 2.6.



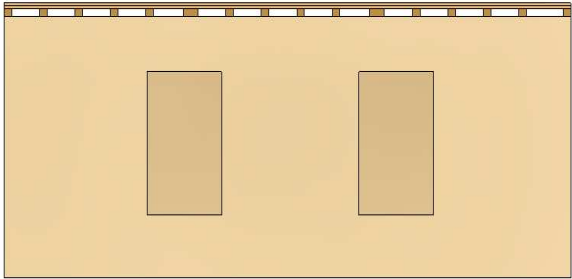
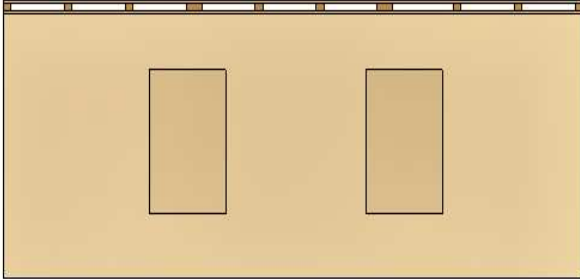
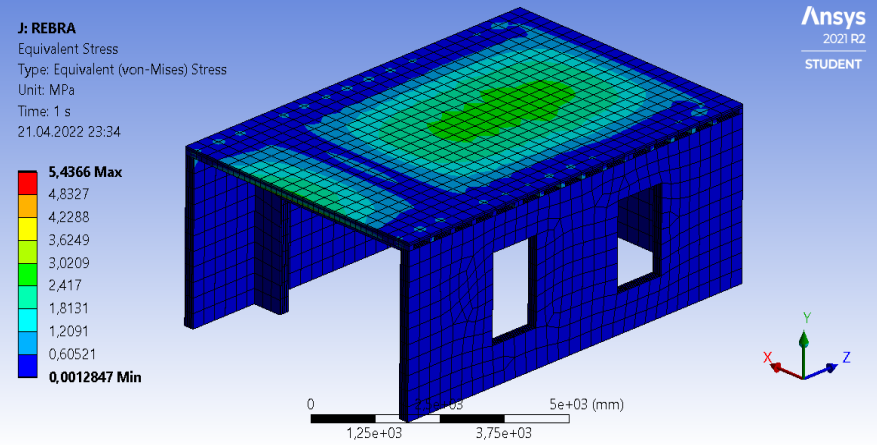
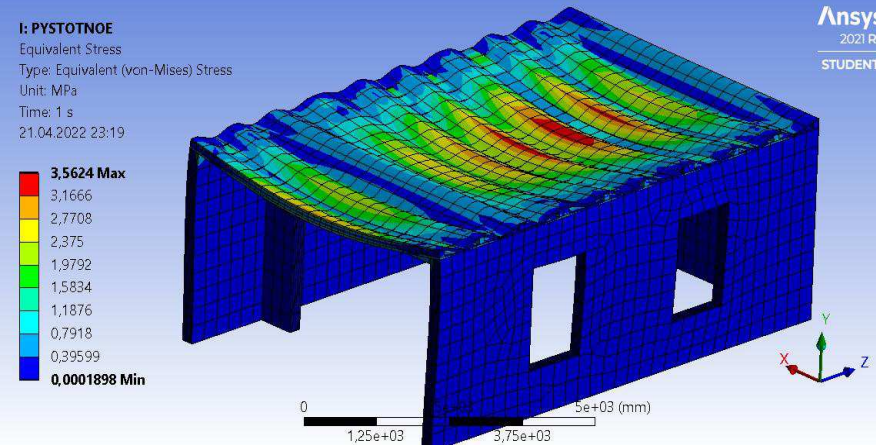
а)

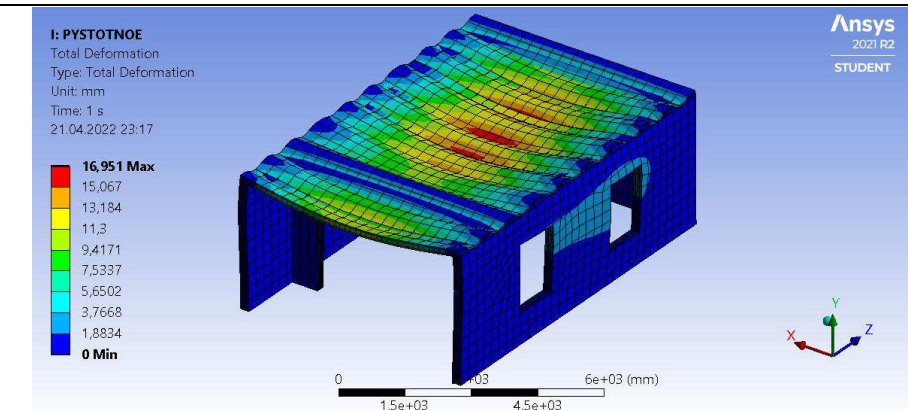
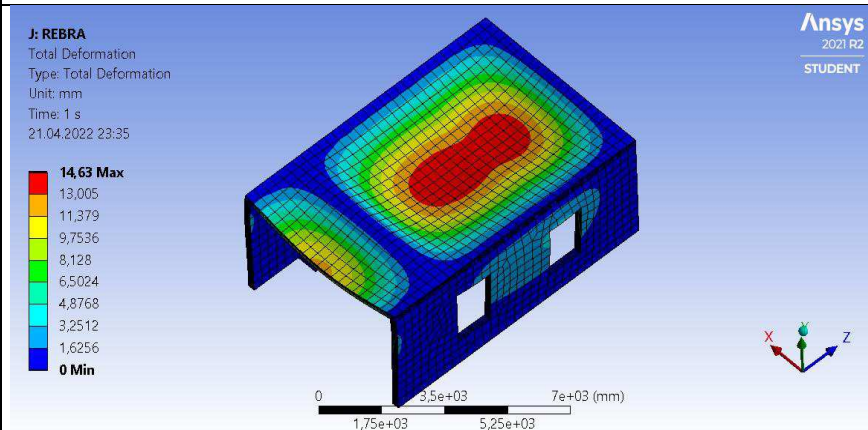
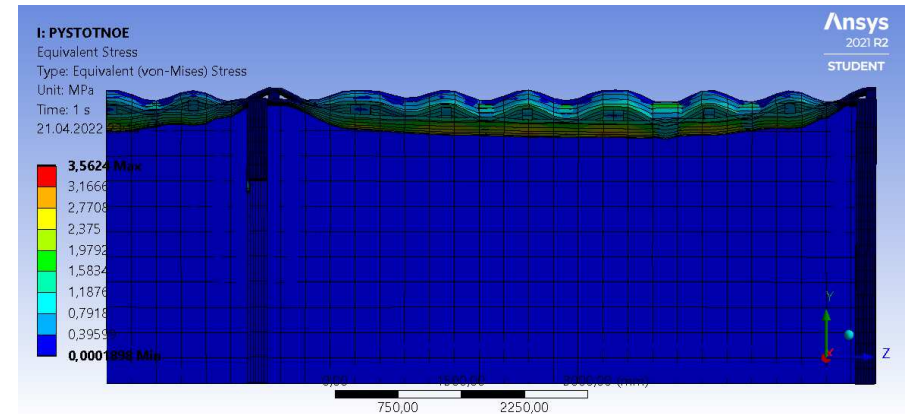
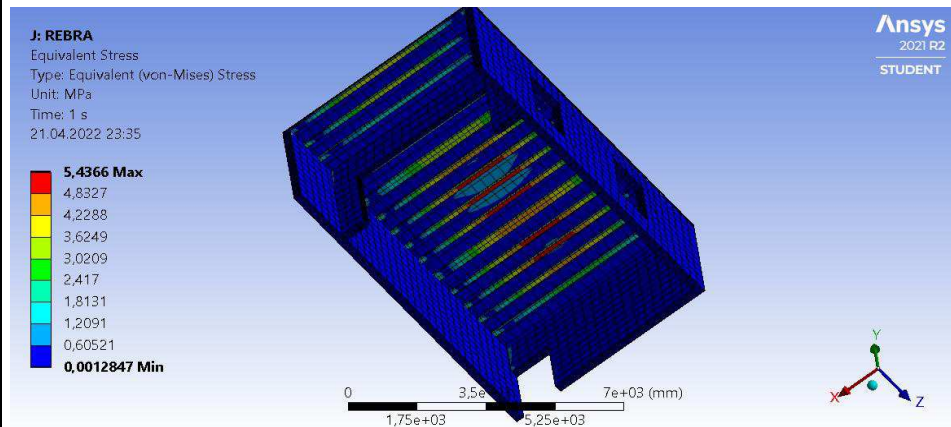


б)

а) – Верхний и нижний слои панели. б) Внутренние слои панели
Рисунок 2.34 – Результаты топологической оптимизации панели.

Таблица 2.6 – Два варианта конструкции плиты перекрытия

<p>1 вариант ребристая плита с двумя слоями CLT сверху, шаг ребер 570 мм. (размер плиты 3x6м)</p>	<p>2 вариант ребристая плита с двумя слоями из CLT сверху и снизу, шаг ребер 960 мм. (размер плиты 3x6м)</p>
	
<p>Масимальные значения напряжений 5,4 МПа.</p>	<p>Масимальные значения напряжений 3,5 МПа.</p>
 <p>J: REBRA Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 1 s 21.04.2022 23:34</p> <p>5,4366 Max 4,8327 4,2288 3,6249 3,0209 2,417 1,8131 1,2091 0,60521 0,0012847 Min</p>	 <p>I: PYSTOTNOE Equivalent Stress Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 1 s 21.04.2022 23:19</p> <p>3,5624 Max 3,1666 2,7708 2,375 1,9792 1,5834 1,1876 0,7918 0,39599 0,0001898 Min</p>



Максимальный прогиб в плите составил 14,63 мм, при

Максимальный прогиб в плите составил 16,9 мм, при допустимом 30 мм.

допустимом 30 мм.	
-------------------	--

По результатам проверки двух вариантов конструкции плиты перекрытия, следует, что наиболее оптимальным является вариант 2. Так как при большом шаге ребер, а следовательно меньшем расходе материала наблюдаются меньшие напряжения на 35% меньше чем в варианте 1, перемещения больше на 7% в варианте 1, но так же входят в границу предельно допустимых перемещений для данной конструкции. В ходе расчета рассматривались разные варианты сечения ребер жесткости, различный шаг, сводный анализ показал, что вариант 2 является наиболее предпочтительным и на 50% снижает использование клееной древесины, по сравнению с первоначальным объемом панели. Предлагаемый вариант плиты представлен на рисунке 2.35.

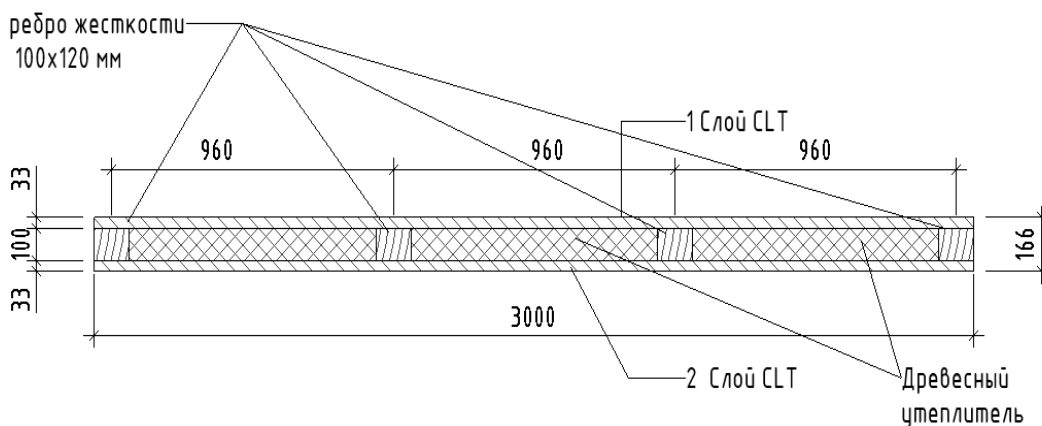


Рисунок 2.35 Ребристая плита перекрытия

Данный вариант плиты предполагает заполнения пустот древесным утеплителем, который предназначен для создания эффективной и экологически-чистой звуко/теплоизоляции дома, а также его ветрозащиты.

2.8 Параметрическая оптимизация по материалу

Для дальнейших расчетов необходимо перейти к более упрощенной модели материала с учетом ортотропных свойств CLT. Для этого необходимо провести параметрическую оптимизацию физико-механических свойств материала по заданным критериям: предельных напряжений и перемещений.

Цель оптимизации перейти от ортотропных свойств каждого слоя к усреднённым значениям ортотропных свойств для панели.

Table of Schematic D4: Optimization									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Name	Parameter	Objective			Constraint			
2			Type	Target	Tolerance	Type	Lower Bound	Upper Bound	Tolerance
3	Seek P1 = 7,128 mm	P1 - Total Deformation Maximum	Seek Target	7,128	0,001	No Constraint			
4	Seek P2 = 2,695 MPa	P2 - Equivalent Stress Maximum	Seek Target	2,695	0,001	No Constraint			
*		Select a Parameter							

Рисунок 2.36 – Целевые параметры

Candidate Points							
9		Candidate Point 1	Candidate Point 1 (verified)	Candidate Point 2	Candidate Point 2 (verified)	Candidate Point 3	Candidate Point 3 (verified)
10	P9 - Young's Modulus X direction (MPa)		11703		11694		11584
11	P10 - Young's Modulus Y direction (MPa)		437,23		410,03		357,94
12	P11 - Young's Modulus Z direction (MPa)		381,38		386,75		437,35
13	P12 - Shear Modulus XY (MPa)		651,34		727,14		790,78
14	P13 - Shear Modulus YZ (MPa)		72,728		72,737		74,468
15	P14 - Shear Modulus XZ (MPa)		843,39		711,17		731,53
16	P1 - Total Deformation Maximum (mm)	★★★ 7,1279	★★★ 7,1294	★★★ 7,1285	★★★ 7,1295	★★★ 7,127	★★★ 7,1156
17	P2 - Equivalent Stress Maximum (MPa)	★★★ 2,6949	★★★ 2,695	★★★ 2,6945	★★★ 2,6918	★★★ 2,696	★★★ 2,6399

Рисунок 2.37 – Верифицированные точки

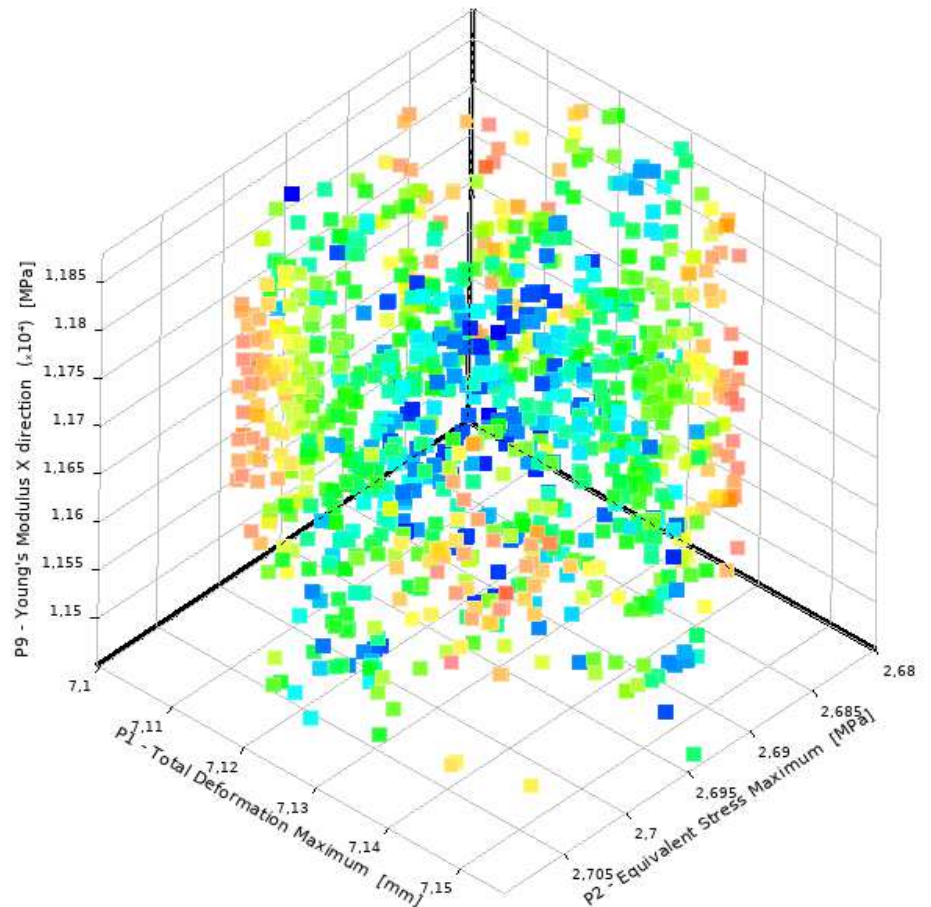


Рисунок 2.38 – Поверхность отклика

Properties of Outline Row 8: Wood, ORTOTROP 2				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	500	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			<input checked="" type="checkbox"/>
5	Coefficient of Thermal Expansion	4,69E-06	C ⁻¹	
6	Isotropic Elasticity			<input checked="" type="checkbox"/>
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio		
8	Young's Modulus	2,278E+10	Pa	
9	Poisson's Ratio	0,3742		
10	Bulk Modulus	3,018E+10	Pa	
11	Shear Modulus	8,2885E+09	Pa	
12	Orthotropic Elasticity			<input type="checkbox"/>
13	Young's Modulus X direction	11694	MPa	
14	Young's Modulus Y direction	410,03	MPa	
15	Young's Modulus Z direction	386,75	MPa	
16	Poisson's Ratio XY	0,35		
17	Poisson's Ratio YZ	0,07		
18	Poisson's Ratio XZ	0,07		
19	Shear Modulus XY	727,14	MPa	
20	Shear Modulus YZ	72,737	MPa	
21	Shear Modulus XZ	711,17	MPa	
22	Tensile Yield Strength	Tabular		<input type="checkbox"/>
23	Tensile Ultimate Strength	Tabular		<input type="checkbox"/>

Рисунок 2.39 – Результат параметрической оптимизации

Была проведена параметрическая оптимизация физико-механических свойств материала в Ansys. В ходе оптимизации были получены усредненные значения физико-механических свойств материала, при которых не превышаются значения эквивалентах напряжений и прогиба от заранее заданной нагрузки.

Основные выводы по второй главе

1. Был произведен расчёт панели из CLT на разных размерах сетки от 300 мм до 150 мм., с учетом ортотропных и изотропных свойств материала. Расчет показал, что с уменьшением размера сетки в ортотропной многослойной плите уменьшаются перемещения на 15%, тогда как в изотропной плите перемещения практически не изменились. Сравнивая изотропную и ортотропную модель можно сделать следующий вывод: при более мелком размере сетки в ортотропной плите падают перемещения, разница с изотропной плитой составляет около 40% (12,7 мм., перемещения в изотропной плите и 7,32 мм., в ортотропной плите). Сравнивая расчет в ПК Ansys и ПК Лира Софт с учетом изотропных свойств материала наблюдается разница в полученных значениях эквивалентных напряжений и перемещений в 7-9%. Ортотропный материал с многослойной структурой задать в данной версии Лира Софт не представляется возможным.

2. Данные расчета показали, что наиболее выгодная в работе модель – это ортотропная многослойная панель с учетом разных физико-механических свойств по слоям CLT панели в продольном и поперечном направлении, в сравнении с изотропной моделью материала.

3. Решены задачи минимизации массы слоистых элементов конструкций с учетом ортотропных свойств материала, при ограничениях на напряженно-деформированное состояние, с помощью инструмента топологической оптимизации в ПК Ansys. По результатам оптимизации был предложен вариант конструкции панели перекрытия подкрепленный ребрами и закрытый снизу и сверху слоем CLT. Данный вариант конструкции панели перекрытия верифицирован статическим расчетом в ПК Ansys.

ГЛАВА 3. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ НДС ДЕРЕВЯННОГО МНОГОЭТАЖНОГО ЗДАНИЯ ИЗ CLT ПАНЕЛЕЙ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Для исследования НДС 9-ми этажного жилого здания Kajstaden на основе имеющихся чертежей рисунки 2.1–2.3, разработана геометрическая и конечно-элементная модель здания высотой 29,7 м, имеющая в плане прямоугольную форму с размерами в осях 25х16 м.

Выполнен статический расчет здания и два вида расчетов: на сейсмические воздействия- спектральным методом (по нормам СП 14.13330.2018) и расчет на горизонтальное воздействие акселерограммы землетрясения Эль-Центро 1940 в программном комплексе Лира 10.12.

3.1. Разработка пространственной расчетной модели многоэтажного здания из CLT панелей ПК LIRA 10.12

Несущая конструкция представляет собой панельное бескаркасное здание с поперечными несущими стенами, включающие жесткое соединение фундаментной плиты и стеновых панелей.

Толщина несущих CLT панелей и диафрагм жесткости – 215 мм., толщина перегородок – 129 мм.

Толщина междуэтажных CLT плит перекрытий 169 мм. Высота этажа 3 м.

Пространственная жесткость и устойчивость здания обеспечивается внутренними поперечными стенами, в том числе и стенами лестничных клеток, соединяющимися с продольными наружными стенами, образуя жесткую пространственную коробку.

Технические характеристики CLT панелей представлены в приложении А.

Планы 1–го и типового этажей, объемная модель многоэтажного здания приведены на рисунках 3.1- 3.3.

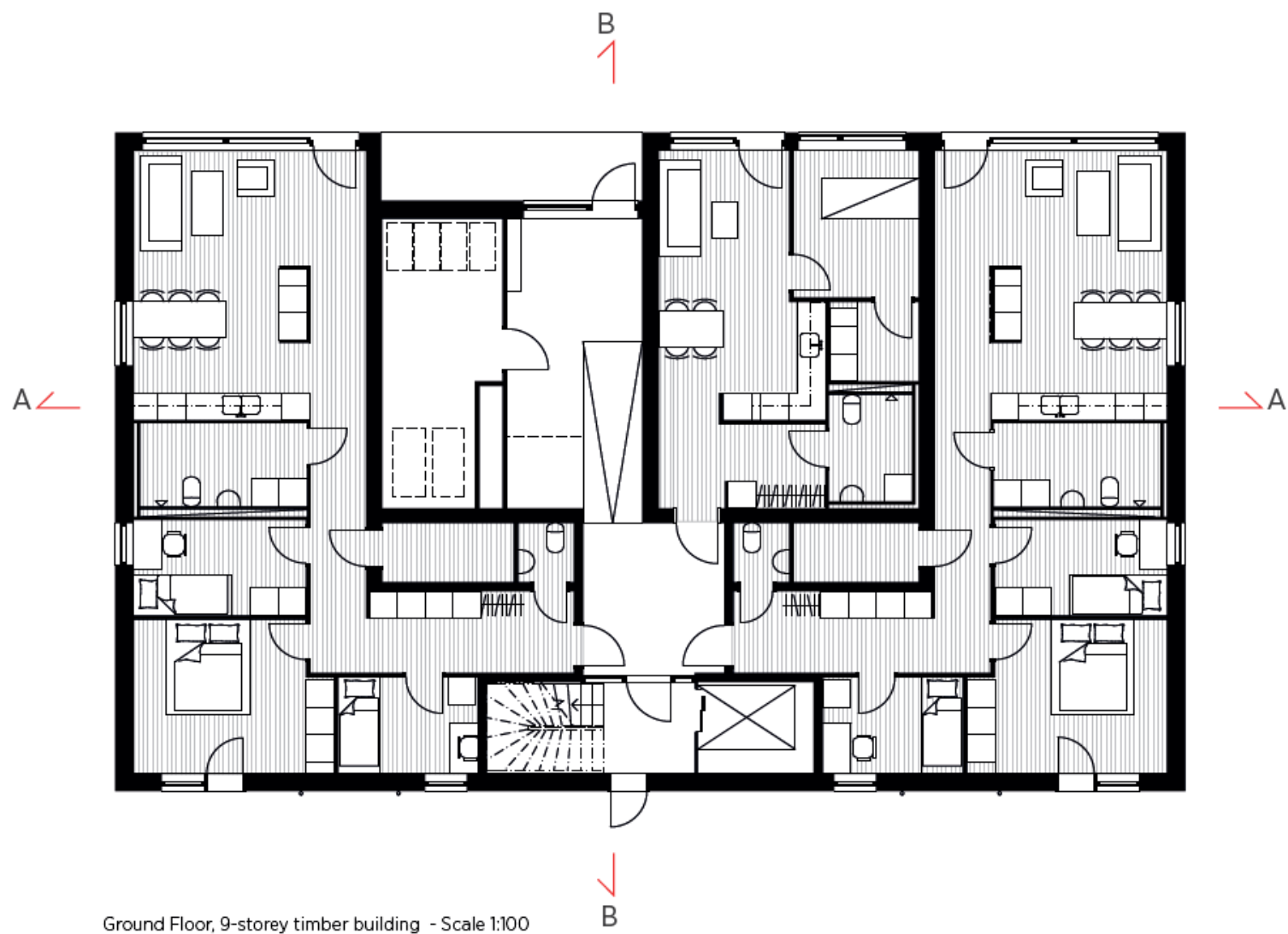


Рисунок 3.1 – План первого этажа

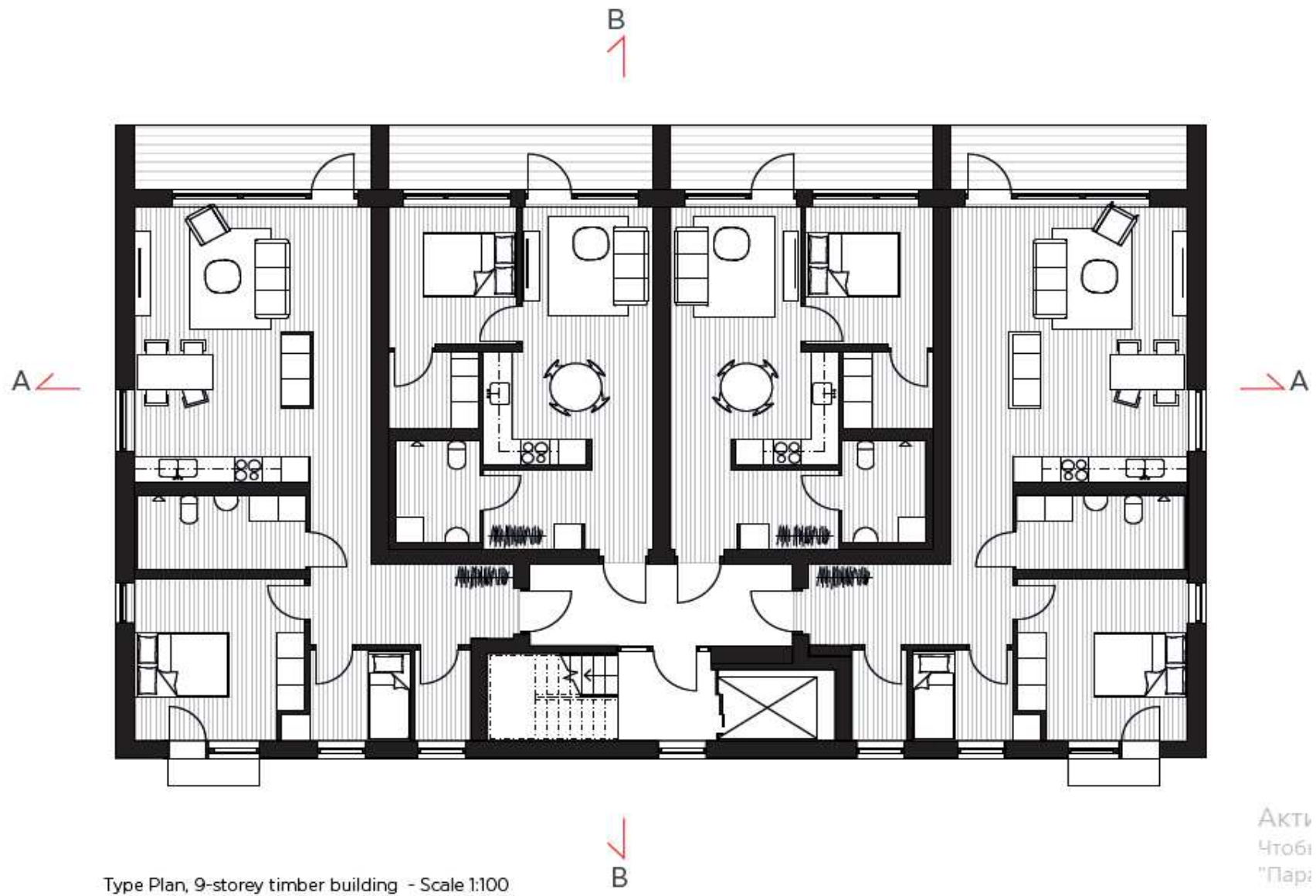
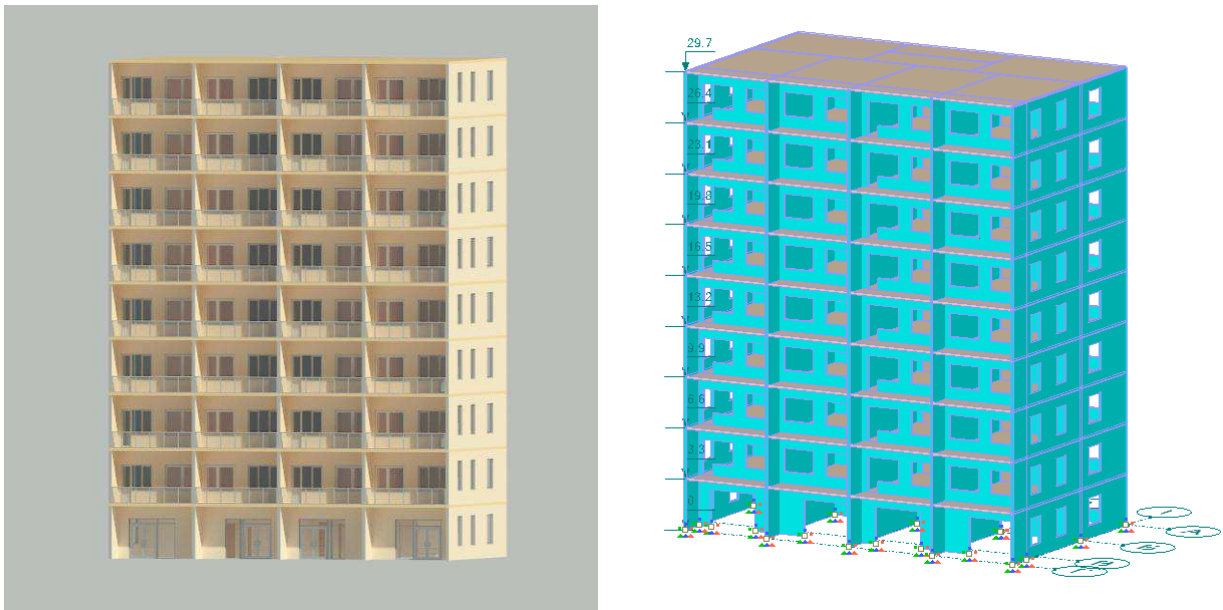


Рисунок 3.2 – План типового этажа



Постоянные нагрузки:

Собственный вес конструкций (стеновые панели, лестничные марши, плит перекрытия) задается автоматически в программе Лира заданием собственного веса CLT панелей с коэффициентом 1,2 согласно СП 20.13330.2011 [31].

Полезная нагрузка:

Нормативное значение - 1,5 кПа

Коэффициенты надежности по нагрузке γ_f для равномерно распределенных нагрузок следует принимать:

1,3 - при полном нормативном значении менее 2,0 кПа;

1,2 - при полном нормативном значении 2,0 кПа и более.

Временные нагрузки:

Снеговая. Расчетное значение $S = 1,47$ кН/м²,

Ветровая нагрузка задана с помощью внутреннего калькулятора в Лира 10.12, согласно СП 20.13330.2016 [31].

Таблица 3.1 – Распределения ветровой нагрузки по зданию

Отметка м.	Расчетное давление кН/м ²	Отметка м.	Расчетное давление кН/м ²
0	0,209	16	0,328
1	0,209	17	0,336
2	0,209	18	0,343
3	0,209	19	0,351
4	0,209	20	0,358
5	0,209	21	0,365
6	0,221	22	0,372
7	0,234	23	0,379
8	0,246	24	0,385
9	0,259	25	0,392
10	0,271	26	0,398
11	0,282	27	0,404
12	0,292	28	0,41
13	0,301	29	0,415
14	0,31	29,7	0,419
15	0,319		

Сейсмическая нагрузка

Так как многоэтажное здание располагается в 6-8 сейсмическом районе согласно карт ОСР-2015 А, В, С, то кроме расчетов на основные нагрузки

необходимо выполнить расчет на сейсмику согласно СП 14.13330.2018 г. [33], который распространяется на область проектирования зданий и сооружений, возводимых в районах сейсмичностью 7, 8 и 9 баллов.

Значение сейсмической нагрузки уточнялось с учетом сочетаний сейсмичности для данной площадки на картах А, В, С, уровня ответственности и назначения сооружения согласно Приложению, А СП 14.13330.2018 [33]. При этом конструкции и основания зданий и сооружений, проектируемых для строительства в сейсмических районах, должны рассчитываться на основные и особые сочетания нагрузок с учетом сейсмических воздействий, определяющихся по картам ОСР-2015 (А, В, С).

При выполнении расчетов зданий и сооружений с учетом сейсмических воздействий рекомендуется использовать две расчетные ситуации: 1) сейсмические нагрузки, соответствующие уровню проектное землетрясение (ПЗ), целью расчета которой является предотвращение частичной или полной потери эксплуатационных свойств сооружением; 2) сейсмические нагрузки соответствующие уровню максимальное расчетное землетрясение (МРЗ), для определения расчетных сейсмических нагрузок которого следует использовать карты ОСР-2015-В для зданий и сооружений, перечисленных в графе 3 таблицы 3 СП 14.13330.2018.

Для зданий и сооружений, имеющих простое конструктивно-планировочное решение, разрешается принимать расчетные сейсмические нагрузки, действующие горизонтально в направлении их продольных и поперечных осей. Действие сейсмических нагрузок в указанных направлениях можно учитывать отдельно.

Простое или сложное конструктивно-планировочное решение зданий и сооружений определяется согласно требованиям СП 14.1330.2018.

3.2. Статический расчет

Для статического расчета по ПК Лира были приняты следующие загрузки:

Таблица 3.2 – Сочетания нагрузок

№	Собственный вес	Ветровая нагрузка по бук. оси	Сейсмическая нагрузка	Эксплуатационная нагрузка	Снеговая нагрузка	Ветровая нагрузка по цифр. осям	Собственный вес покрытия
С1	1	1	0	0.7	0.8	0	1
С2	1	0.7	0	1	0.9	0.7	0.9
С3	1	0.9	0	0.9	0.7	0.9	1
С4	1	0.7	0	0.9	0.9	0.7	0.9
С5	1	0.7	0	0.9	0.9	0.7	1

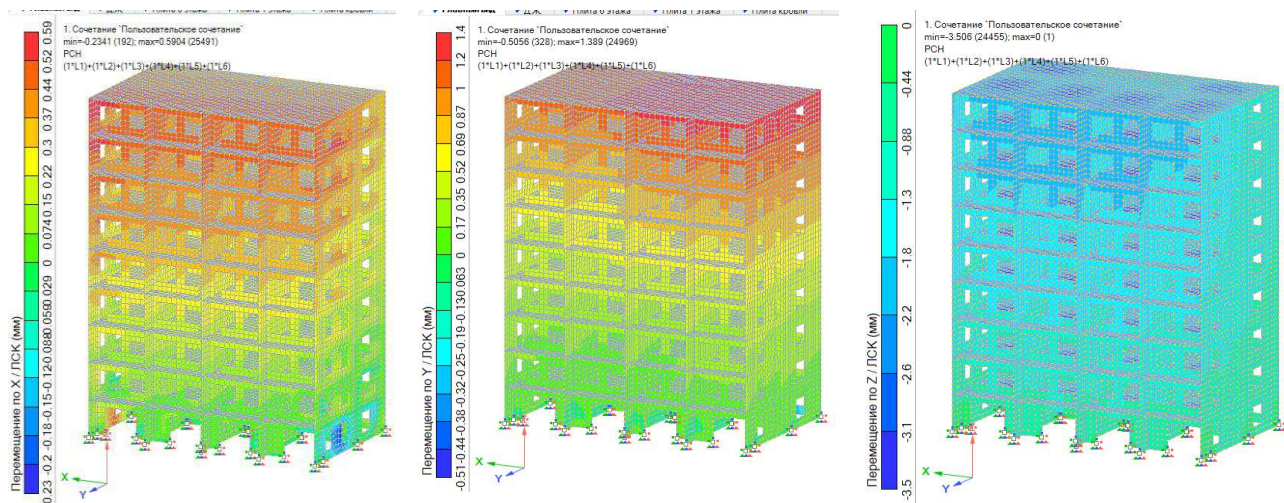
По результатам расчетов наиболее невыгодной комбинацией загружений является комбинация С3.

Для использования в анализе НДС выберем следующие конструктивные элементы здания:

- для анализа перемещения здания выберем все три оси X, Y, и Z;
- для анализа напряжений и моментов в перекрытиях выберем перекрытие первого этажа, 5-го этажа и покрытие 9-го этажа;
- для анализа напряжений и моментов в диафрагмах жесткости выберем диафрагму, расположенную лестничной клетки.

В остальных расчетах данной главы будем выбирать эти же конструктивные элементы, при этом анализируя максимальные значения и в других элементах.

Результаты статического расчета здания из CLT панелей в виде полных линейных перемещений и усилий приведены на рисунке 2.4-2.10 и в таблице 2.3.



Перемещения по оси X- 0.6 мм.

Перемещения по оси Y – 1.5 мм.

Перемещения по оси Z- 3.5 мм

Рисунок 3.4 –Линейные перемещения многоэтажного здания при статическом расчете при комбинации нагрузок СЗ

Из рисунка 3.4. видно, что наибольшие перемещения возникают в верхней здания и составляют 3.5 мм по оси Z.

Полученные перемещения меньше нормативного значения для зданий высотой до 150м – $[f]= h/500$, что для данного здания равняется 59.4 мм.

Далее представлены цветовые схемы отображения усилий в CLT панелях во всем здании, максимальные значения усилий сведены в таблицу 3.3. Максимально допустимые значения сопротивления изгибу и прочности на сжатие вдоль волокон соответствуют техническим значением производителя панелей из древесины перекрестно клееной Промстройлес, подробные характеристики приведены в Приложении А.

Таблица 3.3 – Максимальные значения усилий при статическом расчете

Параметры	Значения	Элемент схемы	Прочность на сжатие вдоль волокон, МПа
N_x МПа	-1,91	Стеновые панели 1-го этажа	14,9
N_y МПа	-4,65	Стеновые панели 1-го этажа	
M_x (кН*м)/м	-6,7	Панели перекрытия	
M_y (кН*м)/м	-5,7	Панели перекрытия	
σ_E МПа	1,8	Панели перекрытия	
σ_{SM} МПа	-5,8	Стеновые панели 1-го этажа	

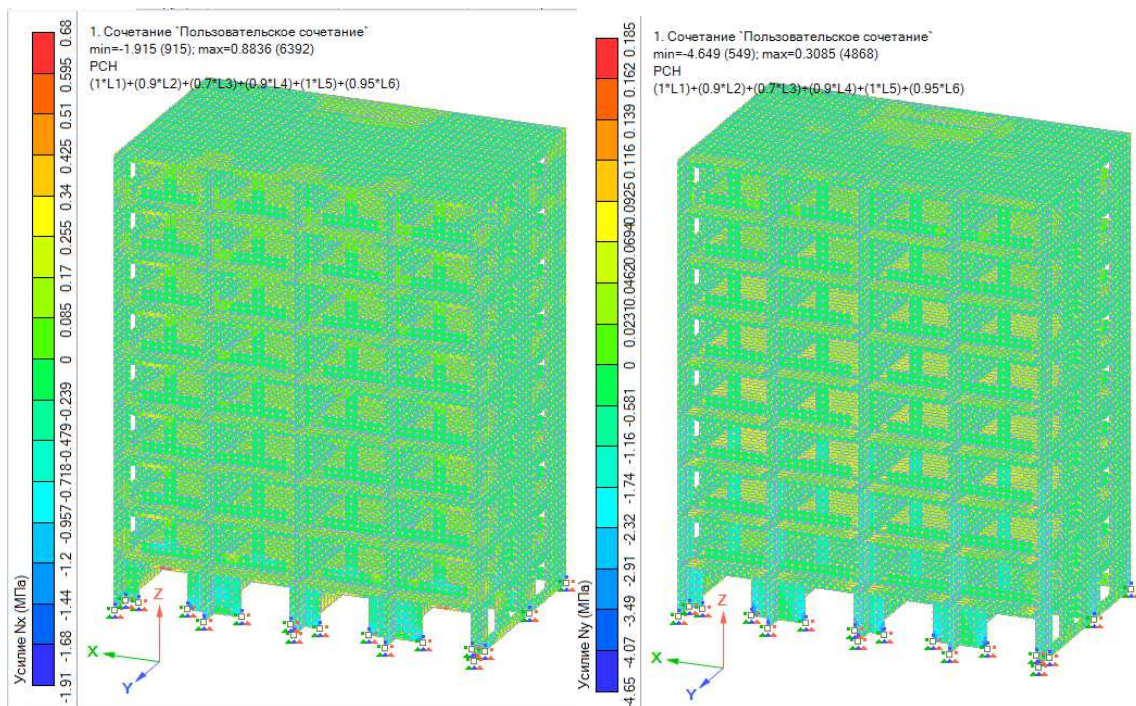


Рисунок 3.5 – Цветовая схема отображения усилий N_{xy} при статическом расчете при комбинации нагрузок С3

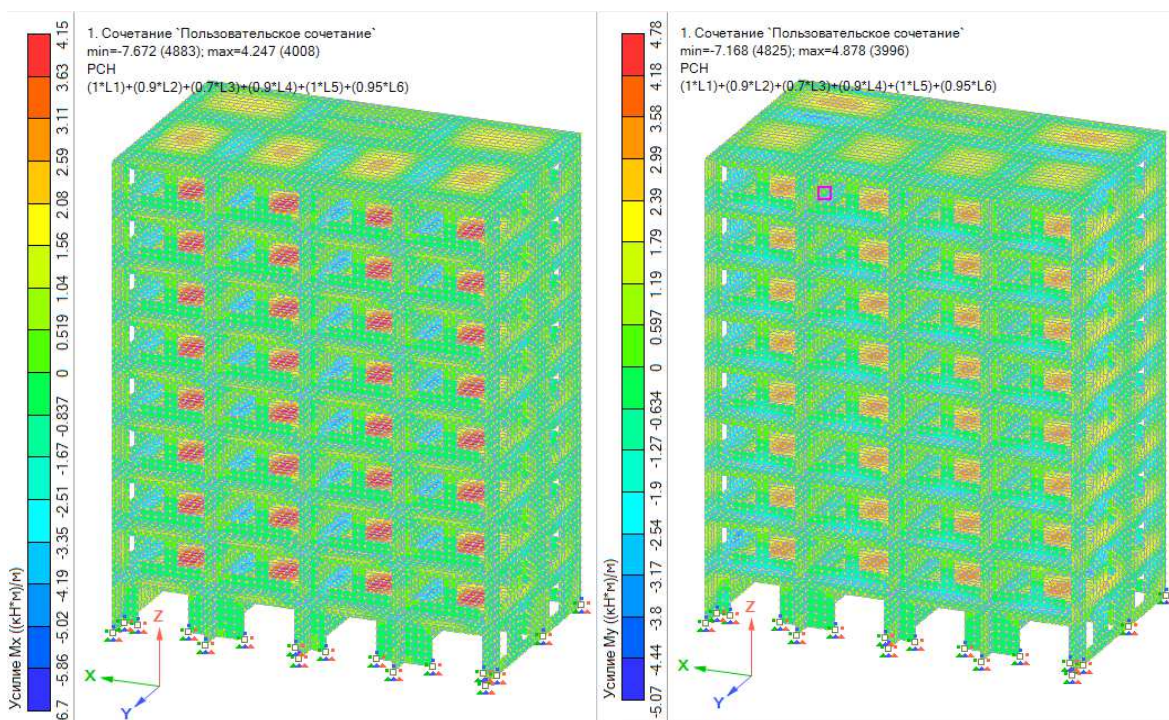


Рисунок 3.6 – Цветовая схема отображения усилий $M_x M_y$ при статическом расчете при комбинации нагрузок С3

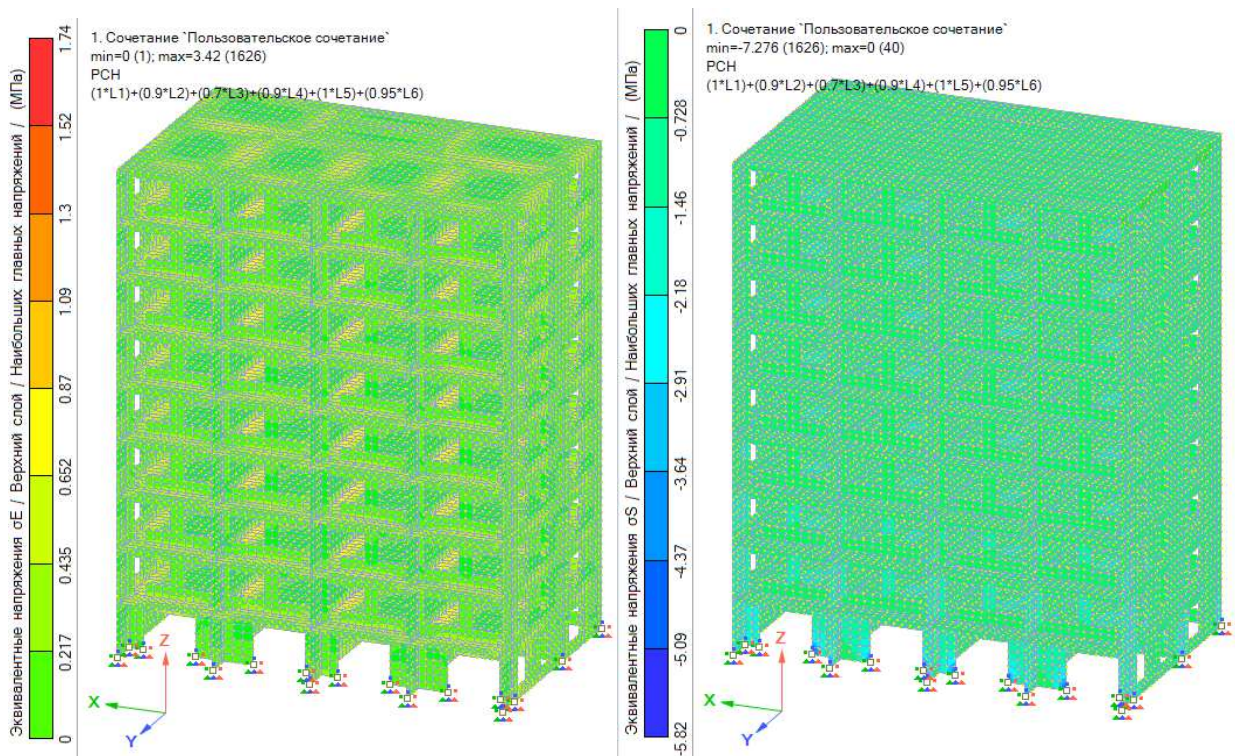


Рисунок 3.7 – Цветовая схема отображения эквивалентных напряжений σ_S и σ_E при статическом расчете при комбинации нагрузок СЗ

Далее на рисунках 3.8-3.19 представлены цветовые схемы отображения усилий в CLT панелях плиты покрытия, перекрытия 1-го этажа и перекрытия 5 этажа, максимальные значения усилий сведены в таблицу 3.4

Таблица 3.4 – Максимальные значения усилий в плитах перекрытия

Параметры	Плита 1-го этажа	Плита 5-го этажа	Плита покрытия	Сопротивление изгибу, Мпа
N_x МПа	0,40	0,085	-0,058	9,4
N_y КПа	0,28	0,13	-0,031	
M_x (кН*м)/м	-7,16	-6,27	-3,69	
M_y (кН*м)/м	-6,23	-6,06	-3,68	
σ_E МПа	2,3	1,34	0,76	
σ_{SM} МПа	-5,7	-0,95	-0,62	

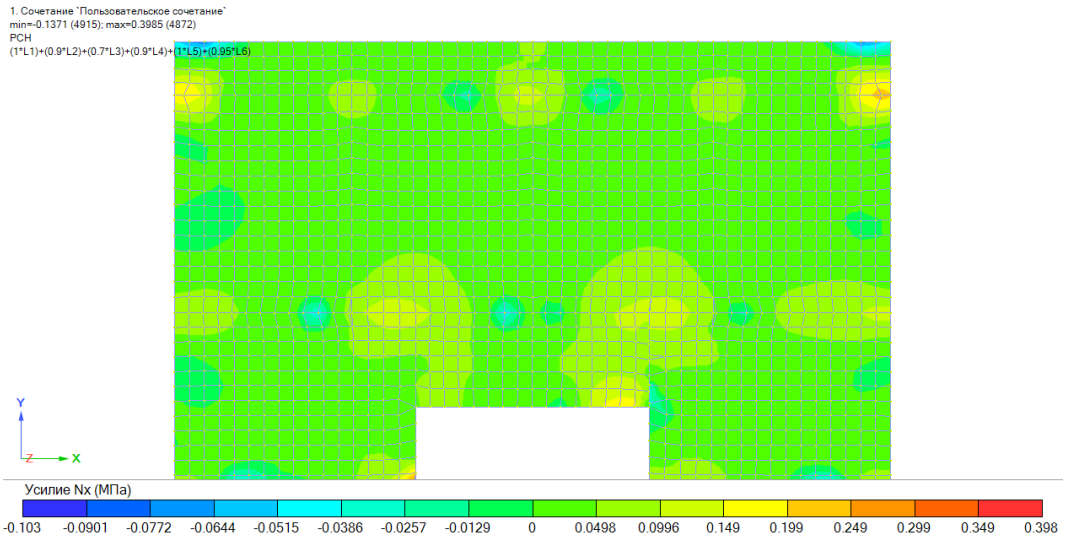


Рисунок 3.8 – Изополя напряжений N_x в плите перекрытия 1-го этажа

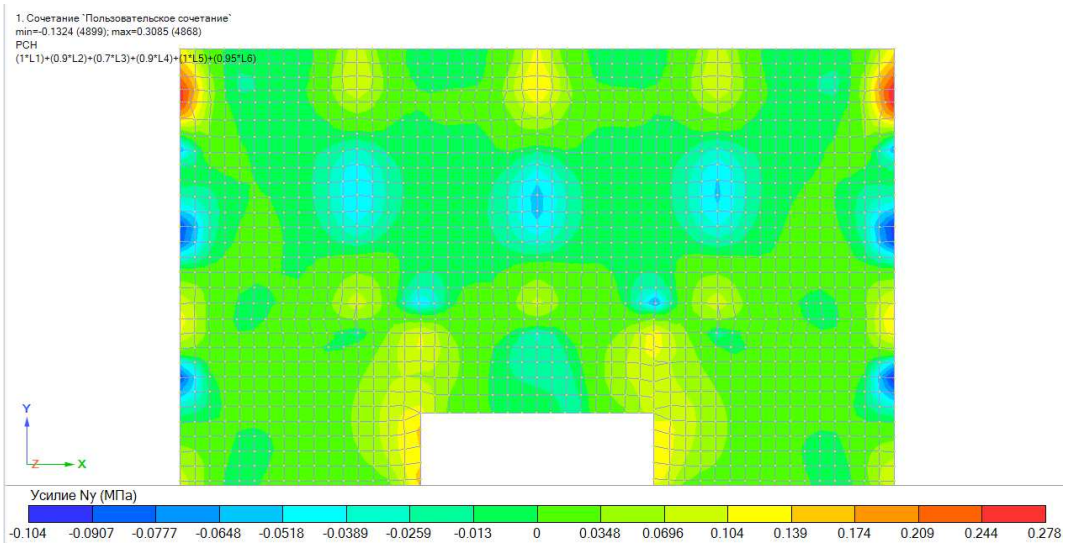


Рисунок 3.9 – Изополя напряжений N_y в плите перекрытия 1-го этажа

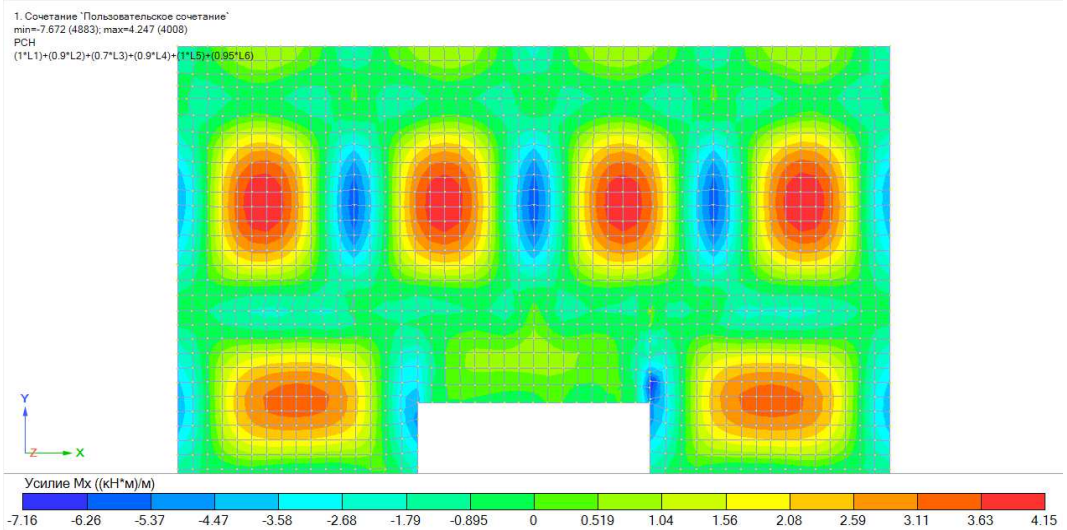


Рисунок 3.10 – Изополя напряжений M_x в перекрытия 1-го этажа

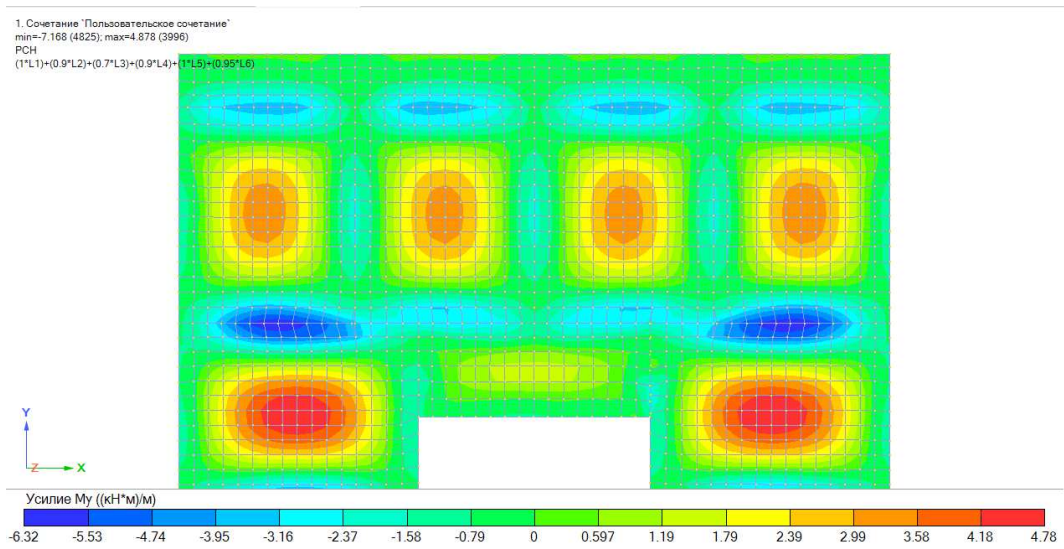


Рисунок 3.11 – Изополя напряжений M_y в перекрытия 1-го этажа

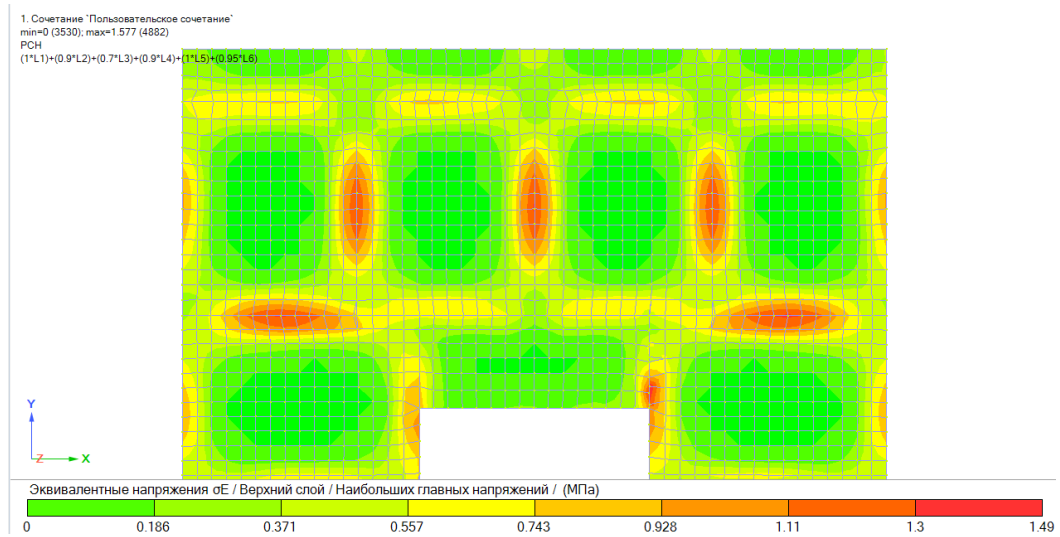


Рисунок 3.12 – Изополя эквивалентных напряжений σ_E в перекрытия 1-го этажа

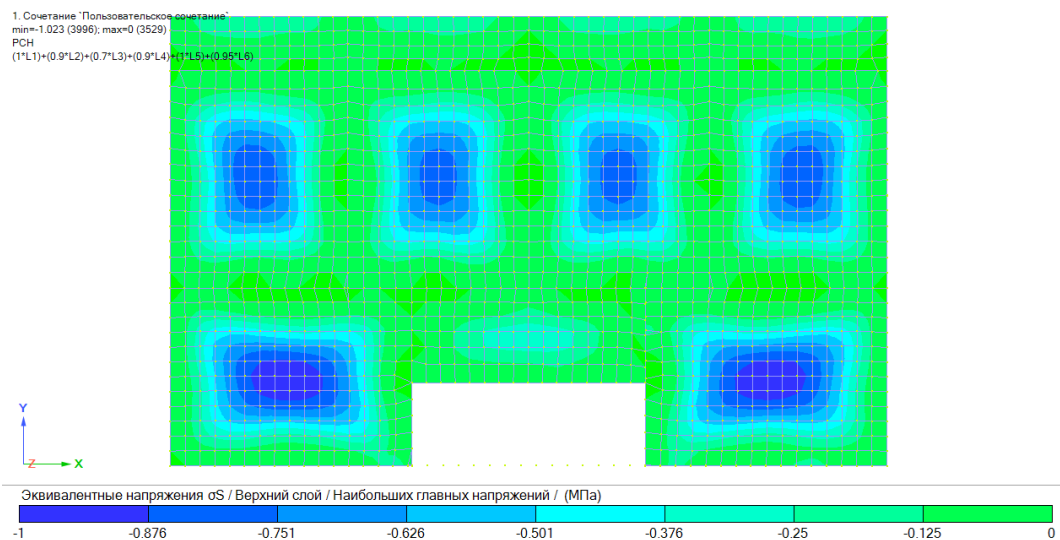


Рисунок 3.13 – Изополя эквивалентных напряжений σ_S в перекрытия 1-го этажа

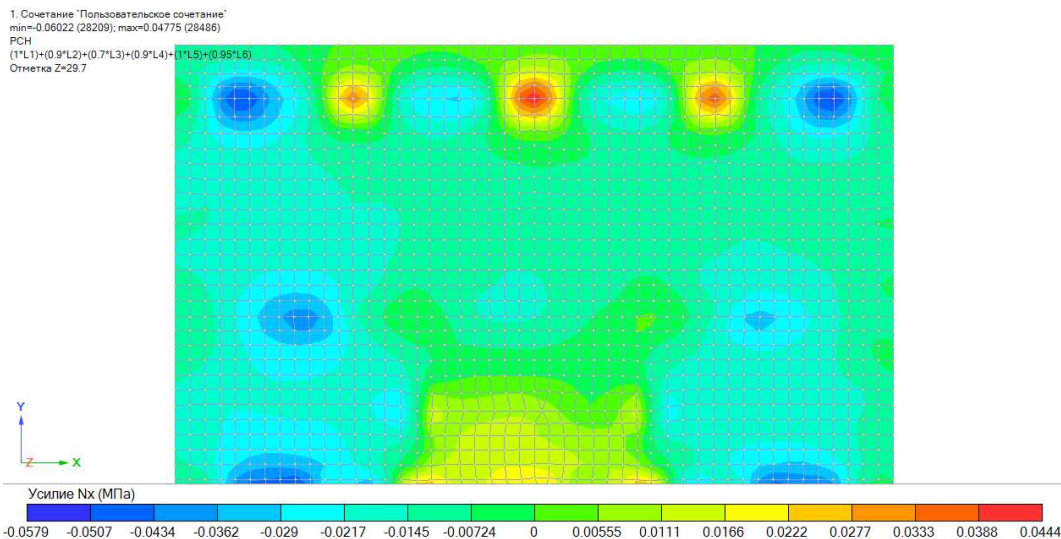


Рисунок 3.14 – Изополя напряжений N_x в плите покрытия

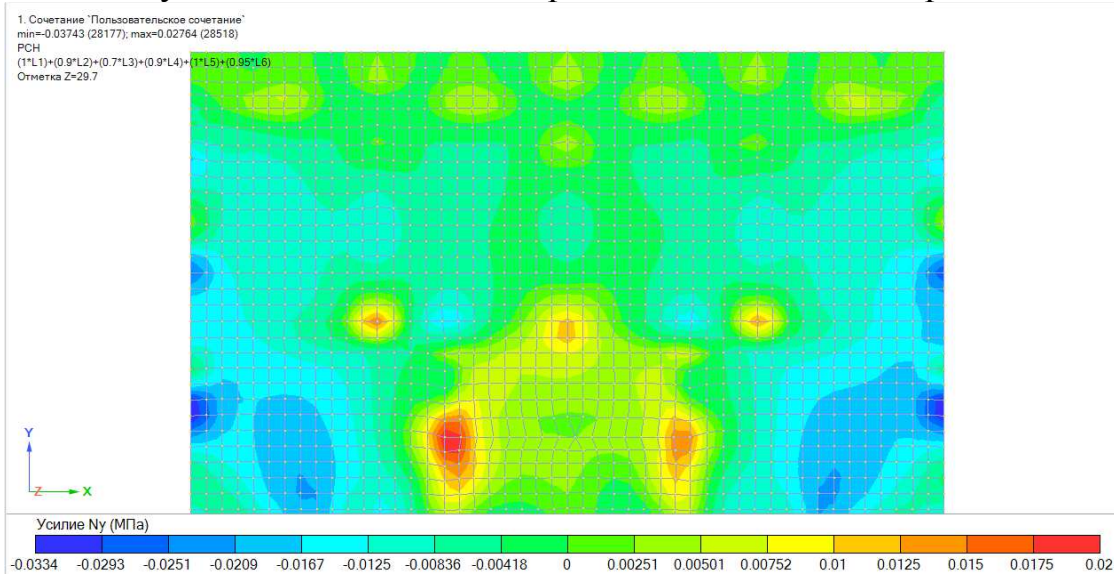


Рисунок 3.15 – Изополя напряжений N_y в плите покрытия

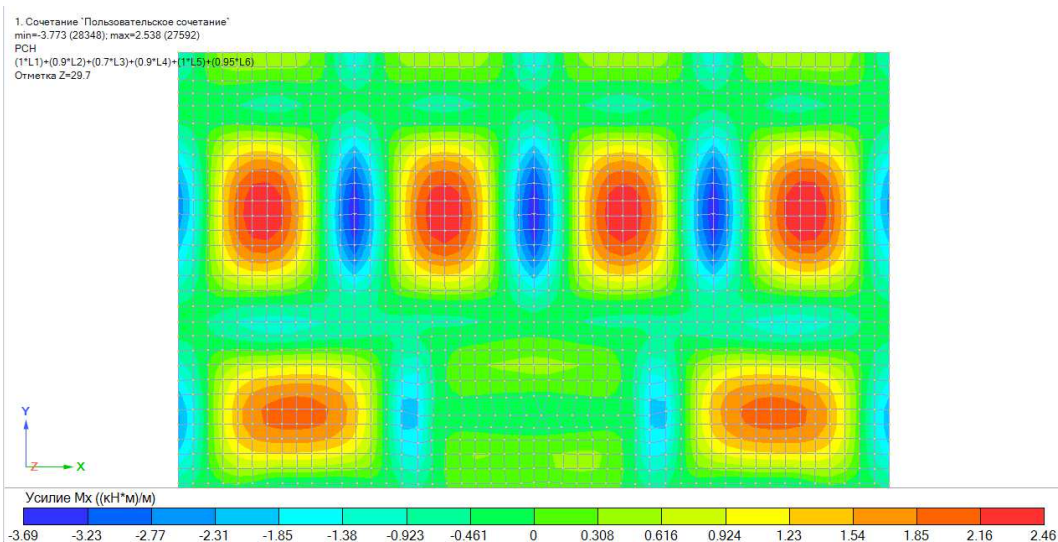


Рисунок 3.16 – Изополя напряжений M_x в плите покрытия

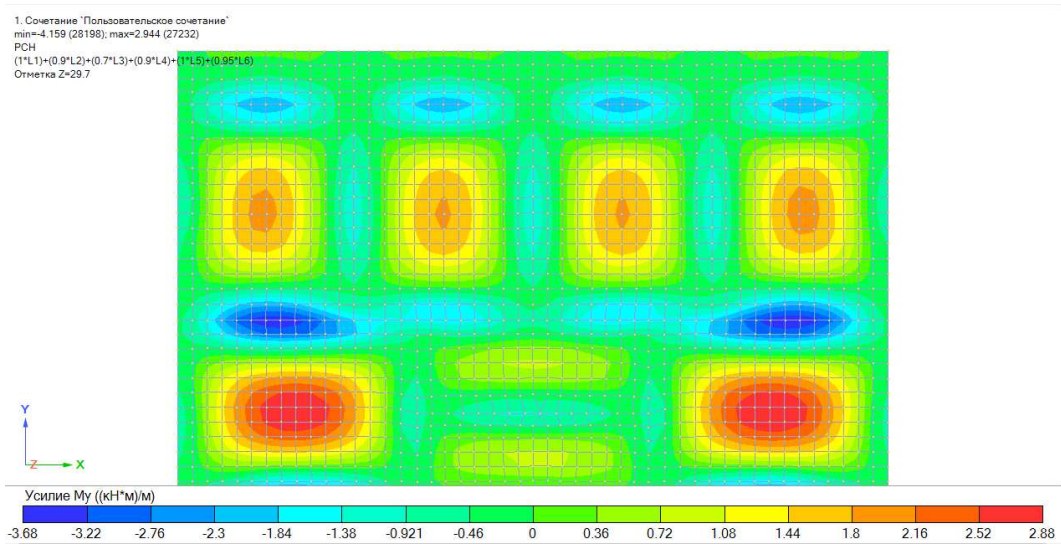


Рисунок 3.17 – Изополя напряжений M_y в плите покрытия

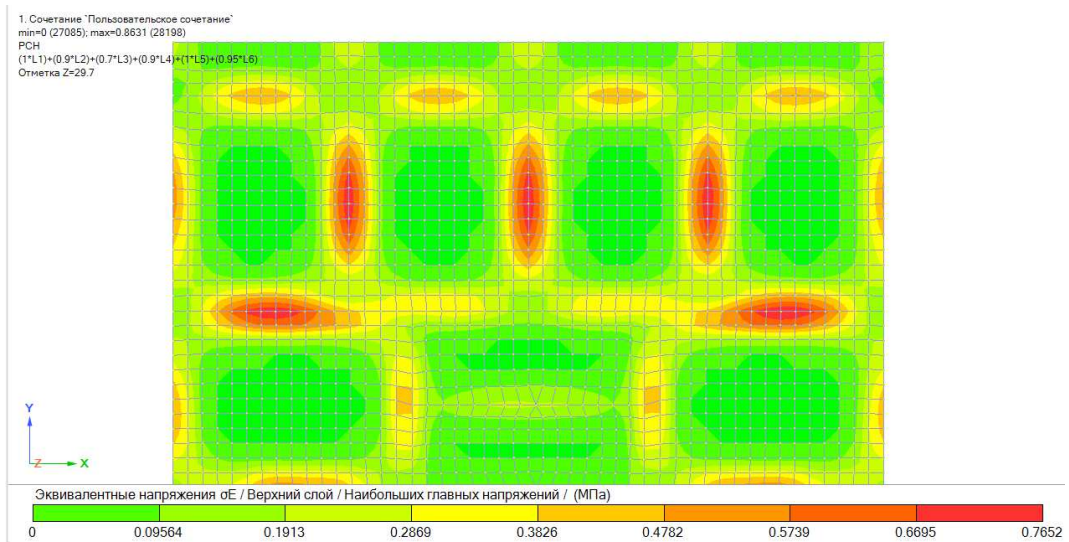


Рисунок 3.18 – Изополя эквивалентных напряжений σ_E в плите покрытия

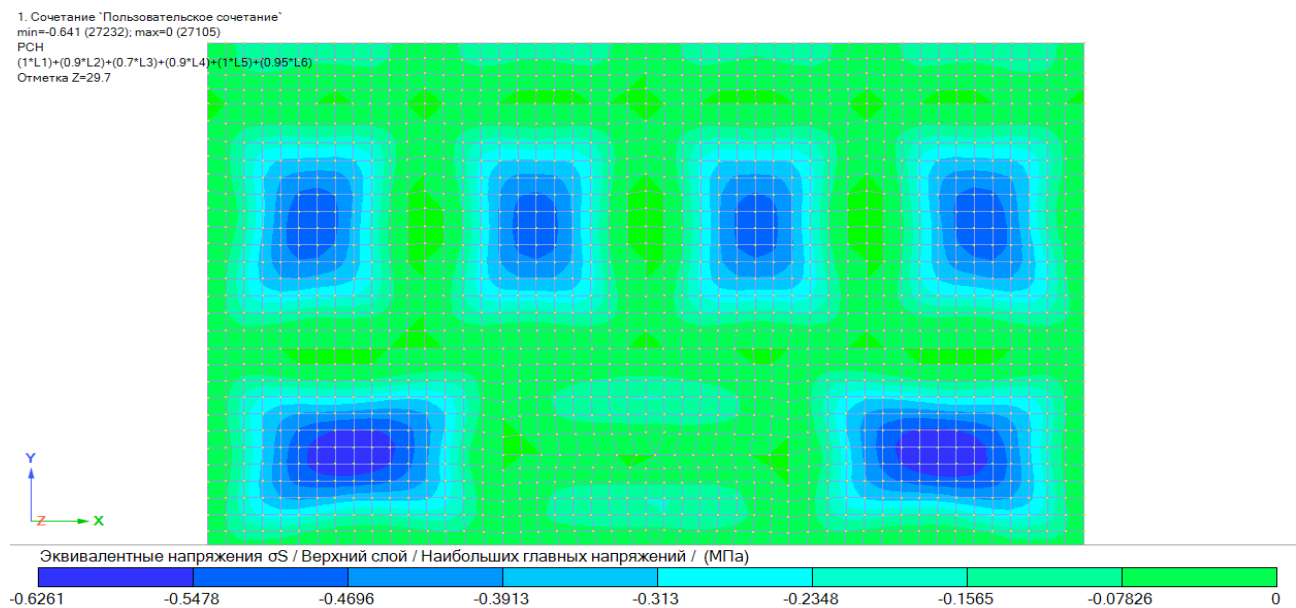
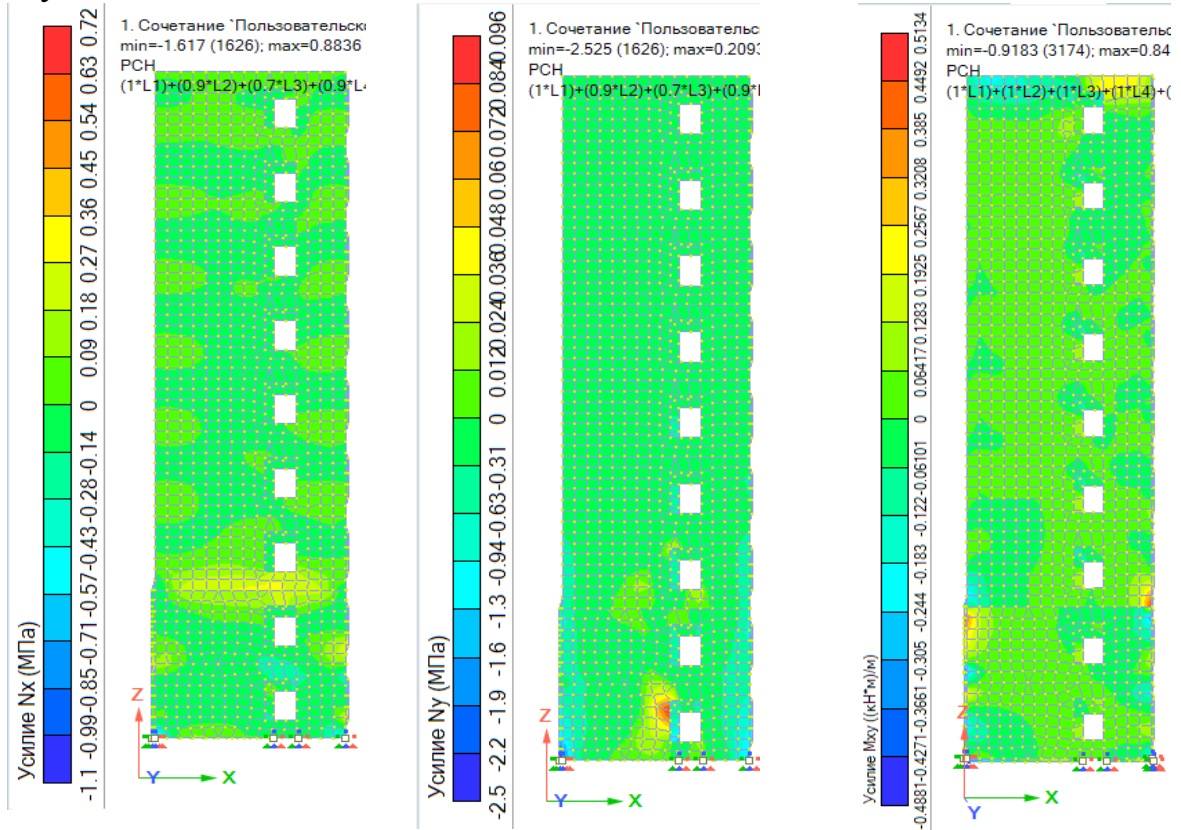


Рисунок 3.19 – Изополя эквивалентных напряжений σ_S в плите покрытия

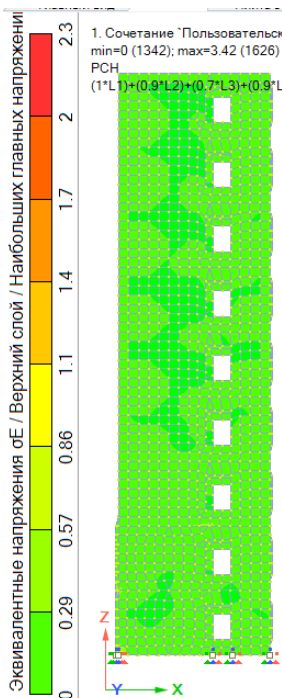
Цветовые схемы отображения усилий в диафрагмах жесткости показаны на рисунках 3.20.



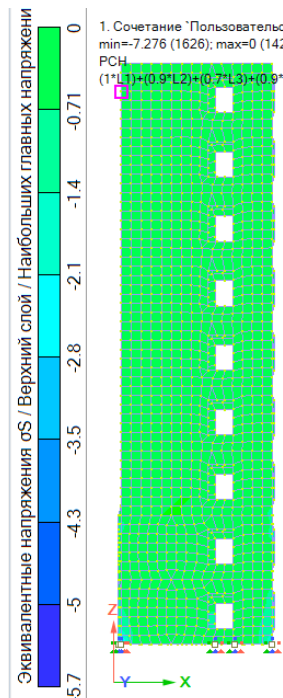
$N_x = -1,1 \text{ МПа}$

$N_y = -2,5 \text{ МПа}$

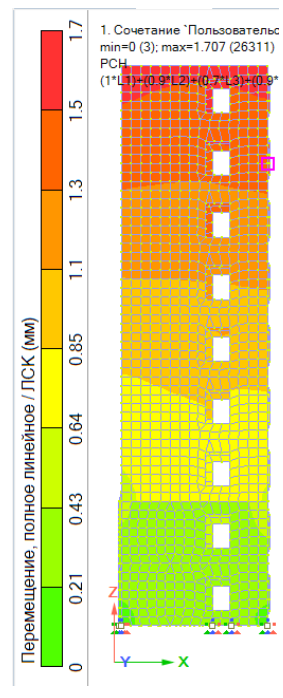
$M_{xy} = 0,51 (\text{кН*м})/\text{м}$



$\sigma_E = 2,3 \text{ МПа}$



$\sigma_S = -5,7 \text{ МПа}$



Перемещения = 1,7 мм

Рисунок 3.20 – Изополя напряжений и моментов в диафрагме жесткости при статическом расчете при комбинации нагрузок С3

Из рисунка 3.20 видно, что наиболее напряжена нижняя часть диафрагмы жесткости, продольные усилия в которой составляют: $N_x = -1,1$ МПа, $N_y = -2,5$ МПа. Наибольшие моменты возникают в верхней части диафрагмы жесткости и составляют $M_{xy} = -0,51$ (кН*м)/м. Эквивалентные напряжения σ_E и σ_S составляют 2,3 МПа и -5,7 МПа соответственно, при нормативном значении сопротивления изгибу 9,38 МПа и нормативном значении прочности на сжатие вдоль волокон 15 МПа. Результаты сравнения полученных напряжений и усилий от действия основной комбинации нагрузок С3 представлены на рисунке 3.21

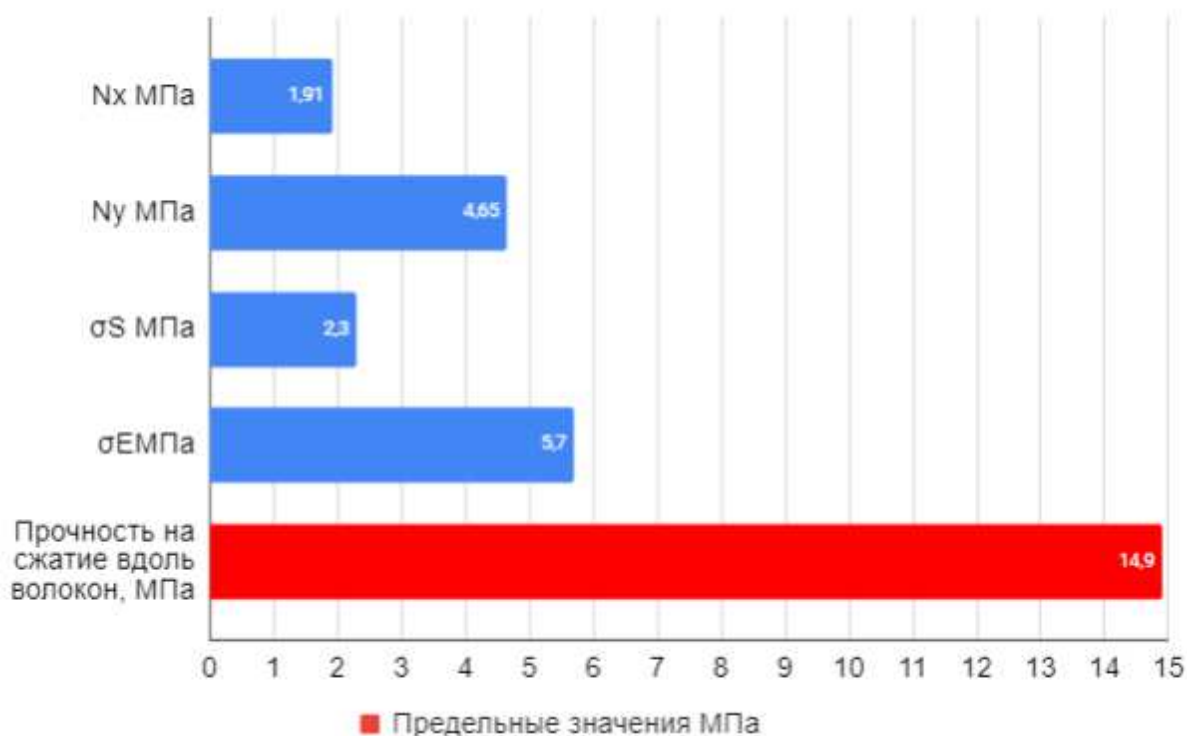


Рисунок 3.21 – Сравнения полученных напряжений с предельно допустимыми значениями

3.3. Расчет на сейсмические воздействия линейно- спектральным методом (по СП 14.13330.2018 г).

Вначале для получения общего представления о свойствах несущей системы многоэтажного здания и схемы конструктивно-планировочного решения здания был выполнен расчет пространственной конечно-элементной модели на собственные колебания (модальный анализ).

Для определения частот и форм собственных колебаний используется блочный алгоритм Ланцоша. Реализованный в Лира 10.12 алгоритм основан на механизме подсчета процента учтенной модальной массы.

При выполнении модального анализа учитывалось 20 форм собственных колебаний.

Полученные результаты для первых 20-ти форм представлены в таблице 2.5 и на рисунке 2.14, в виде первых трех форм собственных колебаний.

Таблица 3.5 – Периоды колебаний

Загружение	Форма	Частота		Периоды
		Рад/сек	Гц	
Модальный анализ				сек
	1	10,686	1,700	0,587
	2	14,135	2,249	0,444
	3	21,752	3,462	0,288
	4	26,552	4,226	0,237
	5	27,126	4,317	0,232
	6	32,848	5,228	0,191
	7	34,222	5,446	0,184
	8	35,821	5,701	0,175
	9	36,573	5,820	0,172
	10	47,818	7,610	0,131
	11	48,152	7,664	0,130
	12	53,0	8,435	0,119
	13	54,409	8,659	0,115
	14	55,932	8,901	0,112
	15	57,385	9,133	0,109
	16	64,011	10,187	0,098
	17	67,376	10,722	0,093
	18	70,741	11,258	0,088
	19	74,105	11,794	0,084
20	77,470	12,329	0,081	

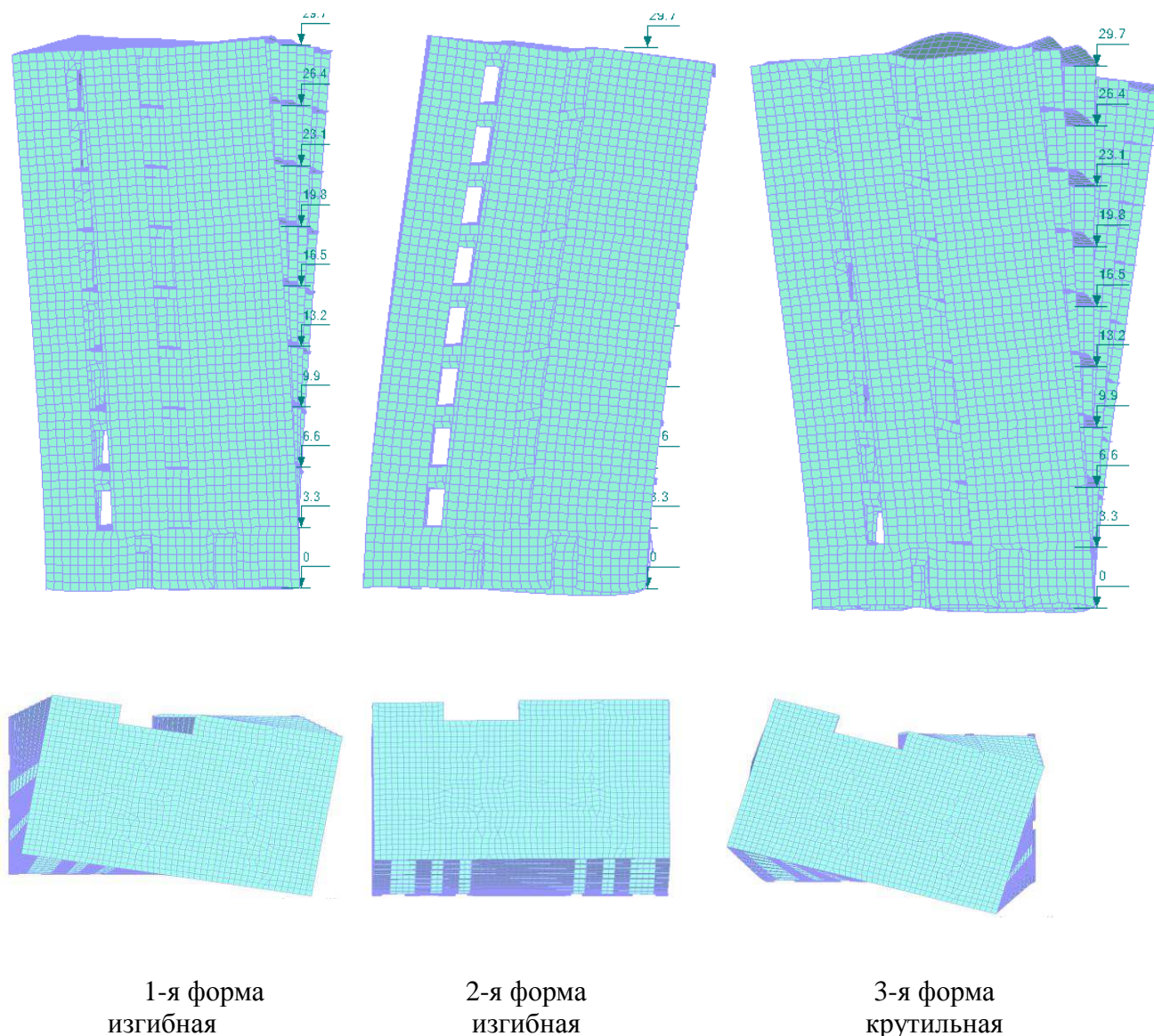


Рисунок 3.22 – Низшие формы собственных колебаний

Как видно из полученных результатов, в первой форме собственных колебаний преобладает изгиб, вторая - изгибная, а третья форма является крутильной.

При этом период основного тона колебаний составил 0,58 с.

Из анализа периода и вида первой формы собственных колебаний, следует, что динамические характеристики рассматриваемого здания близки к результатам, приведенным в работах по расчету железобетонных многоэтажных зданий. Там же указывается, что при рациональном конструктивном решении многоэтажного здания 1-я форма колебаний является изгибной.

По своей конструктивной схеме рассматриваемое 9-ти этажное здание относится к простым, но из-за того, что в 1-й форме собственных колебаний возникает кручение, то согласно СП 14.13330.2018 оно подпадает под категорию сложных, т.е. здание можно отнести и к сложным. В соответствии с

вышеизложенным, при расчете на сейсмические воздействия была выбрана расчетная ситуация, соответствующая уровню расчетного землетрясения (РЗ).

В программе Лира 10.12 расчет на сейсмические воздействия выполняется методом разложения решения по формам собственных колебаний.

При расчете по нормам СП 14.13330.2018 было принято: категория грунта - II; тип сооружения – жилые, общественные, производственные здания; сейсмичность - 8 баллов в горизонтальном направлении; допускаемые повреждения элементов зданий – из деревянных конструкций $K_1 = 0,15$; по табл. 5.2, коэффициент надежности по нагрузке, определяемые назначением сооружения $K_0 = 1$, по табл. 4.2, коэффициент, учитывающий способность зданий и сооружений к рассеиванию энергии, принимаемый по табл. 5.3 $K_y = 1$ [33].

Для сопоставления результатов расчетов по нормам и воздействия акселерограммы землетрясения в Эль-Сентро исходные данные для расчета по нормативному методу выбирались согласно данным сейсмического районирования, приведенных в нормах.

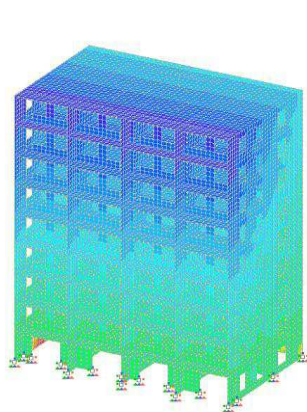
Расчеты на действие акселерограмм выполнялись с учетом затухания колебаний (заданием коэффициента диссипации $\varphi = 0,1$).

Полученные результаты расчетов на действие сейсмических нагрузок в виде изополей перемещений, усилий и напряжений в элементах несущей системы здания показаны на рисунках 3.23-3.39 и в таблице 3.7.

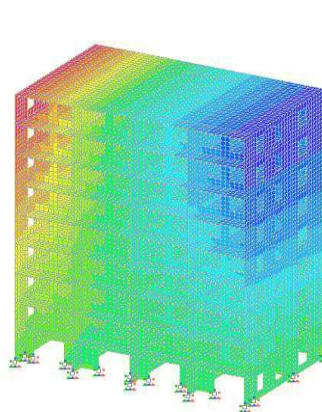
Комбинация загрузок является для всех расчетов по СП 14.13330.2018 единой, меняется только интенсивность сейсмической нагрузки:

Таблица 3.6 - Комбинация загрузок для расчета на сейсмическое воздействие

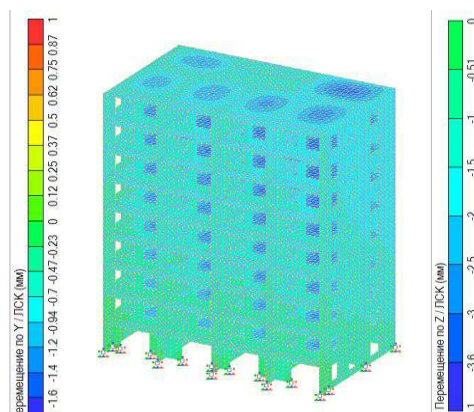
№	Собственный вес	Ветровая нагрузка по бук. оси	Сейсмическая нагрузка	Эксплуатационная нагрузка	Снеговая нагрузка	Ветровая нагрузка по цифр. осям	Собственный вес покрытия
СЗ	0,9	0	1	0,5	0,5	0	0,9



Перемещения по оси X- 3 мм.



Перемещения по оси Y – 1.9 мм.



Перемещения по оси Z- 4.1 мм

Рисунок 3.23 – Линейные перемещения многоэтажного здания при статическом расчете при комбинации нагрузок СЗ

Как видно из рисунка 3.23, наибольшие перемещения здания, как и в статическом расчете, возникают в верхней части здания и составляют 4,1 мм.

Полученные перемещения не превышают нормативное значение для данного здания, составляющего 59,4 мм.

Далее на рисунках 3.24-3.26 представлены цветовые схемы отображения усилий и напряжений в элементах здания (CLT панелях). Максимальные значения усилий сведены в таблицу 3.7

Таблица 3.7 – Максимальные значения усилий при расчете на сейсмическую нагрузку

Параметры	Значения	Элемент схемы	Прочность на сжатие вдоль волокон, МПа
N_x МПа	-2,10	Стеновые панели 1-го этажа	14,9
N_y МПа	-5,80	Стеновые панели 1-го этажа	
M_x (кН*м)/м	-7,0	Панели перекрытия	
M_y (кН*м)/м	-5,5	Панели перекрытия	
σ_E МПа	4,0	Панели перекрытия	
σ_{SM} МПа	-8,9	Стеновые панели 1-го этажа	

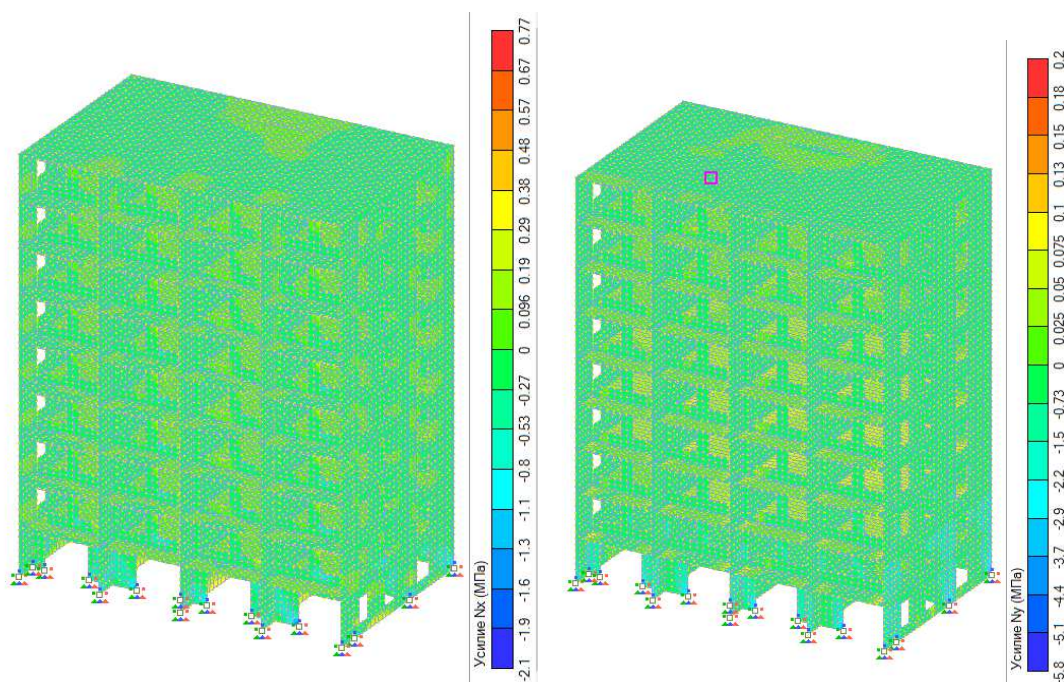


Рисунок 3.24 – Цветовая схема отображения усилий N_{xy} при сейсмическом расчете при комбинации нагрузок СЗ

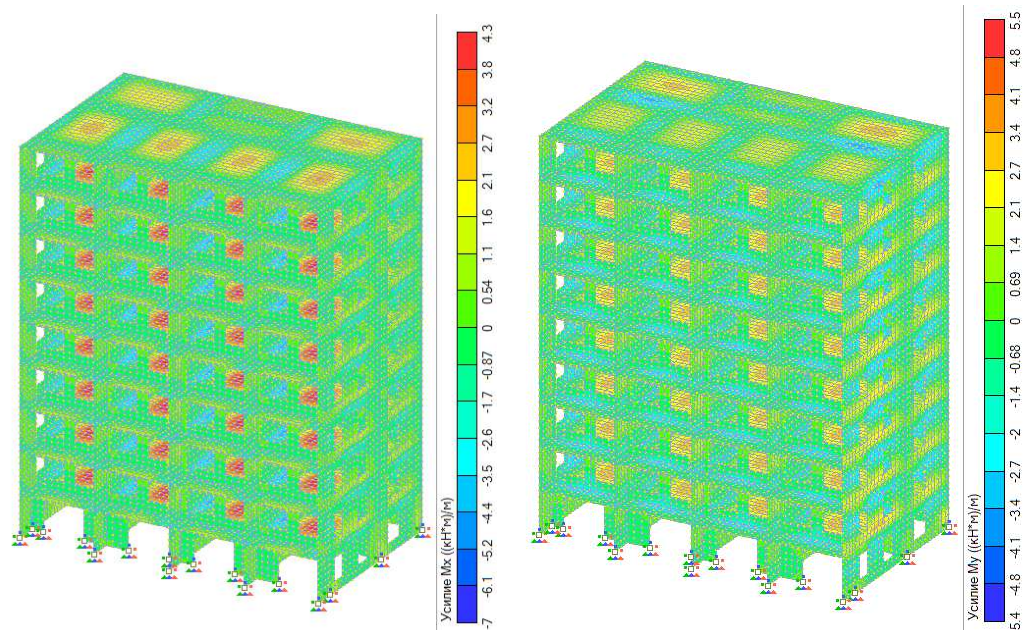


Рисунок 3.25 – Цветовая схема отображения усилий M_x M_y при сейсмическом расчете при комбинации нагрузок СЗ

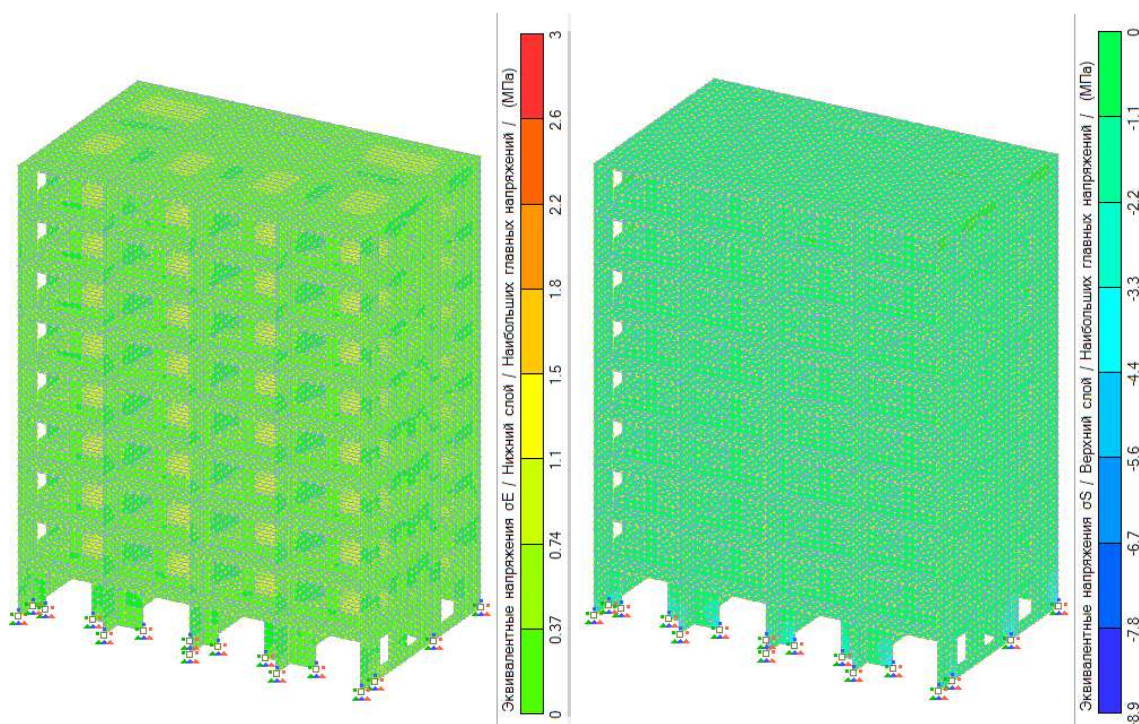


Рисунок 3.26 – Цветовая схема отображения эквивалентных напряжений σ_S и σ_E при сейсмическом расчете при комбинации нагрузок СЗ

Далее на рисунках 3.27-3.38 представлены цветовые схемы отображения усилий в CLT панелей плиты покрытия, перекрытия 1-го этажа и перекрытия 5 этажа максимальные значения усилий сведены в таблицу 3.4

Таблица 3.8 – Максимальные значения усилий в плитах перекрытия

Параметры	Плита 1-го этажа	Плита 5-го этажа	Плита покрытия	Сопротивление изгибу, Мпа
N_x МПа	0,63	0,11	-0,073	
N_y КПа	0,27	0,17	-0,052	
M_x (кН*м)/м	-7,5	-7,5	-4,0	
M_y (кН*м)/м	-6,6	-6,6	-4,0	
σS МПа	1,50	1,5	0,87	
σE МПа	-1,10	-1,1	-0,73	

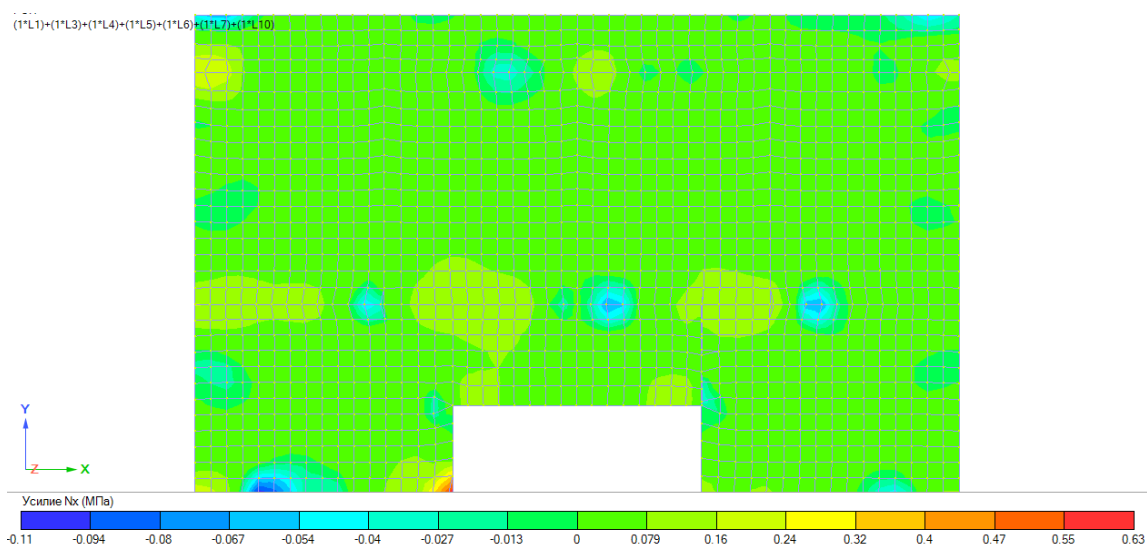


Рисунок 3.27 – Изополя напряжений N_x в плите перекрытия 1-го этажа

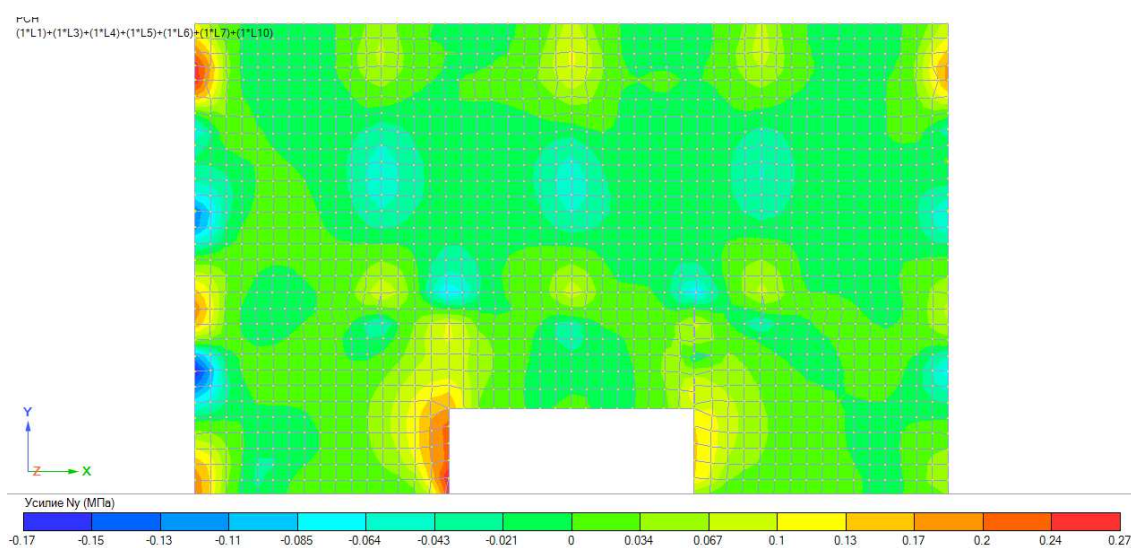


Рисунок 3.28 – Изополя напряжений N_y в плите перекрытия 1-го этажа

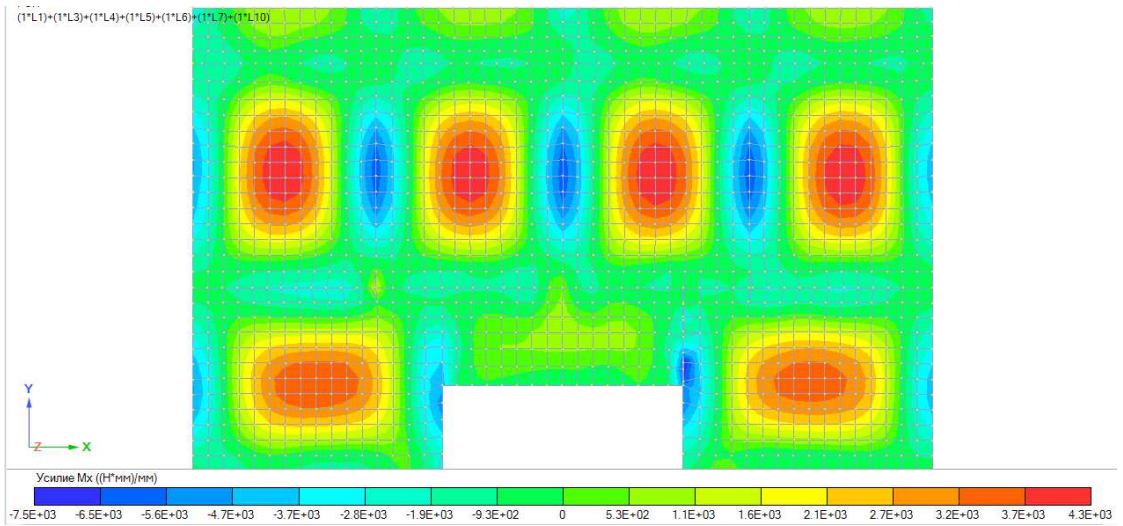


Рисунок 3.29 – Изополя напряжений M_x в перекрытия 1-го этажа

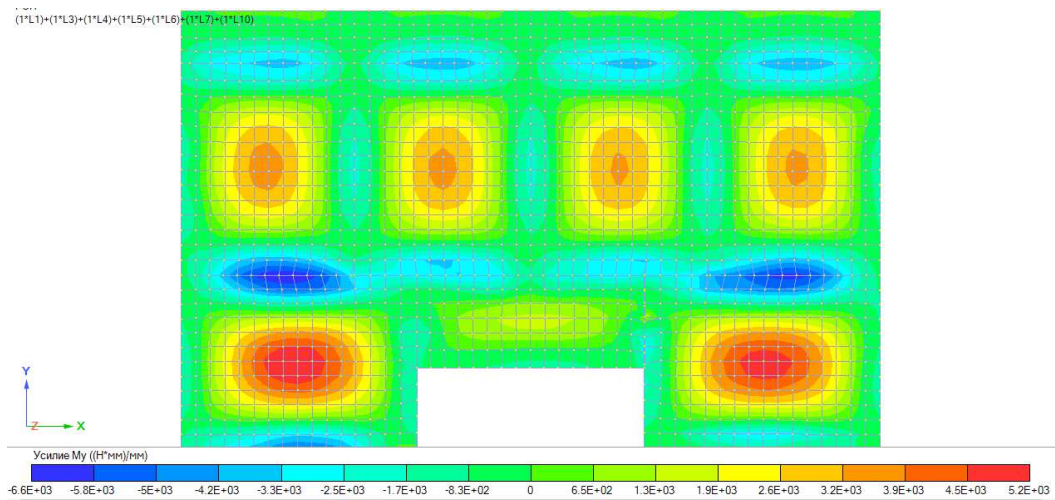


Рисунок 3.30 – Изополя напряжений M_y в перекрытия 1-го этажа

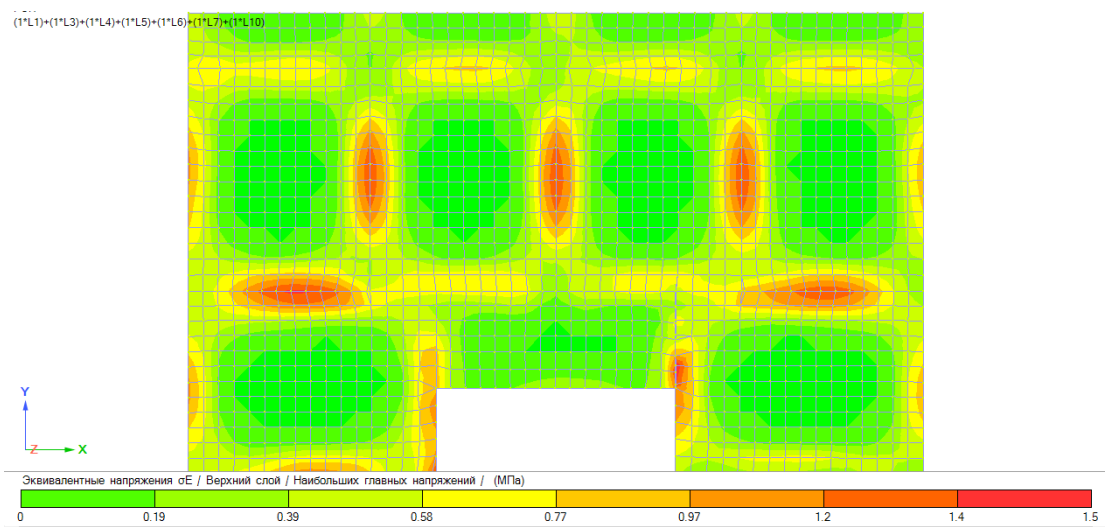


Рисунок 3.31 – Изополя эквивалентных напряжений σ_E в перекрытия 1-го этажа

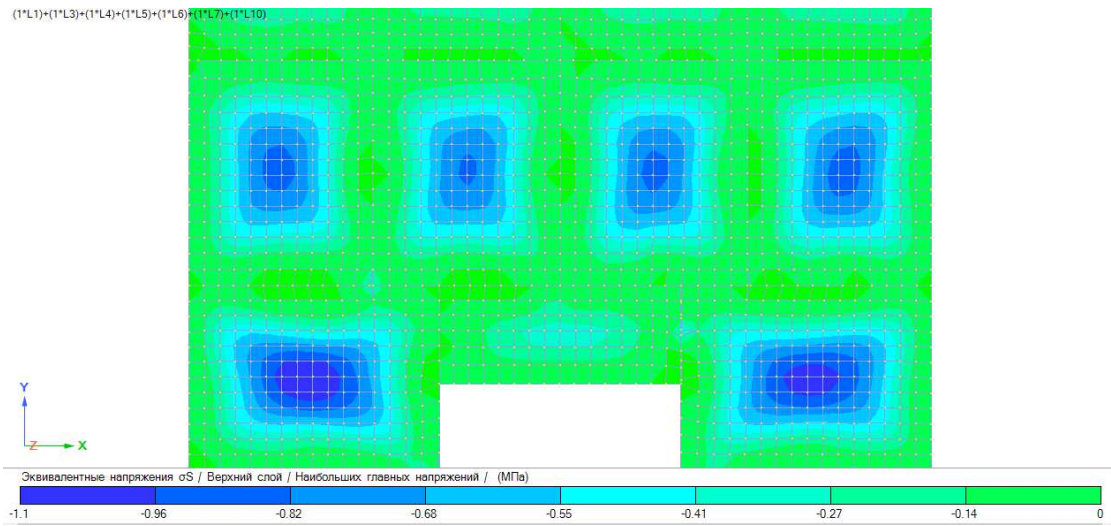


Рисунок 3.32 – Изополя эквивалентных напряжений σ_S в перекрытия 1-го этажа

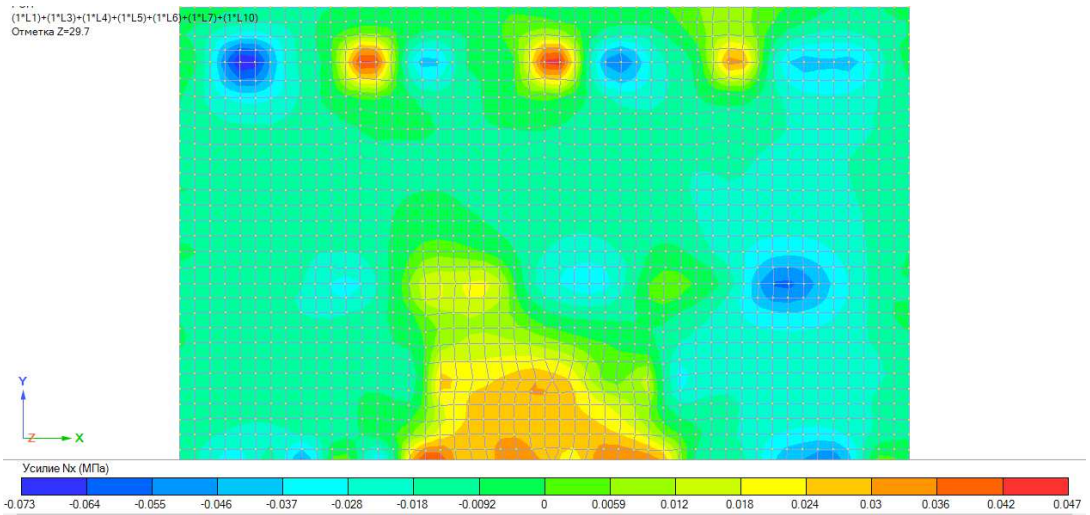


Рисунок 3.33 – Изополя напряжений N_x в плите перекрытия

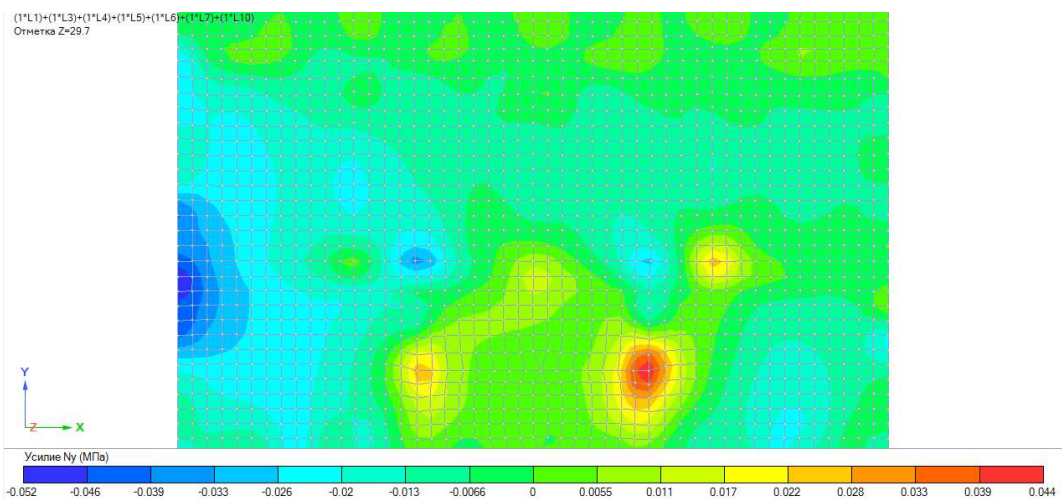


Рисунок 3.34 – Изополя напряжений N_y в плите перекрытия

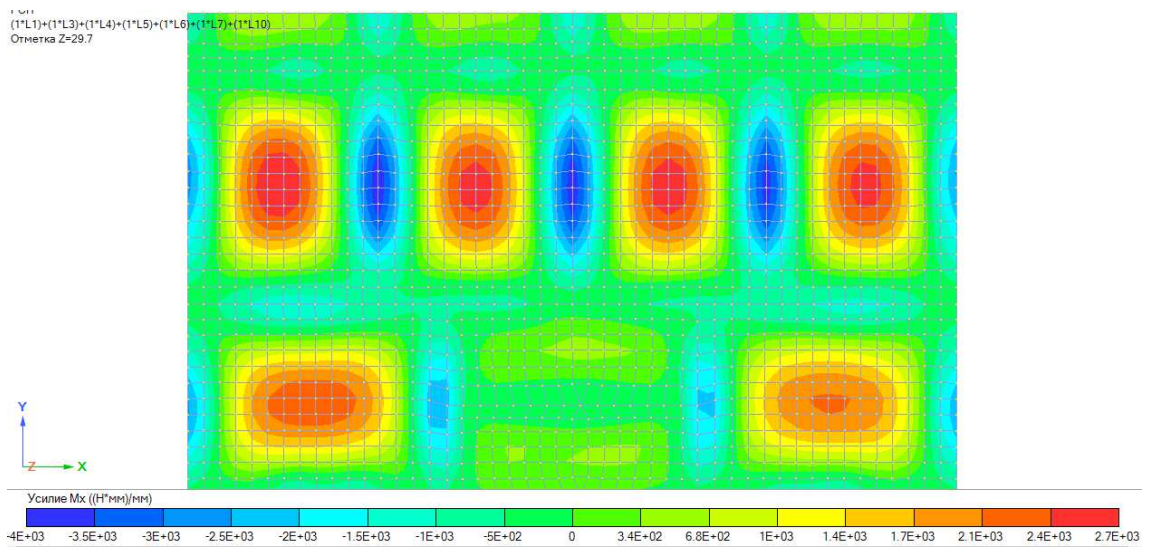


Рисунок 3.35 – Изополя напряжений M_x в плите покрытия

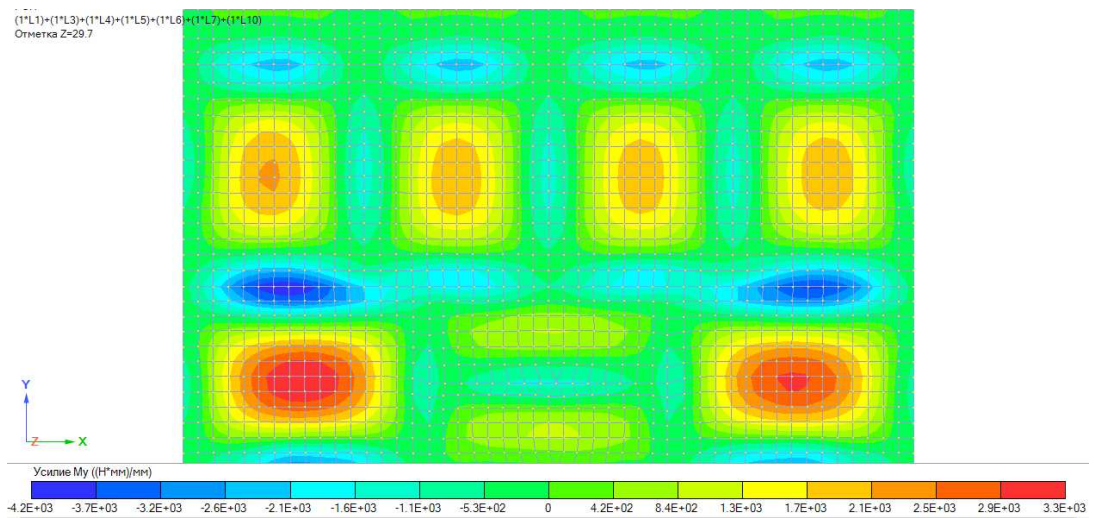


Рисунок 3.36 – Изополя напряжений M_y в плите покрытия

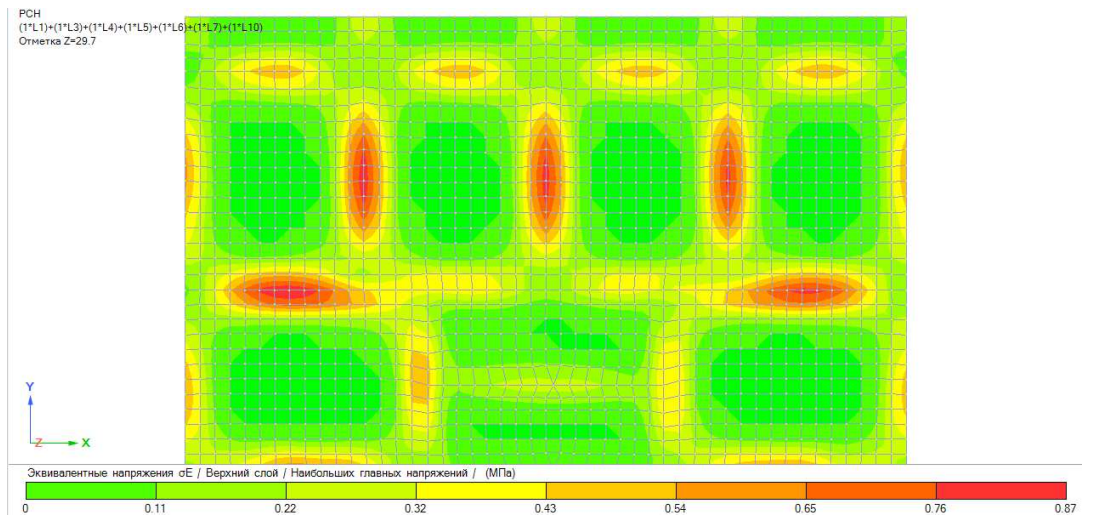


Рисунок 3.37 – Изополя эквивалентных напряжений σE в плите покрытия

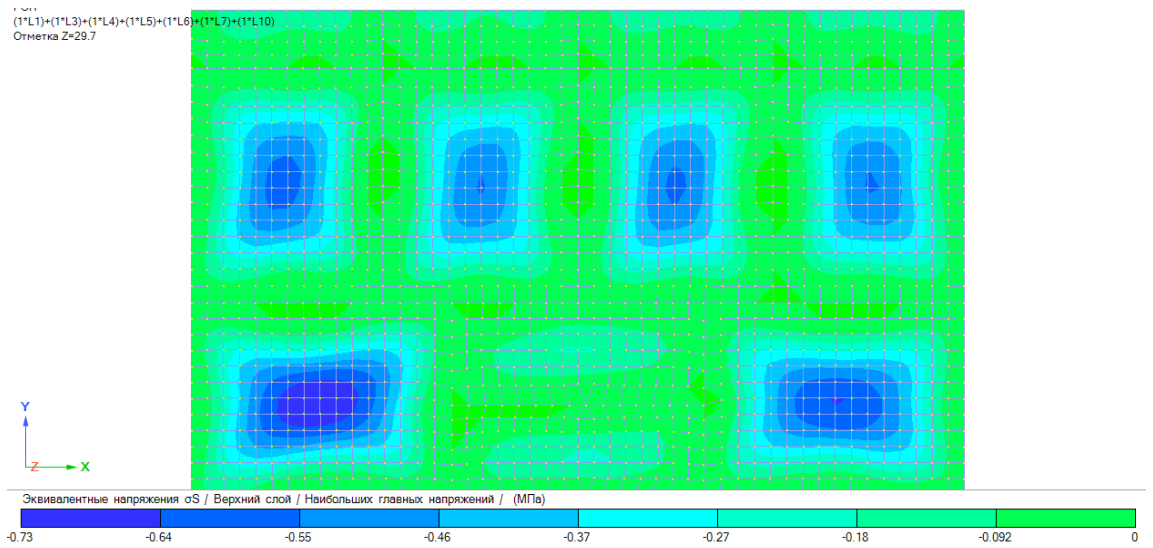
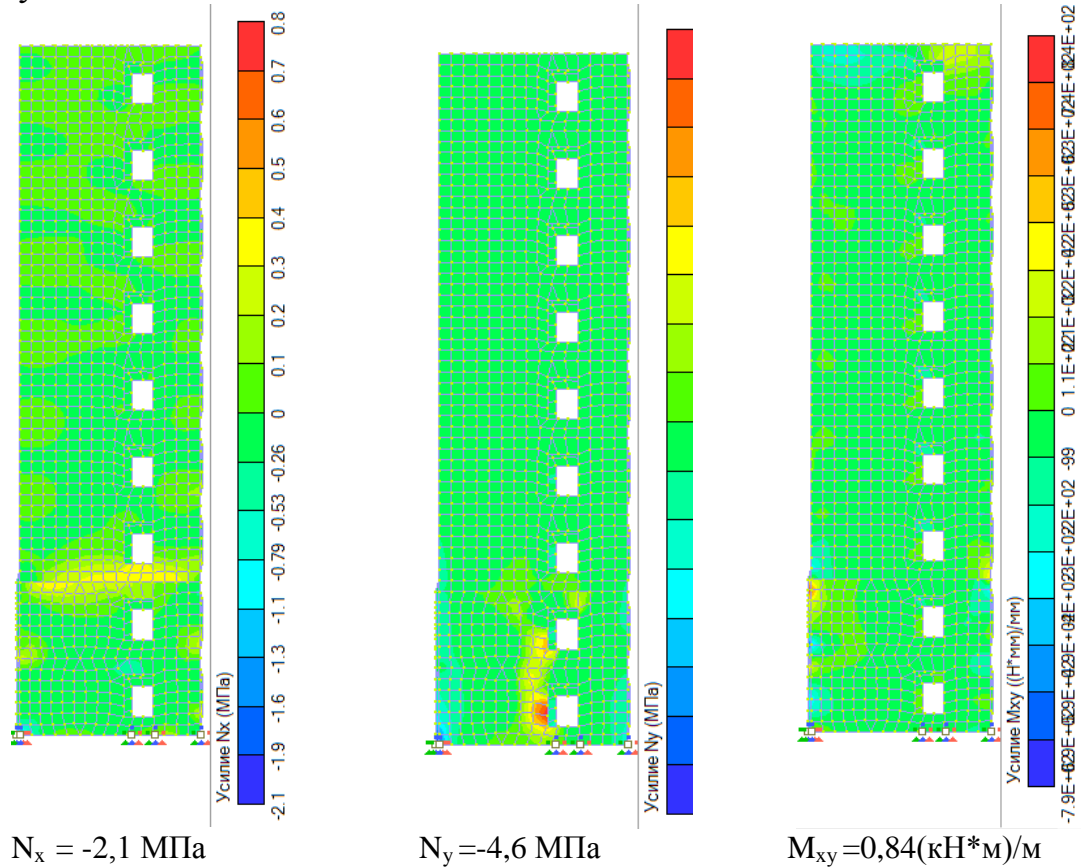


Рисунок 3.38 – Изополя эквивалентных напряжений σ_S в плите покрытия

Цветовые схемы отображения усилий в диафрагмах жесткости показаны на рисунках 3.39.



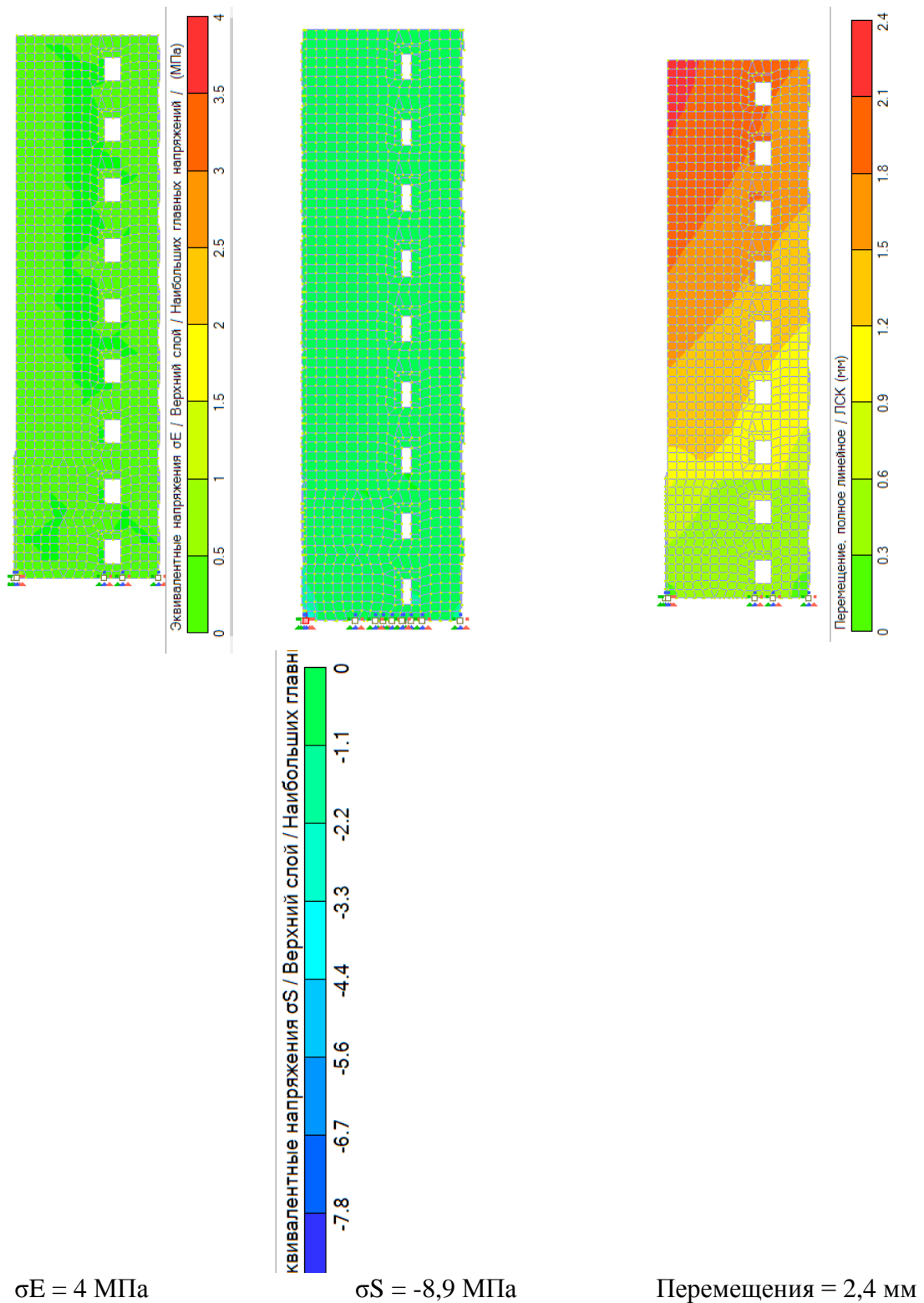


Рисунок 3.39 – Изополя напряжений и моментов в диафрагме жесткости при статическом расчете при комбинации нагрузок СЗ

Из рисунка 3.39 видно, что наиболее напряжена нижняя часть диафрагмы жесткости, продольные усилия в которой составляют: $N_x = -2,1 \text{ МПа}$, $N_y = -4,6 \text{ МПа}$. Наибольшие моменты возникают в верхней части диафрагмы жесткости и составляют $M_{xy} = -0,84 \text{ (кН*м)/м}$. Эквивалентные напряжения σ_E и σ_S

составляют 4 МПа и -11 МПа соответственно, при нормативном значении сопротивления изгибу 9,38 МПа и нормативном значении прочности на сжатие вдоль волокон 15 МПа. Результаты сравнения полученных напряжений и усилий от действия основной комбинации нагрузок С3 представлены на рисунке 3.40

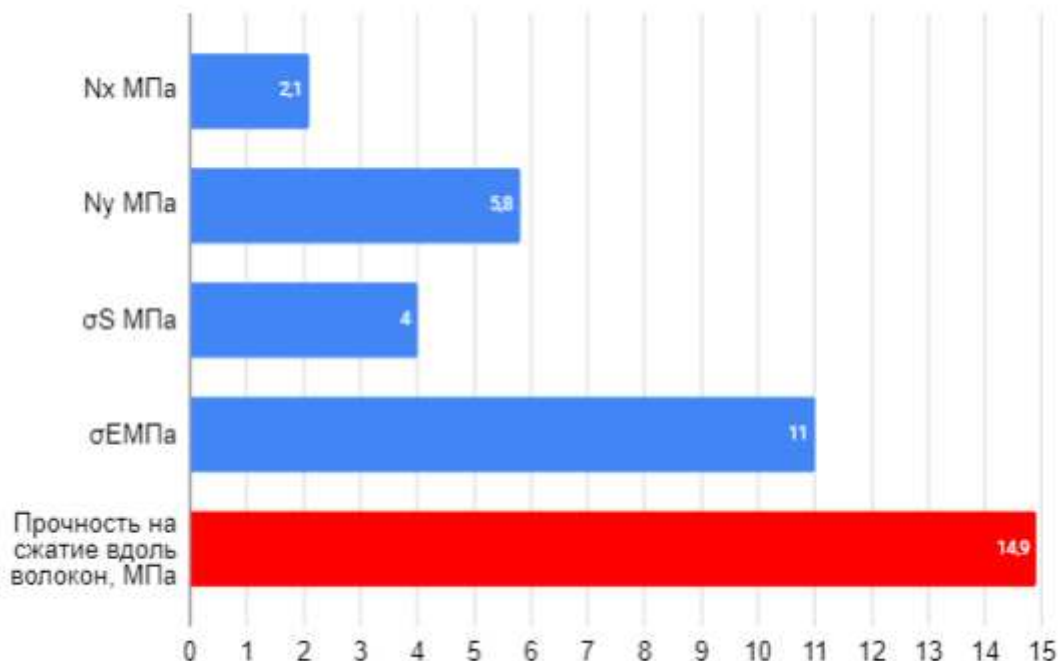


Рисунок 3.40 – Сравнения полученных напряжений с предельно допустимыми значениями

3.4. Расчет на действие акселерограмм

Для этого расчетная схема была нагружена теми же нагрузками, что и при расчете на сейсмические воздействия по нормам СП, и вместо самой сейсмической нагрузки была приложена акселерограмма землетрясения в Эль-Сентро 1940 г.

Данный расчет поможет нам понять какие напряжения могут возникнуть у здания при реальном землетрясении и какие напряжения могли бы возникнуть у этого здания с существующими конструктивными элементами в условиях строительства района г. Эль-Сентро.

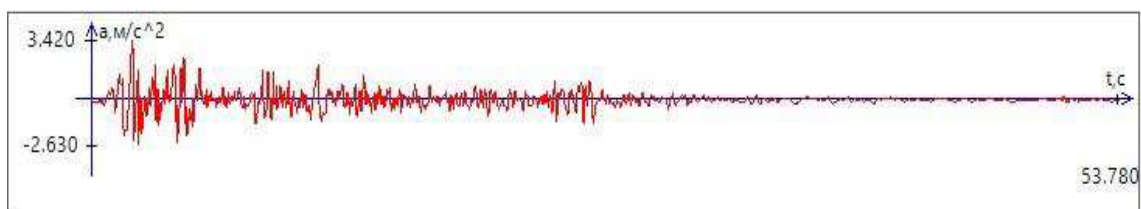


Рисунок 3.41– Радиальная составляющая акселерограммы землетрясения Эль-Сентро

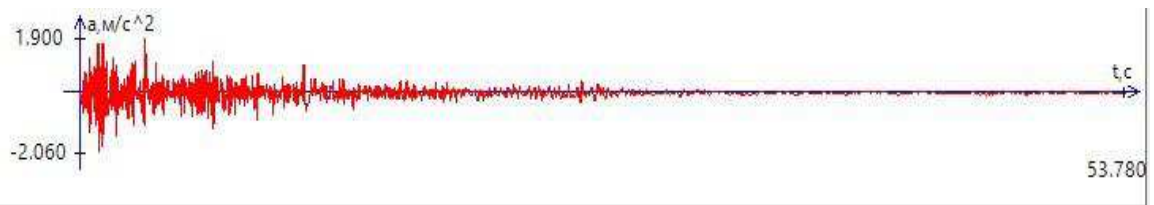


Рисунок 3.42 – Вертикальная составляющая акселерограммы землетрясения Эль-Сентро

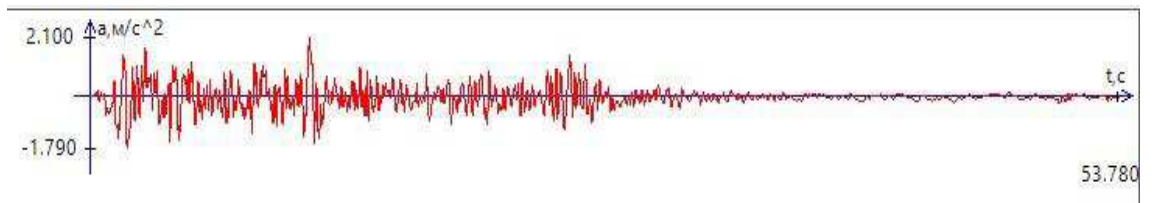


Рисунок 3.43– Тангенсальная составляющая акселерограммы землетрясения Эль-Сентро

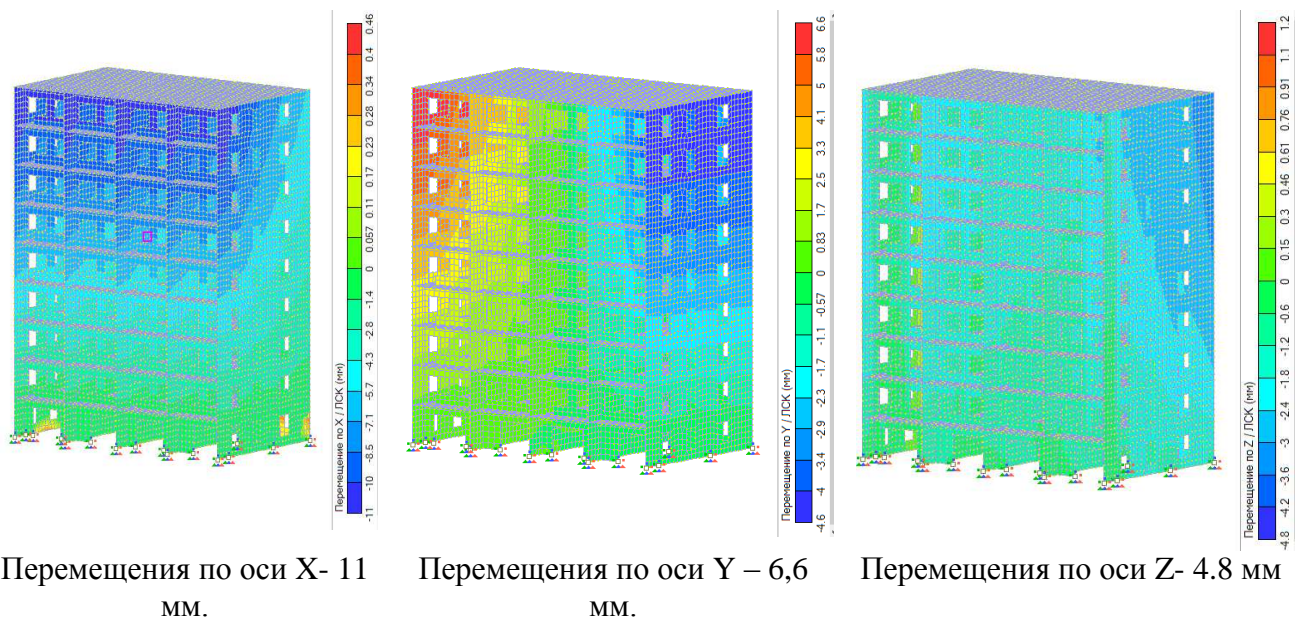


Рисунок 3.44 –Линейные перемещения многоэтажного здания при статическом расчете при комбинации нагрузок СЗ

Как видно из рисунка 3.44, наибольшие перемещения здания, как и в статическом расчете, возникают по оси X и составляют -11 мм.

Полученные перемещения не превышают нормативное значение для данного здания, составляющего 59,4 мм.

Далее на рисунках 3.45-3.47 представлены цветовые схемы отображения усилий и напряжений в элементах здания (CLT панелях). Максимальные значения усилий сведены в таблицу 3.9

Таблица 3.9 – Максимальные значения усилий при расчете на сейсмическую нагрузку

Параметры	Значения	Элемент схемы	Прочность на сжатие вдоль волокон, МПа
N_x МПа	-3,9	Стеновые панели 1-го этажа	14,9
N_y МПа	-8,6	Стеновые панели 1-го этажа	
M_x (кН*м)/м	-5,2	Панели перекрытия	
M_y (кН*м)/м	-7,9	Панели перекрытия	
σ_E МПа	5,7	Панели перекрытия	
σ_{EM} МПа	-12	Стеновые панели 1-го этажа	

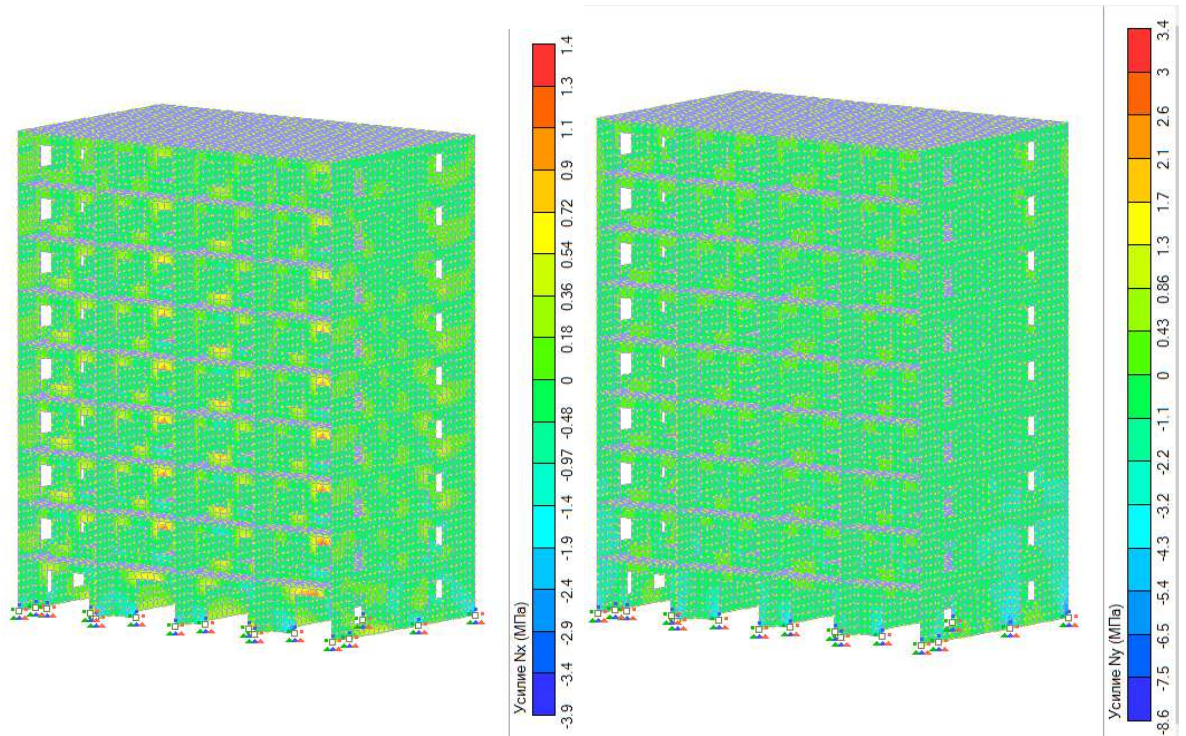


Рисунок 3.45 – Цветовая схема отображения усилий N_{xy} при сейсмическом расчете при комбинации загружений СЗ

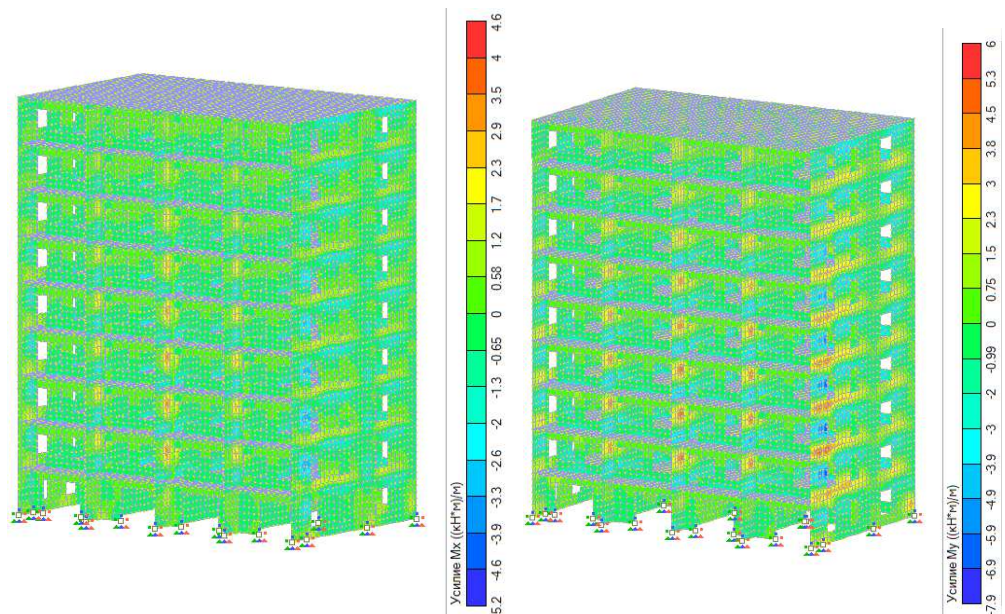


Рисунок 3.46 – Цветовая схема отображения усилий M_x M_y при сейсмическом расчете при комбинации нагрузок СЗ

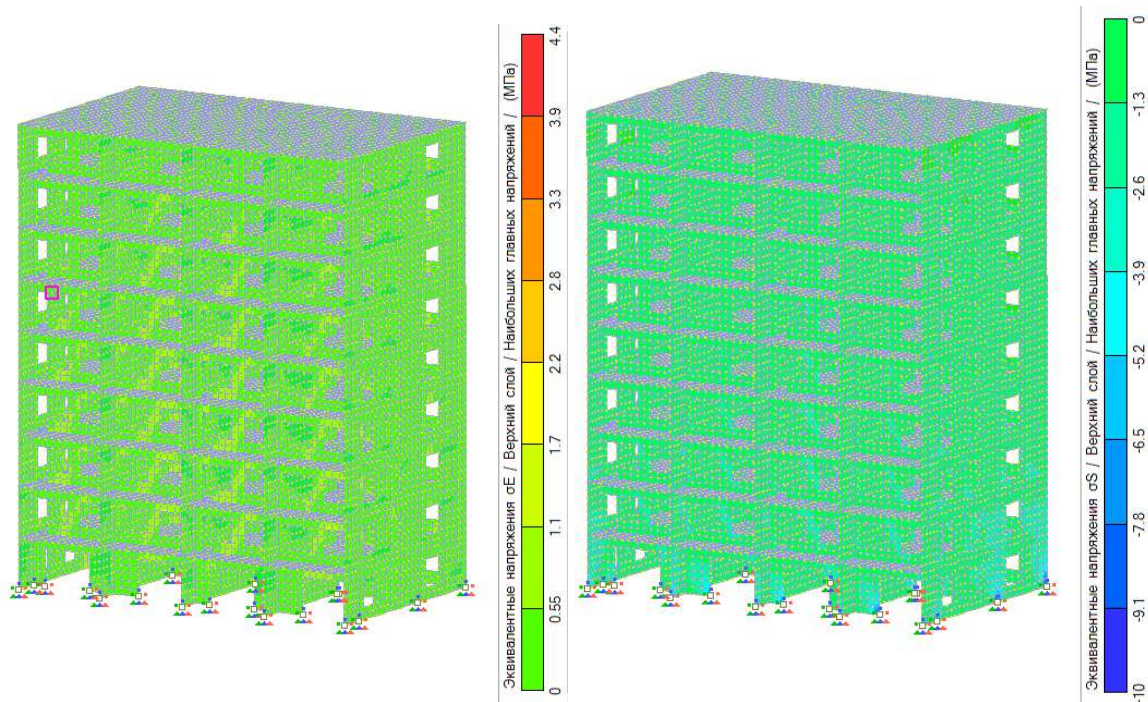
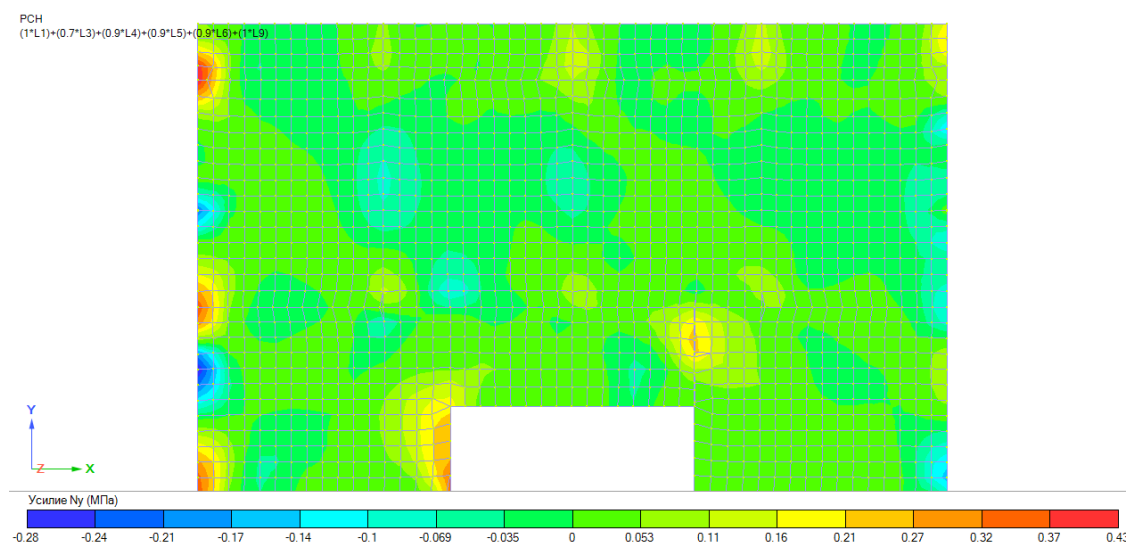
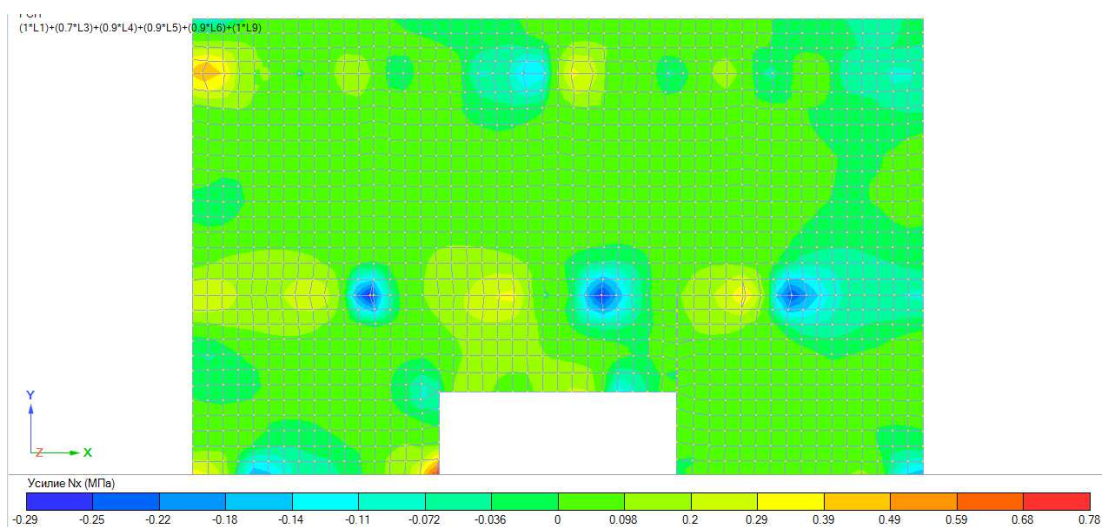


Рисунок 3.47 – Цветовая схема отображения эквивалентных напряжений σ_S и σ_E при сейсмическом расчете при комбинации нагрузок СЗ

Далее на рисунках 3.48-3.53 представлены цветовые схемы отображения усилий в CLT панелей перекрытия 1-го этажа, максимальные значения усилий в панелях перекрытия 5-го этажа и плитах покрытия сведены в таблицу 3.10

Таблица 3.10 – Максимальные значения усилий в плитах перекрытия

Параметры	Плита 1-го этажа	Плита 5-го этажа	Плита покрытия	Сопrotивление изгибу, МПа
N_x МПа	0,78	0,78	-0,13	9,4
N_y МПа	0,42	0,43	-0,052	
M_x (кН*М)/м	-5,9	-5,9	-4,0	
M_y (кН*М)/м	-7,1	-7,1	-4,5	
σ_S МПа	1,6	1,6	0,91	
σ_{EM} МПа	-1,2	-1,2	-0,83	



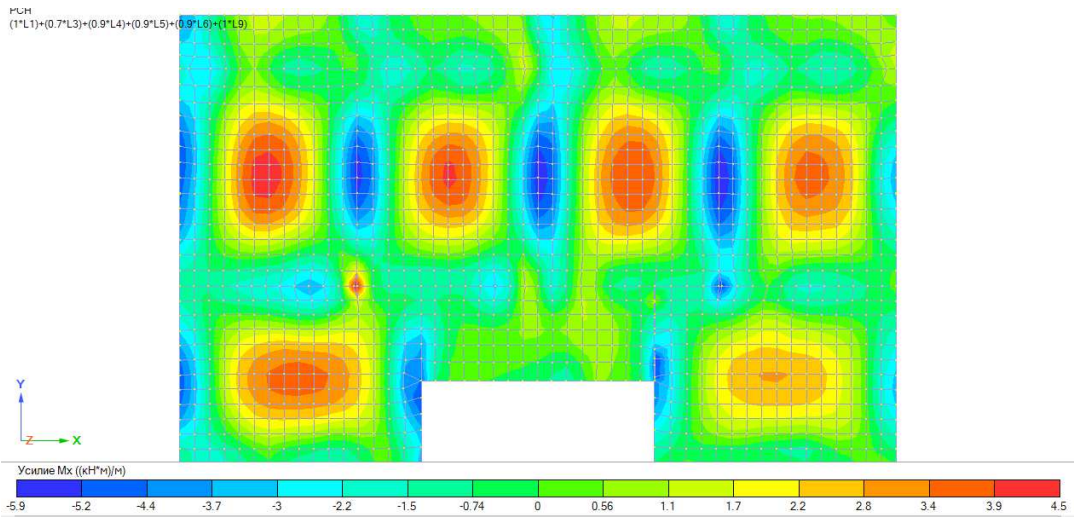


Рисунок 3.50 – Изополя напряжений M_x в перекрытия 1-го этажа

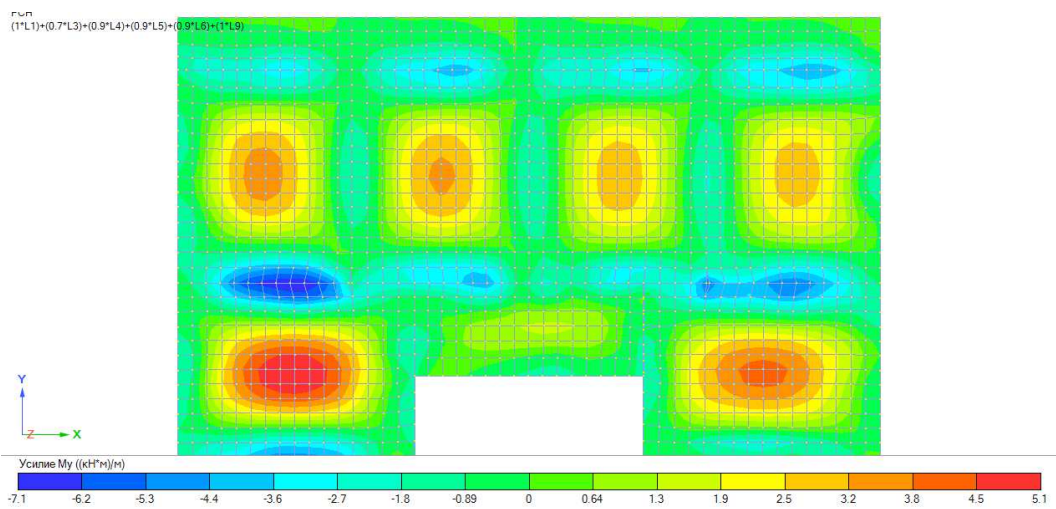


Рисунок 3.51 – Изополя напряжений M_y в перекрытия 1-го этажа

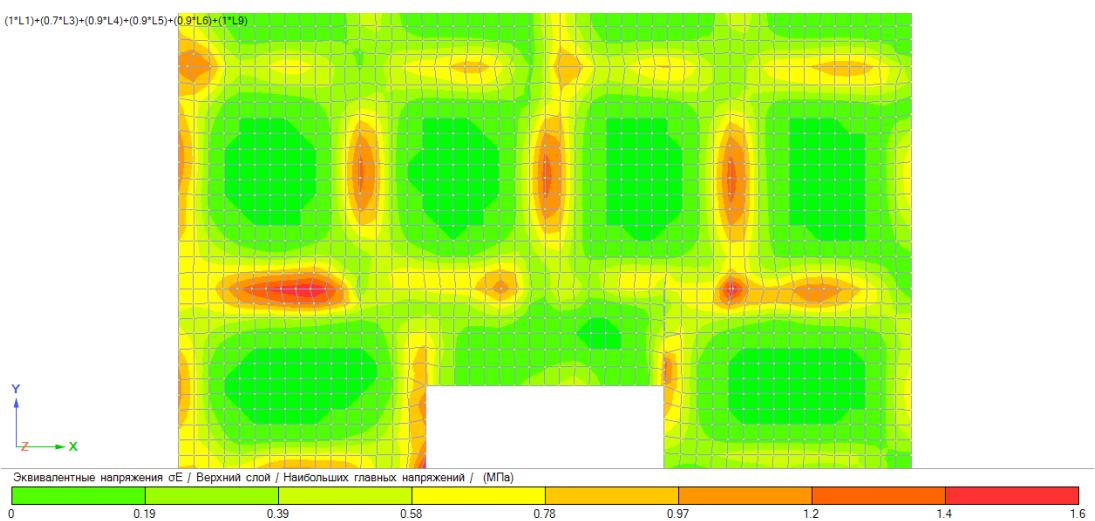


Рисунок 3.52 – Изополя эквивалентных напряжений σ_E в перекрытия 1-го этажа

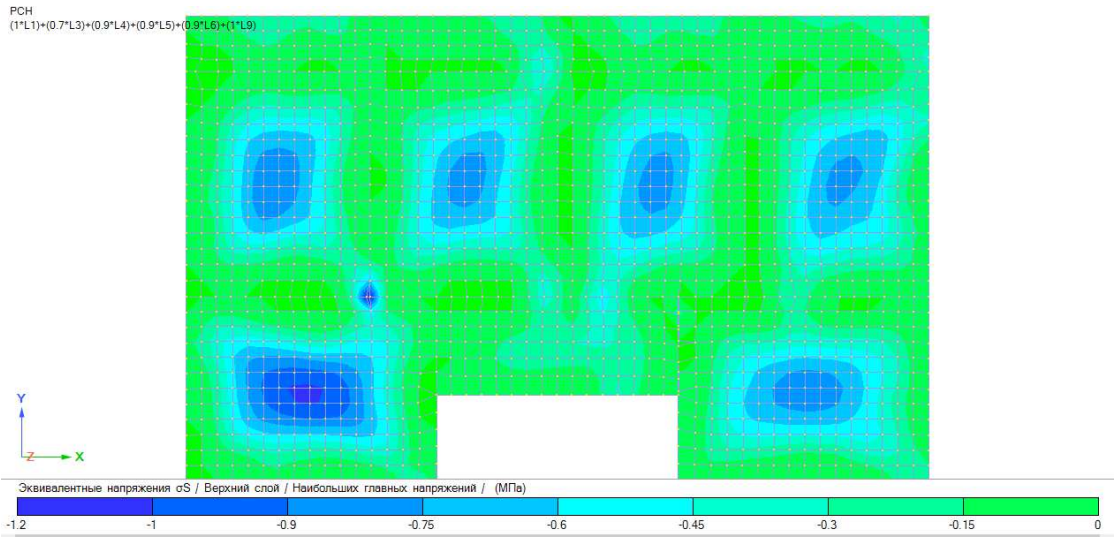
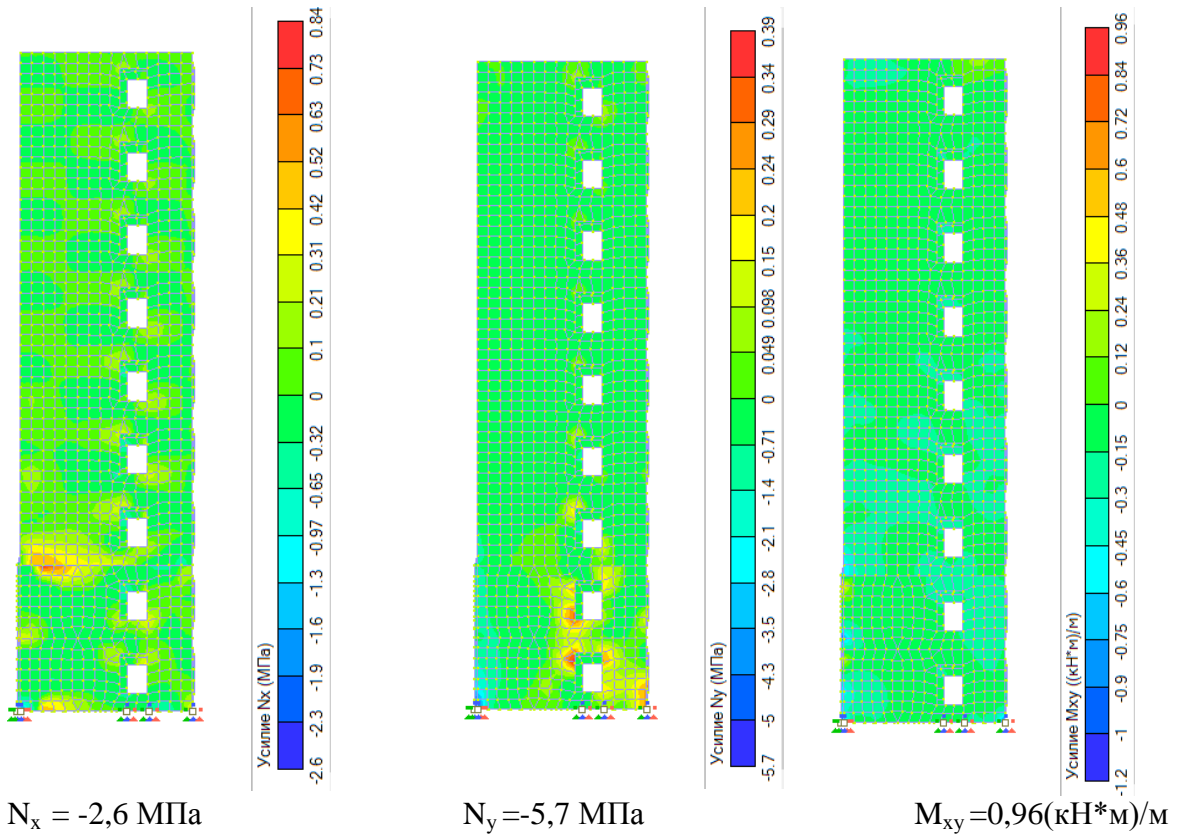


Рисунок 3.53 – Изополя эквивалентных напряжений σ_S в перекрытия 1-го этажа



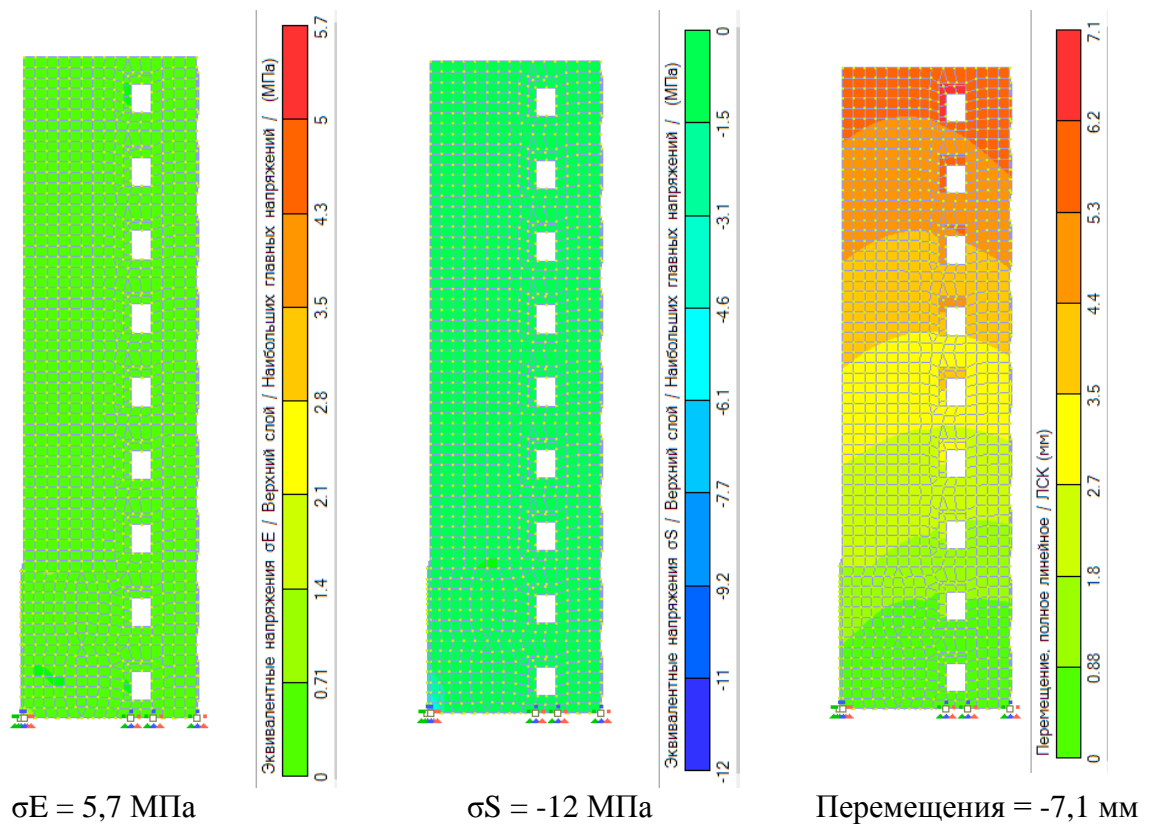


Рисунок 3.54 – Изополя напряжений и моментов в диафрагме жесткости при статическом расчете при комбинации нагрузок С3

Из рисунка 3.54 видно, что наиболее напряжена нижняя часть диафрагмы жесткости, продольные усилия в которой составляют: $N_x = -2,6$ МПа, $N_y = -5,7$ МПа. Наибольшие моменты возникают в средней части диафрагмы жесткости и составляют $M_{xy} = -1,2$ (кН*м)/м. Эквивалентные напряжения σ_E и σ_S составляют 5,7 МПа и -12 МПа соответственно, при нормативном значении сопротивления изгибу 9,38 МПа и нормативном значении прочности на сжатие вдоль волокон 15 МПа. Результаты сравнения полученных напряжений и усилий от действия основной комбинации нагрузок С3 представлены на рисунке 3.55

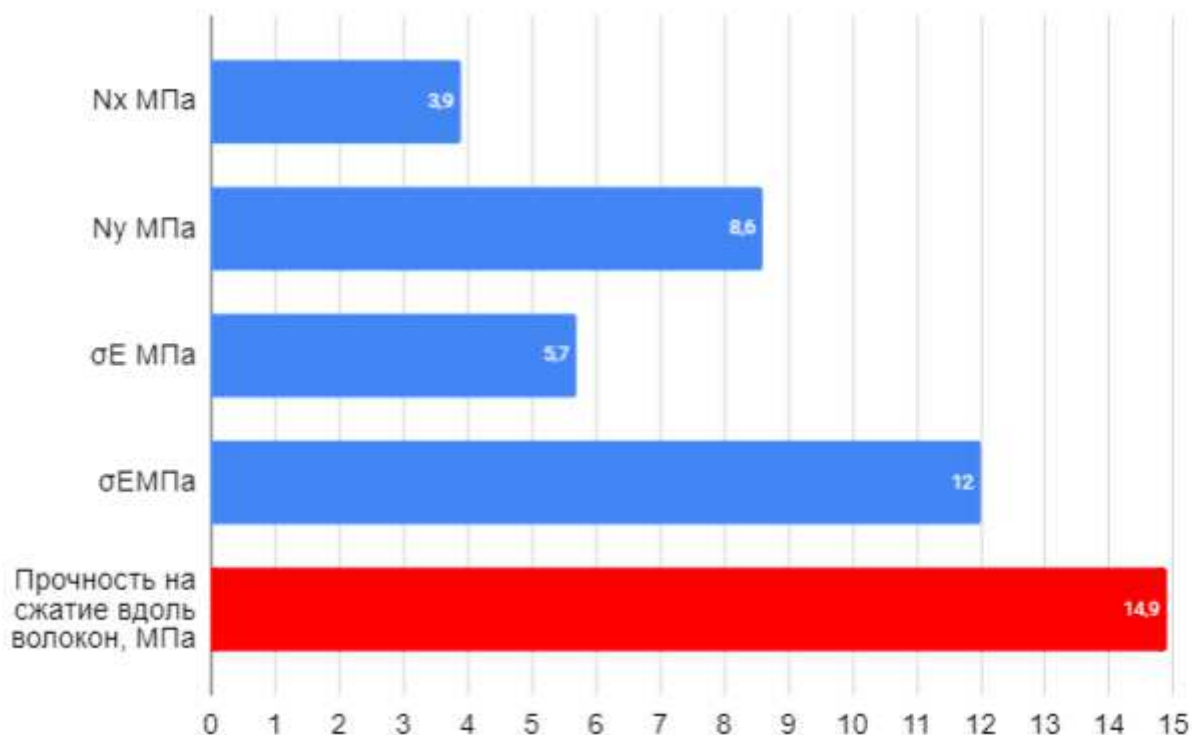


Рисунок 3.55 – Сравнения полученных напряжений с предельно допустимыми значениями

Различия между результатами расчетов по нормам СП 14.13330.2018 от расчета на действие акселерограммы землетрясения Эль-Центро:

Между расчетом линейно-спектральным методом по нормам СП 14.13330.2018 строительство в сейсмических районах, при интенсивности 8 баллов и расчетом на действие акселерограммы землетрясения Эль-Сентро в максимальных значениях перемещений здания, усилий, эквивалентных напряжений разница составляет порядка 1,5 раза.

Далее представлена сводная таблица по максимальным значениям напряжений и усилий в CLT панелях при статическом расчете, расчете на действие сейсмической нагрузки линейно-спектральным методом при землетрясении в 8 баллов и расчете на действие акселерограммы землетрясения Эль-Центро.

Таблица 3.11– Напряжения и усилия в конструктивных элементах здания при расчете на сейсмическую нагрузку, статическом расчете, расчетах на акселерограмму землетрясений

Элемент		Напряжение, момент, усилие	Статический расчет	Расчет по СП 14.13330.2018	Акселерограмма Эль-Сентро
Максимальные напряжения в CLT панелях по зданию	N_x , МПа	1,91	2,1	3,9	
	N_y , МПа	-4,6	-5,8	-8,6	
	M_x , (кН*м)/м	-5,7	-7,0	-7,5	
	M_y , (кН*м)/м	-5,5	-5,5	-6,0	
	σ_E	2,3	4,0	5,7	
	σ_S	5,7	11	12	
Плита перекрытия 1 этажа	N_x , МПа	0,4	0,63	0,78	
	N_y , МПа	0,28	0,27	0,42	
	M_x , (кН*м)/м	-7,16	-7,5	-5,9	
	M_y , (кН*м)/м	-6,23	-6,6	-7,1	
	σ_E	2,3	1,5	1,6	
	σ_S	-5,7	-1,1	-1,2	
Плита перекрытия 5 этажа	N_x , МПа	0,085	0,11	0,78	
	N_y , МПа	0,13	0,17	0,43	
	M_x , (кН*м)/м	-6,27	-7,5	-5,9	
	M_y , (кН*м)/м	-6,06	-6,6	-7,1	
	σ_E	1,34	1,5	1,6	
	σ_S	-0,95	-1,1	-1,2	
Плита покрытия	N_x , МПа	0,058	0,073	0,13	
	N_y , МПа	0,031	0,052	0,052	
	M_x , (кН*м)/м	-3,69	-4,0	-4	
	M_y , (кН*м)/м	-3,68	-4,0	-4,5	
	σ_E	0,76	0,87	0,91	
	σ_S	-0,62	-0,73	-0,83	

Сравнение результатов сейсмического расчета приведено в виде диаграммы

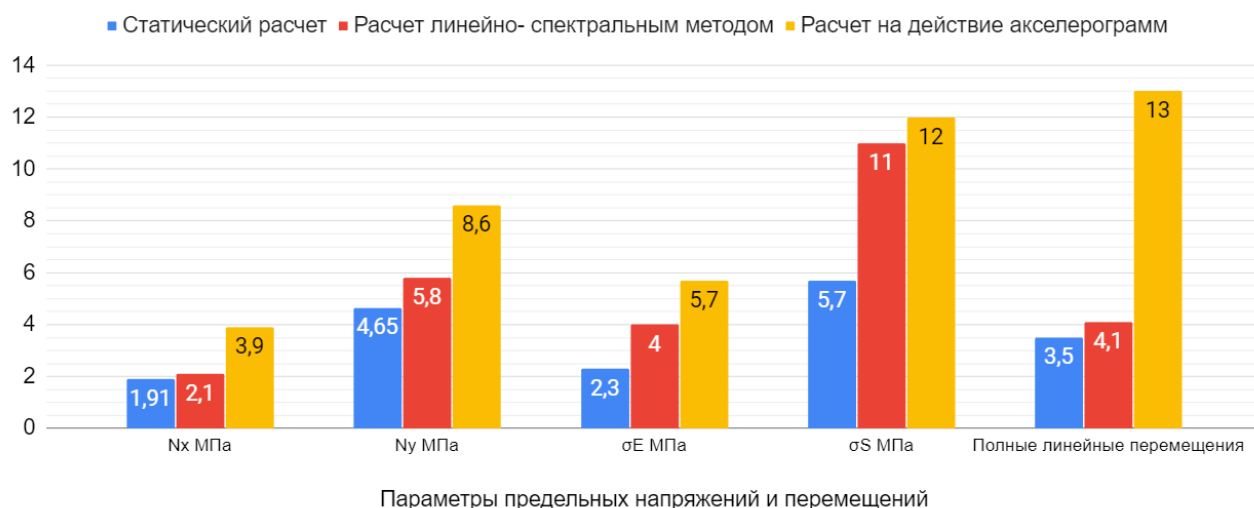


Рисунок 3.56 – Сравнение результатов расчетов

Выводы: По результатам проведенных расчетов многоэтажного здания из CLT панелей, сделаны следующие выводы:

1) Несущая способность и жесткость принятой конструктивной схемы обеспечена при действии сейсмической нагрузки, заданной линейно-спектральным методом и действием акселерограммы землетрясения в г. Эль-Сентро. Запас прочности несущих стеновых CLT панелей составил около 15%.

2) В ходе расчета были выявлены самые напряженные элементы здания: несущие стеновые панели 1 этажа, в зоне закрепления с фундаментом здания. Сравнивая усилия в панелях перекрытия можно сделать вывод: самые высокие напряжения выявлены в панелях перекрытия 1-го этажа.

3) Анализируя полные линейные перемещения в здании, можно выявить зоны максимальных перемещений: максимальные перемещения в плитах перекрытия и стеновых панелях были достигнуты в верхней части здания.

3.5 Разработка пространственной расчетной модели многоэтажного каркаса здания

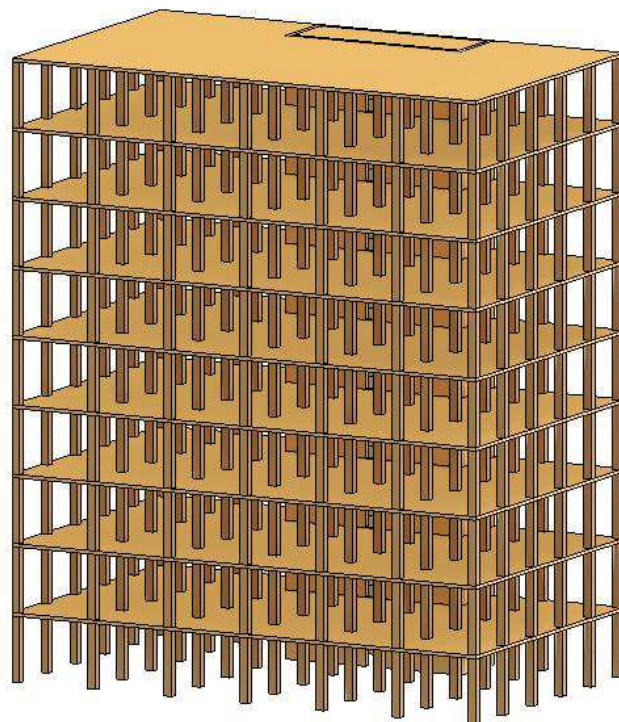
Несущая конструкция представляет собой деревянный каркас, сформированный колоннами из клееной древесины с предустановленными узлами быстрого соединения. Межэтажные перекрытия образуют CLT панели

(2,85x4,0 м) из пятислойной перекрестно-клееной древесины. Для исследования НДС 9-ти этажного жилого здания, разработана геометрическая и конечно-элементная модель здания высотой 29,7 м, имеющая в плане прямоугольную форму с размерами в осях 24x14,25 м

Сечение колонн 300x300 мм., толщина междуэтажных CLT плит перекрытий 169 мм., толщина CLT панелей диафрагмы жесткости 215 мм. Высота этажа 3 м.

Пространственная жесткость каркаса обеспечивается: совместной работой колонн и перекрытий, образующих геометрически неизменяемую систему; стенами лестничных клеток. Планы 1-го и типового этажей, объемная модель многоэтажного здания приведены на рисунках 3.1- 3.3.

Технические характеристики CLT панелей представлены в приложении



A.

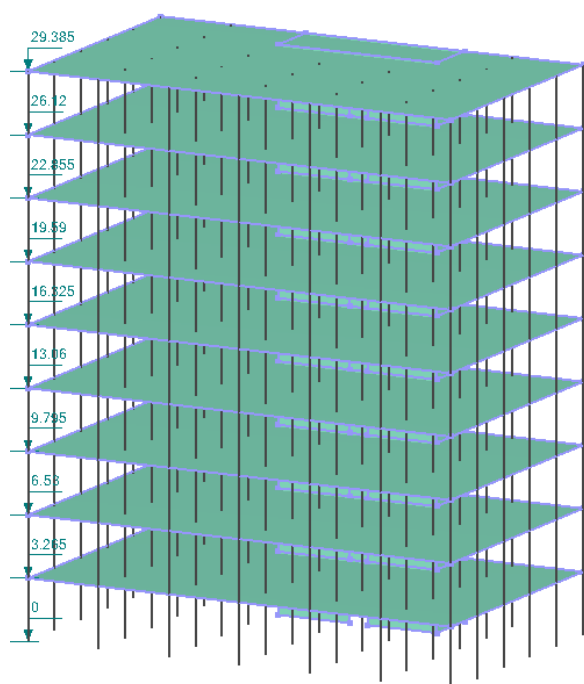


Рисунок 3.57 – BIM модель здания и расчетная схема здания

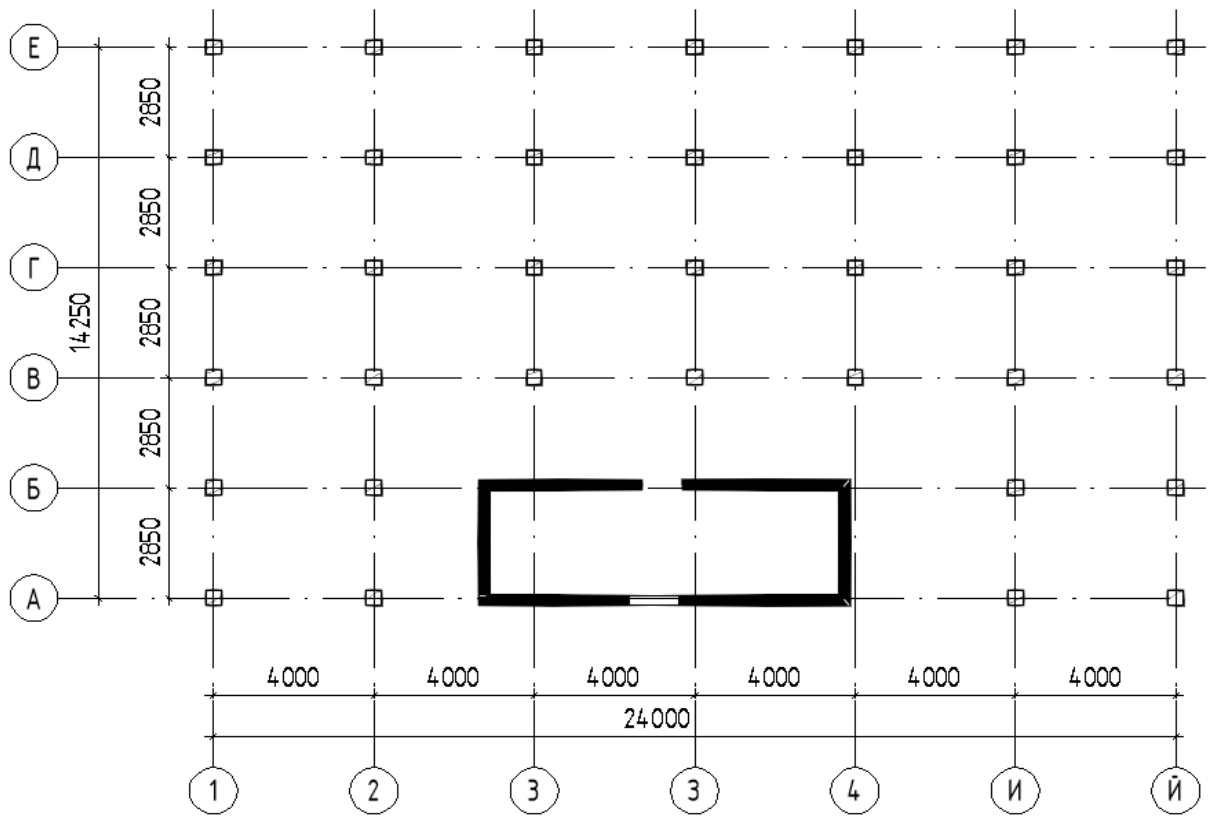
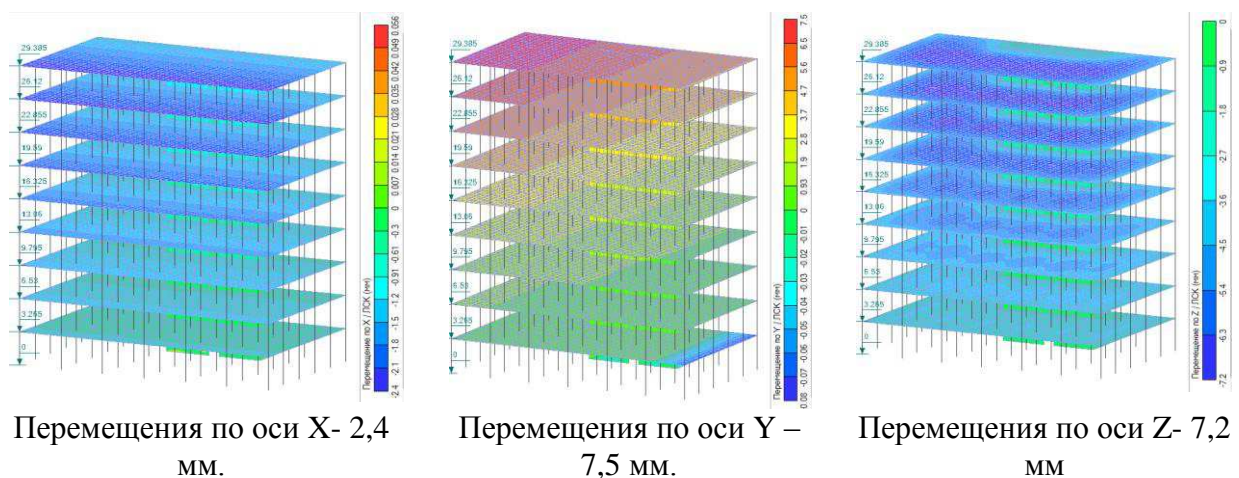


Рисунок 3.58 – План типового этажа

Геометрическая и конечно-элементная модель здания создана в программном комплексе (ПК) Revit и перенесена для дальнейшего расчета в программный комплекс Лира 10.12. Нагрузки приняты аналогично панельному зданию, представлены в п.3.1 стр. 58.

Для плит перекрытия и несущих стен диафрагм размер сеточной области составляет 0,5 x 0,5 м. При этом расчетная модель 9-этажного здания состояла из 15113 узлов и 14838 конечных элементов.



Перемещения по оси X- 2,4 мм.

Перемещения по оси Y – 7,5 мм.

Перемещения по оси Z- 7,2 мм

Рисунок 3.59 – Перемещения каркаса по главным осям

Как видно из рисунка 3.59, наибольшие перемещения здания возникают по оси Y и составляют -7.5 мм. Максимальные перемещения в колонне составляют -7,2 мм. Полученные перемещения не превышают нормативное значение для данного здания, составляющего 59,4 мм.

Далее на рисунках 3.60-3.63 представлены цветовые схемы отображения усилий и напряжений в элементах здания (CLT панелях). Максимальные значения усилий сведены в таблицу 3.12

Таблица 3.12 – Максимальные значения усилий при расчете на сейсмическую нагрузку

Параметры	Значения	Элемент схемы	Прочность на сжатие вдоль волокон, МПа
N_x МПа	-1,3	Стеновые панели диафрагмы жесткости	14,9
N_y МПа	-3	Стеновые панели диафрагмы жесткости	
M_x (кН*м)/м	-9	Панели перекрытия	
M_y (кН*м)/м	-8	Панели перекрытия	
σE МПа	2,1	Стеновые панели диафрагмы жесткости	
σS МПа	-3,8	Стеновые панели диафрагмы жесткости	
σ МПа	-6,5	Колонны первого этажа	
% использован ия сечения колонн	47		Запас прочности 53 %

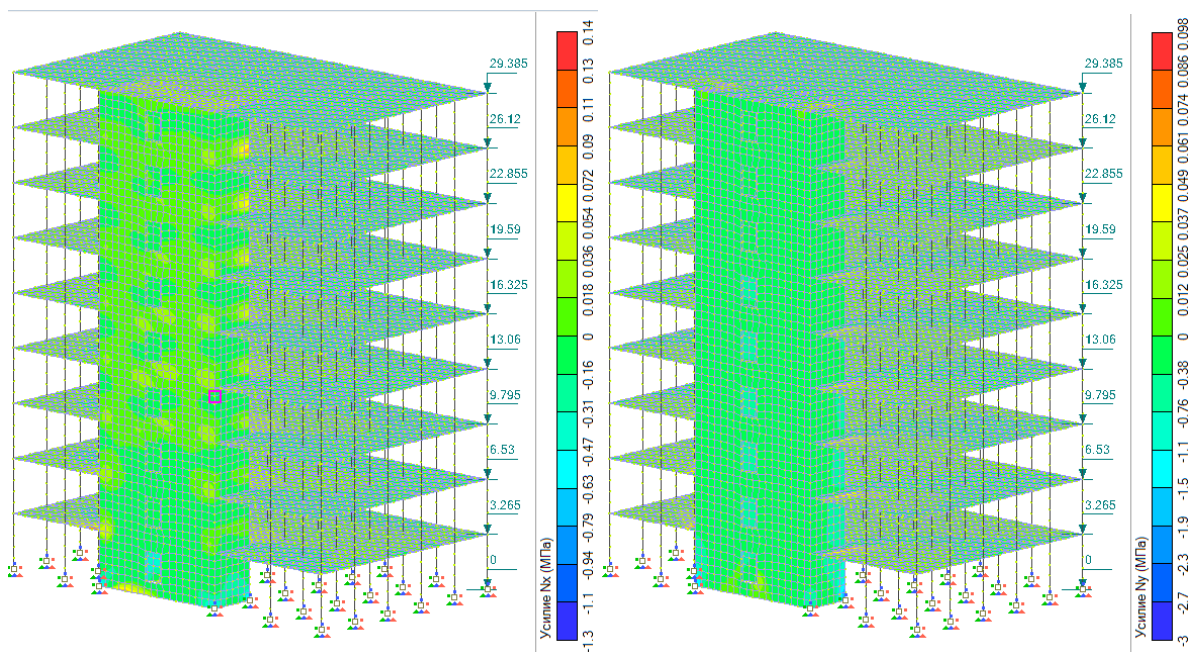


Рисунок 3.60 – Цветовая схема отображения усилий N_{xy} при сейсмическом расчете при комбинации загружений СЗ

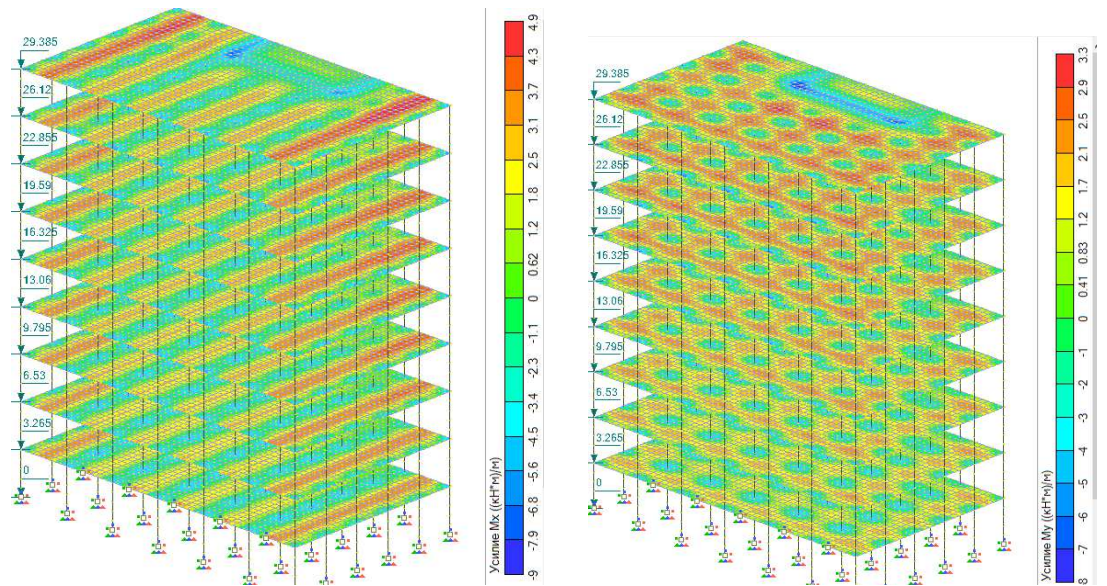


Рисунок 3.61 – Цветовая схема отображения усилий M_x M_y при комбинации загрузжений СЗ

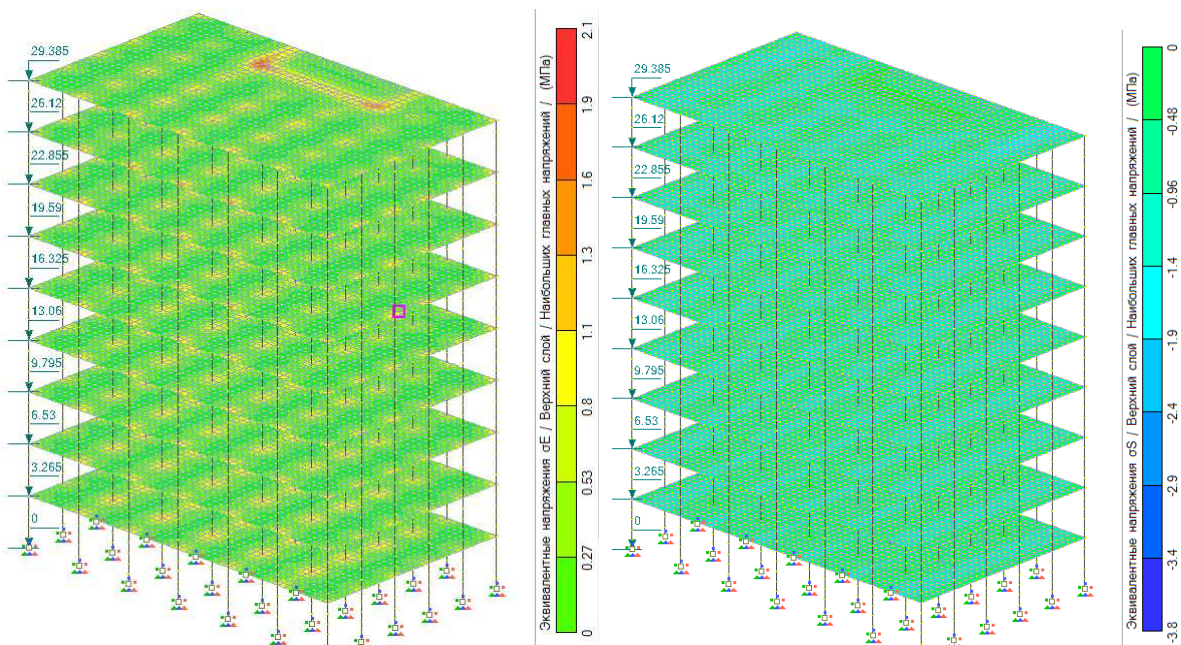


Рисунок 3.62 – Цветовая схема отображения эквивалентных напряжений σ_S и σ_E загрузжений СЗ

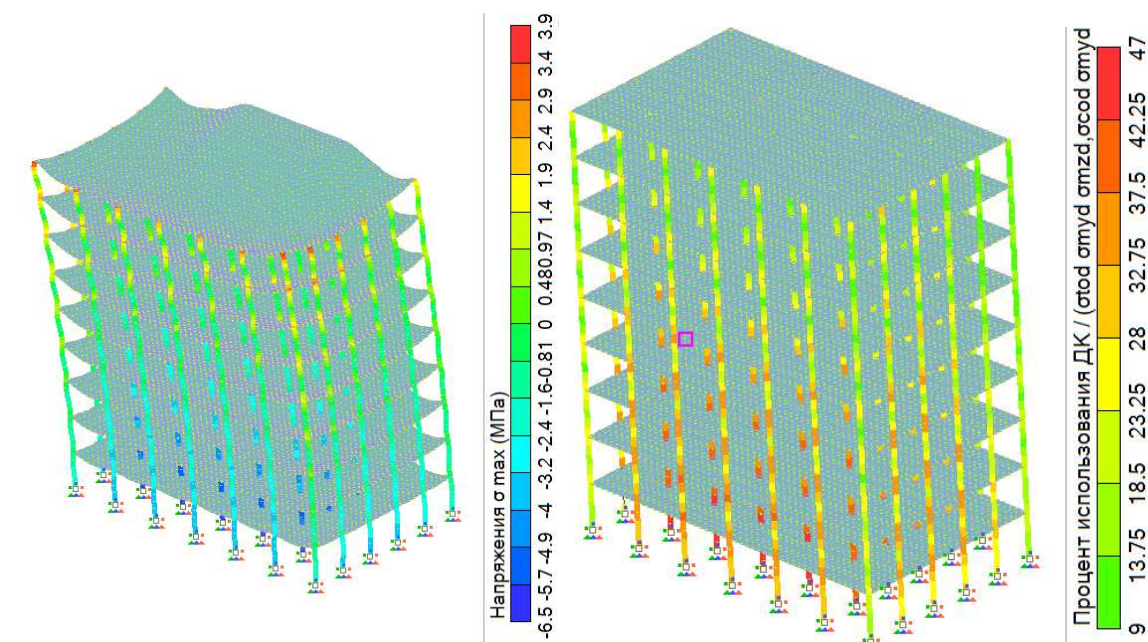


Рисунок 3.63 - Цветовая схема отображения эквивалентных напряжений σ в стрелках и процент использования сечения колонн по прочности

Далее на рисунках 3.8-3.19 представлены цветовые схемы отображения усилий в CLT панелей плиты покрытия, перекрытия 1-го этажа и перекрытия 5-го этажа максимальные значения усилий сведены в таблицу 3.4

Таблица 3.13 – Максимальные значения усилий в плитах перекрытия

Параметры	Плита 1-го этажа	Плита 5-го этажа	Плита покрытия	Сопротивление изгибу, Мпа
N_x МПа	0,18	0,3	-0,13	9,4
N_y КПа	-0,14	-0,7	-0,52	
M_x (кН*м)/м	-6,2	-12,0	-20,0	
M_y (кН*м)/м	-4,6	-11,0	-21,0	
σ_E МПа	1,4	2,1	2,7	
σ_S МПа	-0,82	-1,1	-1,2	

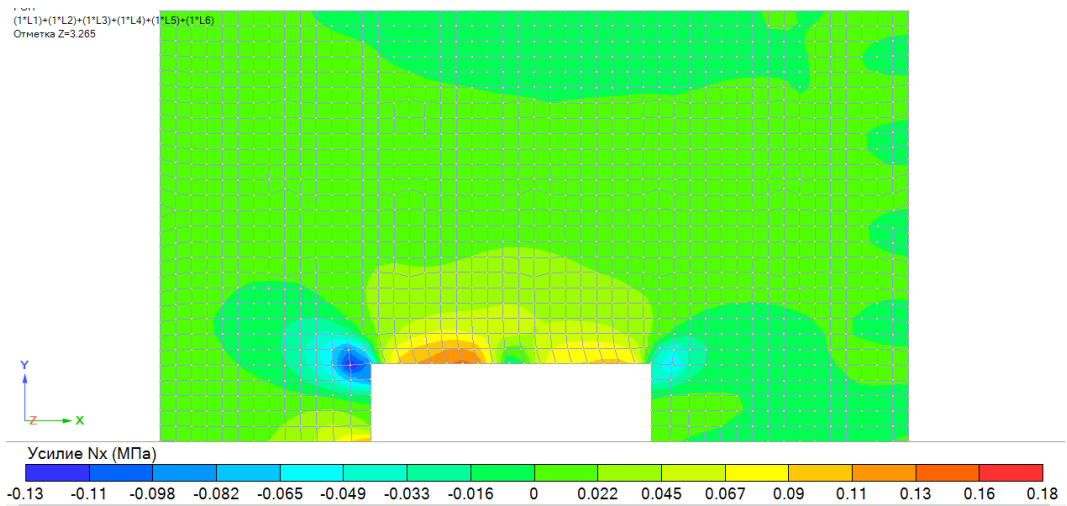


Рисунок 3.63 – Изополя напряжений N_x в плите перекрытия 1-го этажа

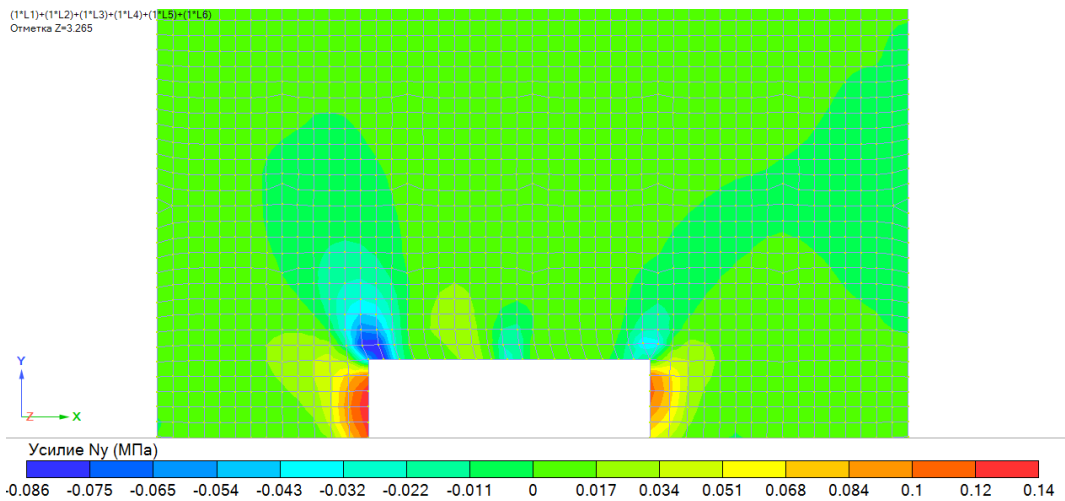


Рисунок 3.64 – Изополя напряжений N_y в плите перекрытия 1-го этажа

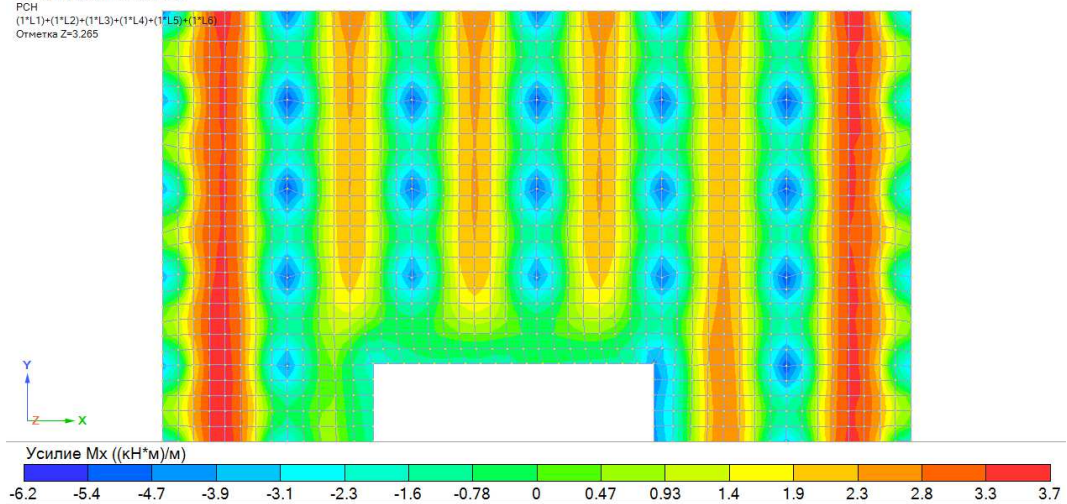


Рисунок 3.65 – Изополя напряжений M_x в перекрытия 1-го этажа

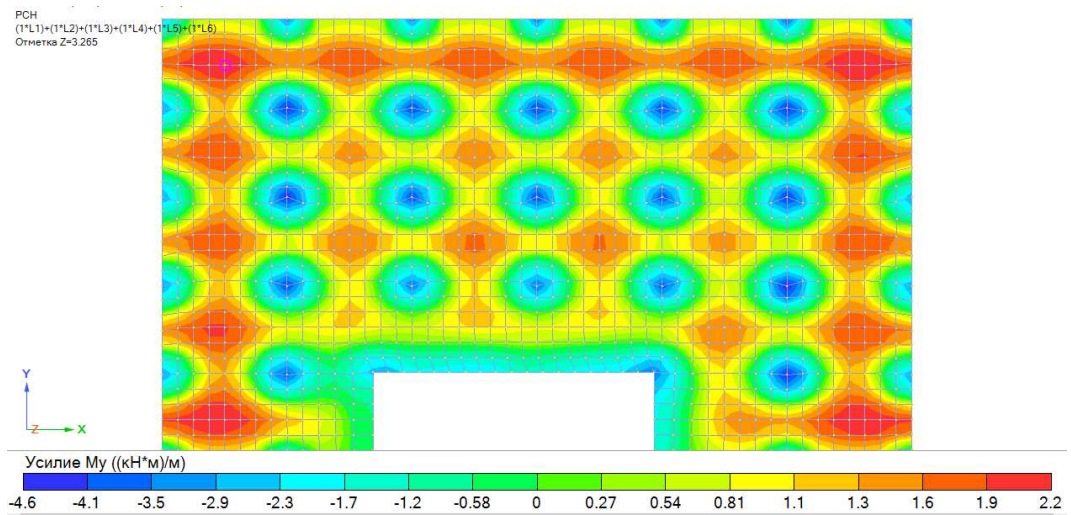


Рисунок 3.66 – Изополя напряжений M_y в перекрытия 1-го этажа

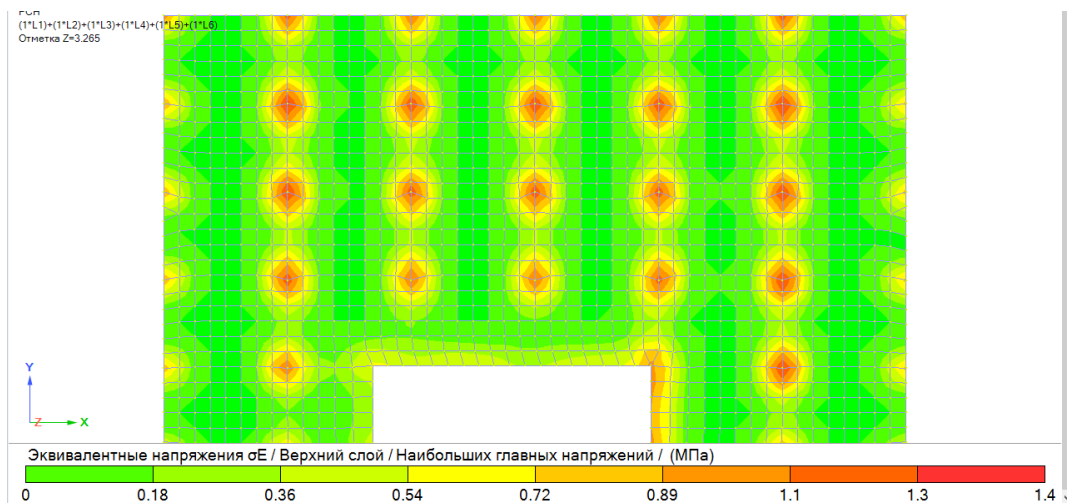


Рисунок 3.67 – Изополя эквивалентных напряжений σ_E в перекрытия 1-го этажа

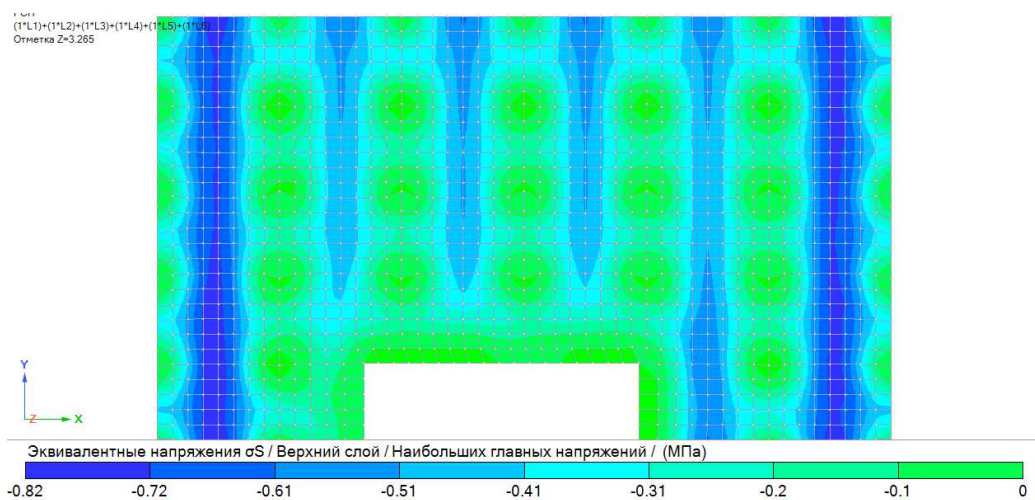


Рисунок 3.68 – Изополя эквивалентных напряжений σ_S в перекрытия 1-го этажа

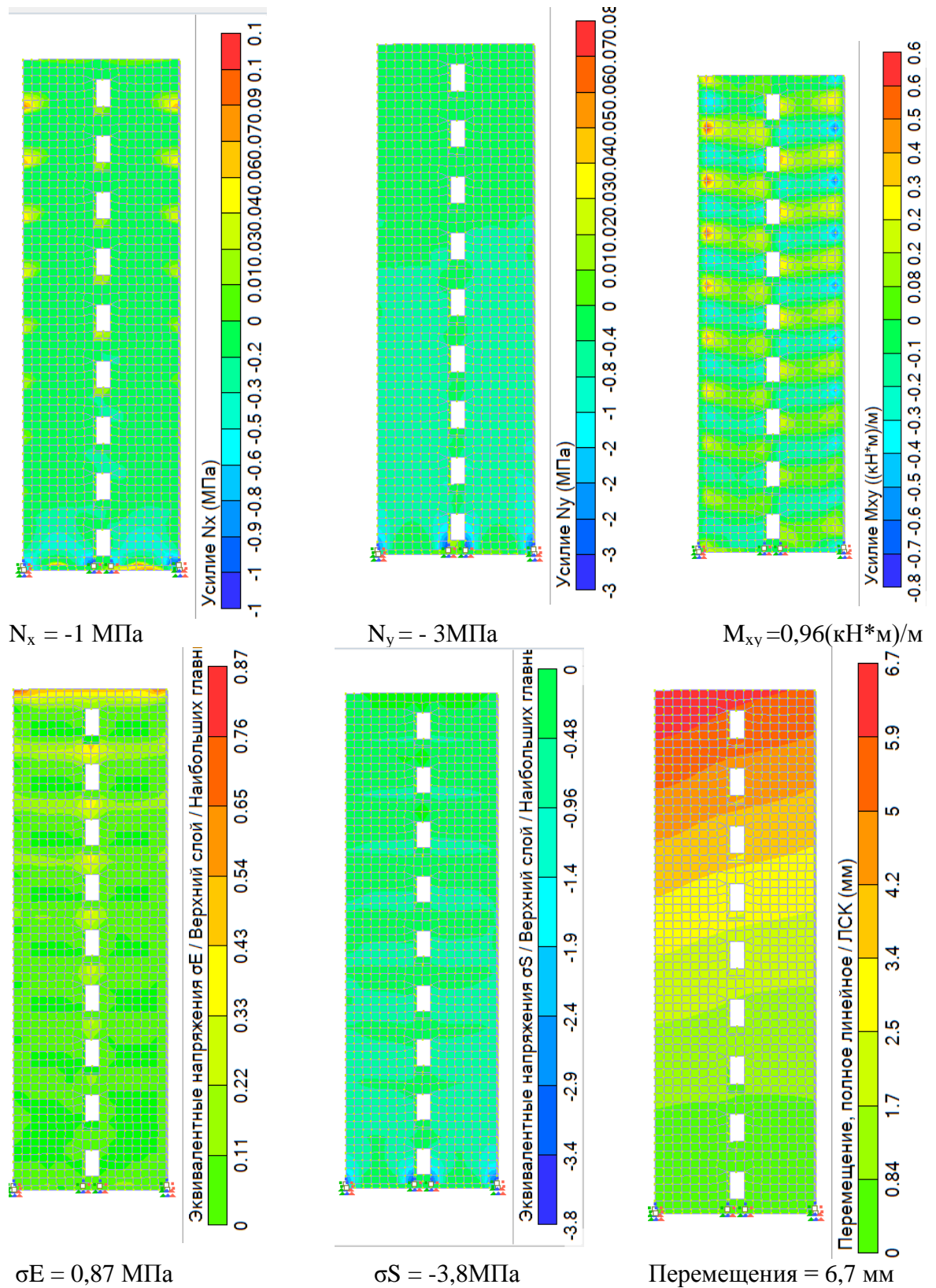


Рисунок 3.69 – Изополя напряжений и моментов в диафрагме жесткости при статическом расчете при комбинации загрузений С3

Из рисунка 3.69 видно, что наиболее напряжена нижняя часть диафрагмы жесткости, продольные усилия в которой составляют: $N_x = -1$ МПа, $N_y = -3$ МПа. Наибольшие моменты возникают в верхней части диафрагмы жесткости и составляют $M_{xy} = 0,8$ (кН*м)/м. Эквивалентные напряжения σ_E и σ_S составляют 0,87 МПа и -3,8 МПа соответственно, при нормативном значении сопротивления изгибу 9,38 МПа и нормативном значении прочности на сжатие вдоль волокон 15 МПа. Результаты сравнения полученных напряжений и усилий от действия основной комбинации нагрузок С3 представлены на рисунке 3.70

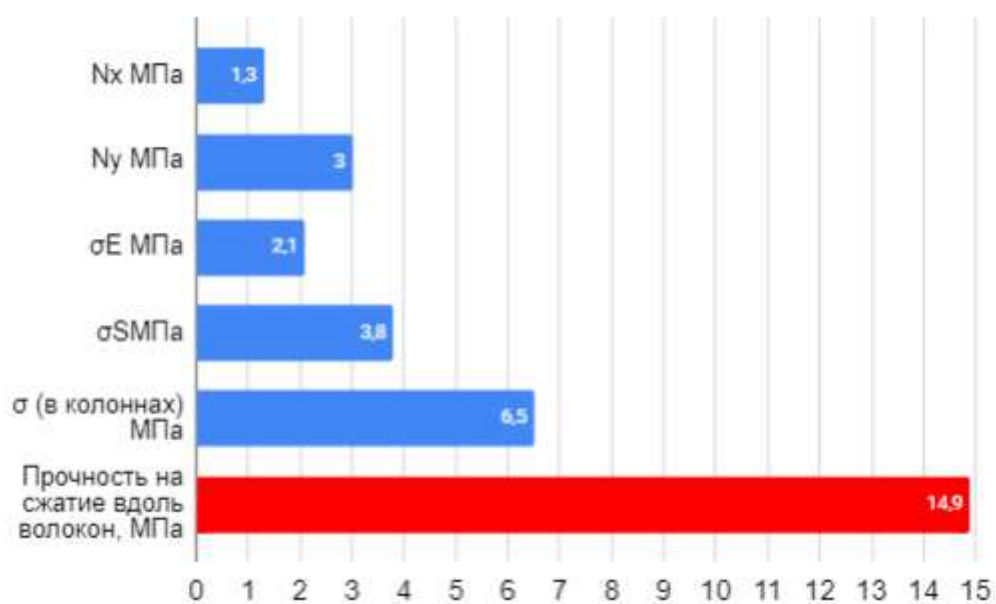


Рисунок 3.70 – Сравнения полученных напряжений с предельно допустимыми значениями

3.6. Расчет на сейсмические воздействия линейно- спектральным методом (по СП 14.13330.2018 г)

Вначале для получения общего представления о свойствах несущей системы многоэтажного здания и схемы конструктивно-планировочного решения здания был выполнен расчет пространственной конечно-элементной модели на собственные колебания (модальный анализ).

Для определения частот и форм собственных колебаний используется блочный алгоритм Ланцоша. Реализованный в Лира 10.12 алгоритм основан на механизме подсчета процента учтенной модальной массы.

При выполнении модального анализа учитывалось 20 форм собственных колебаний.

Полученные результаты для первых 20-ти форм представлены в таблице 3.14 и на рисунке 3.71, в виде первых трех форм собственных колебаний.

Таблица 3.14 – Периоды колебаний

Загружение	Форма	Частота		Периоды	Форма	Частота		Периоды
		Рад/сек	Гц	сек		Рад/сек	Гц	сек
Модальный анализ	1	6,175	0,982	1,018	11	49,440	7,868	0,127
	2	8,319	1,324	0,755	12	58,341	9,284	0,108
	3	17,599	2,801	0,357	13	63,355	10,082	0,099
	4	26,074	4,149	0,241	14	68,369	10,880	0,092
	5	31,144	4,956	0,202	15	73,382	11,678	0,086
	6	39,963	6,360	0,157	16	78,396	12,476	0,080
	7	41,385	6,586	0,152	17	83,410	13,274	0,075
	8	41,726	6,640	0,151	18	88,424	14,072	0,071
	9	45,821	7,292	0,137	19	93,438	14,870	0,067
	10	49,440	7,868	0,127	20	98,452	15,668	0,064

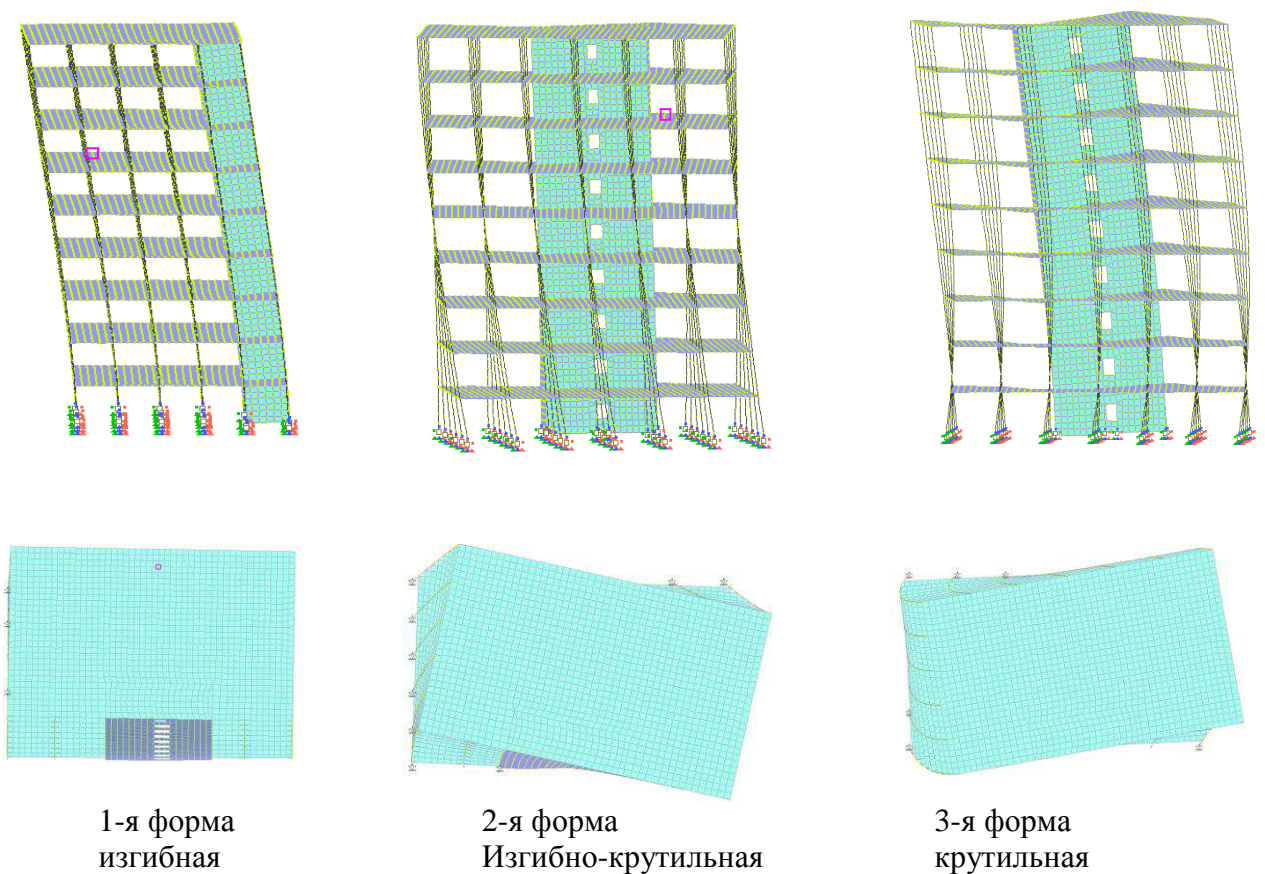


Рисунок 3.71 – Низшие формы собственных колебаний

Как видно из полученных результатов, в первой форме собственных колебаний преобладает изгиб, вторая изгиб с кручением, а третья форма является крутильной.

При этом период основного тона колебаний составил 0,73 с.

Из анализа периода и вида первой формы собственных колебаний, следует, что динамические характеристики рассматриваемого здания близки к результатам, приведенным в работах по расчету железобетонных многоэтажных зданий. Там же указывается, что при рациональном конструктивном решении многоэтажного здания 1-я форма колебаний является изгибной.

По своей конструктивной схеме рассматриваемое 9-ти этажное здание относится к простым, но из-за того, что в 1-й форме собственных колебаний возникает кручение, то согласно по СП 14.13330.2018 оно подпадает под категорию сложных, т.е. здание можно отнести и к сложным. В соответствии с

вышеизложенным, при расчете на сейсмические воздействия была выбрана расчетная ситуация, соответствующая уровню расчетного землетрясения (РЗ).

В программе Лира 10.12 расчет на сейсмические воздействия выполняется методом разложения решения по формам собственных колебаний.

При расчете по нормам СП 14.13330.2018 было принято: категория грунта - II; тип сооружения – жилые, общественные, производственные здания; сейсмичность - 8 баллов в горизонтальном направлении; допускаемые повреждения элементов зданий – из деревянных конструкций $K_1= 0,15$; по табл.5.2, коэффициент надежности по нагрузке, определяемые назначением сооружения K_0 1, по табл. 4.2, коэффициент, учитывающий способность зданий и сооружений к рассеиванию энергии, принимаемый по табл.5.3 $K_y=1$ [33].

Для сопоставления результатов расчетов по нормам и воздействия акселерограммы землетрясения в Эль-Сентро исходные данные для расчета по нормативному методу выбирались согласно данным сейсмического районирования, приведенных в нормах.

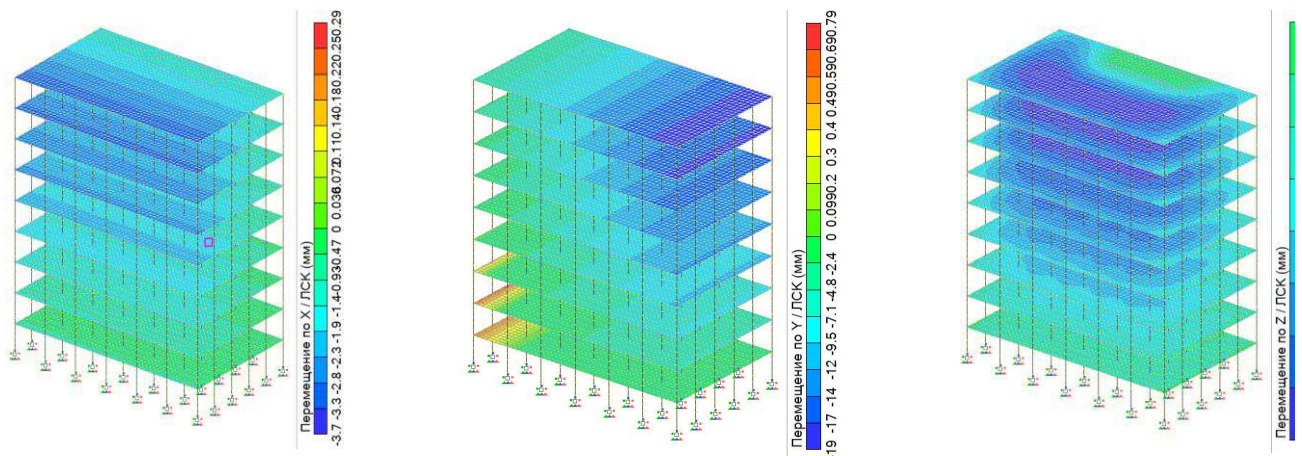
Расчеты на действие акселерограмм выполнялись с учетом затухания колебаний (заданием коэффициента диссипации $\Phi=0,1$).

Полученные результаты расчетов на действие сейсмических нагрузок в виде изополей перемещений, усилий и напряжений в элементах несущей системы здания показаны на рисунках 3.23-3.39 и в таблице 3.7.

Комбинация загружений является для всех расчетов на по СП 14.13330.2018 единой, меняется только интенсивность сейсмической нагрузки:

Таблица 3.15 - Комбинация загружений для расчета на сейсмическое воздействие

№	Собственный вес	Ветровая нагрузка по бук. оси	Сейсмическая нагрузка	Эксплуатационная нагрузка	Снеговая нагрузка	Ветровая нагрузка по цифр. осям	Собственный вес покрытия
СЗ	0,9	0	1	0,5	0,5	0	0,9



Перемещения по оси X- 3,7 мм.

по Перемещения по оси Y – 19 мм.

Перемещения по оси Z- 16 мм

Рисунок 3.72 –Линейные перемещения многоэтажного здания при статическом расчете при комбинации загружений СЗ

Как видно из рисунка 3.72, наибольшие перемещения здания, как и в статическом расчете, возникают в верхней части здания и составляют -19 мм.

Полученные перемещения не превышают нормативное значение для данного здания, составляющего 59,4 мм.

Далее на рисунках 3.73-3.76 представлены цветовые схемы отображения усилий и напряжений в элементах здания (CLT панелях). Максимальные значения усилий сведены в таблицу 3.16

Таблица 3.16 – Максимальные значения усилий при расчете на сейсмическую нагрузку

Параметры	Значения	Элемент схемы	Прочность на сжатие вдоль волокон, МПа
N_x МПа	-3	Стеновые панели 1-го этажа	14,9
N_y МПа	-7	Стеновые панели 1-го этажа	
M_x (кН*м)/м	-20	Панели перекрытия	
M_y (кН*м)/м	-21	Панели перекрытия	
σ_E МПа	5	Панели перекрытия	
σ_S МПа	-9	Стеновые панели 1-го этажа	
σ МПа	-7,5	Колонны первого этажа	
% использования сечения колонн	73		Запас прочности 27 %

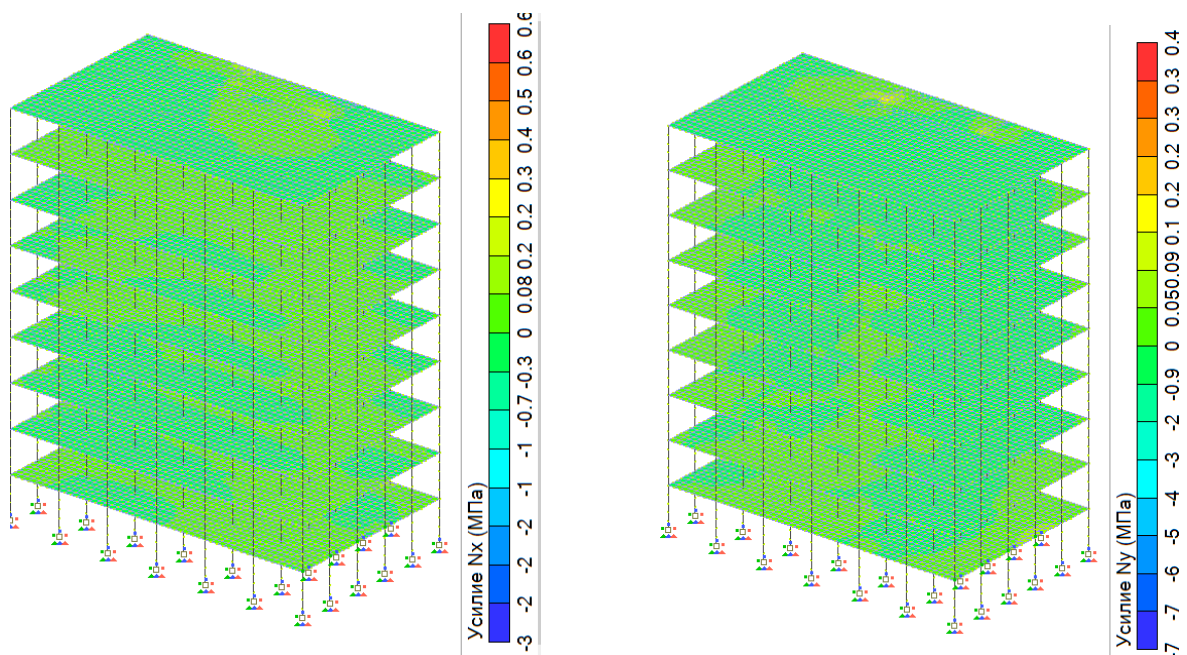


Рисунок 3.73 – Цветовая схема отображения усилий $N_{x,y}$ при сейсмическом расчете при комбинации нагрузок СЗ

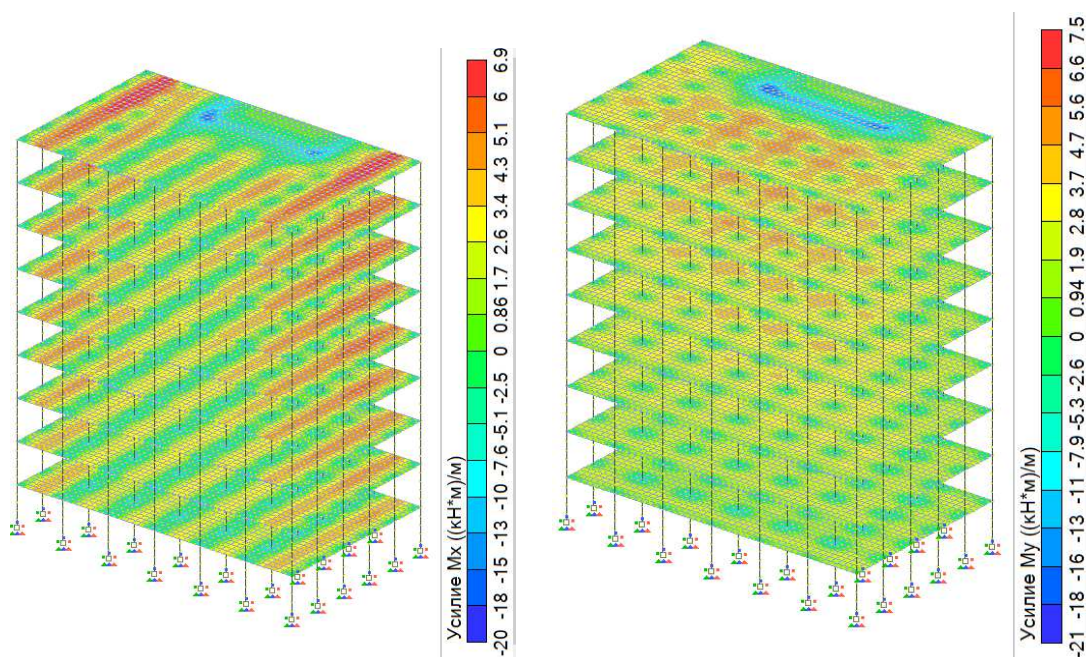


Рисунок 3.74 – Цветовая схема отображения усилий M_x, M_y при сейсмическом расчете при комбинации нагрузок СЗ

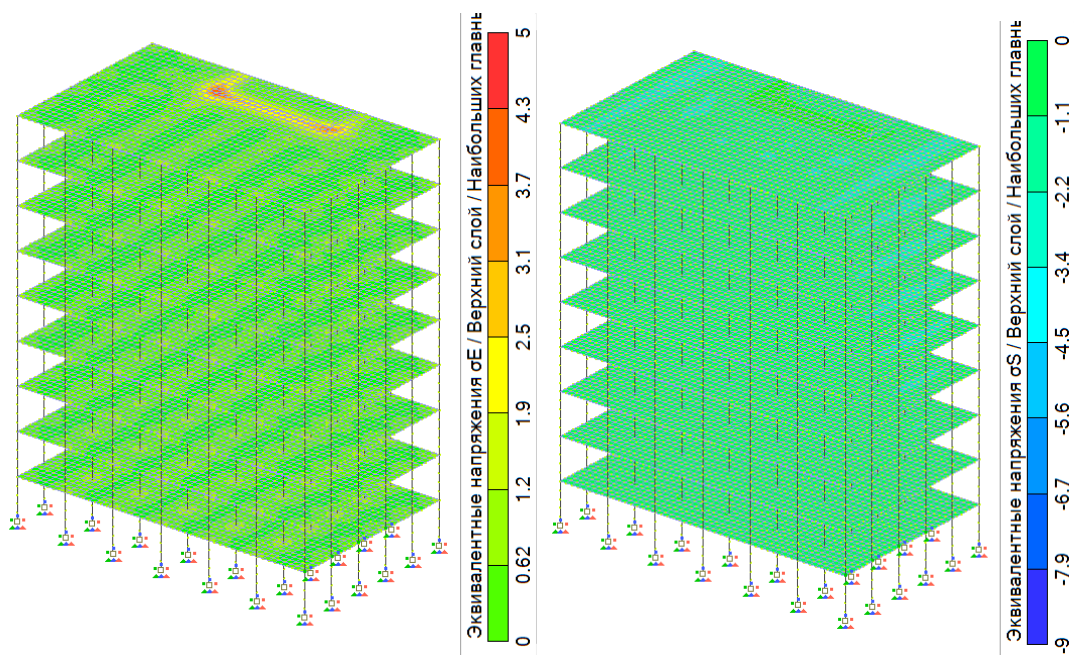


Рисунок 3.75 – Цветовая схема отображения эквивалентных напряжений σ_S и σ_E при сейсмическом расчете при комбинации загрузений СЗ

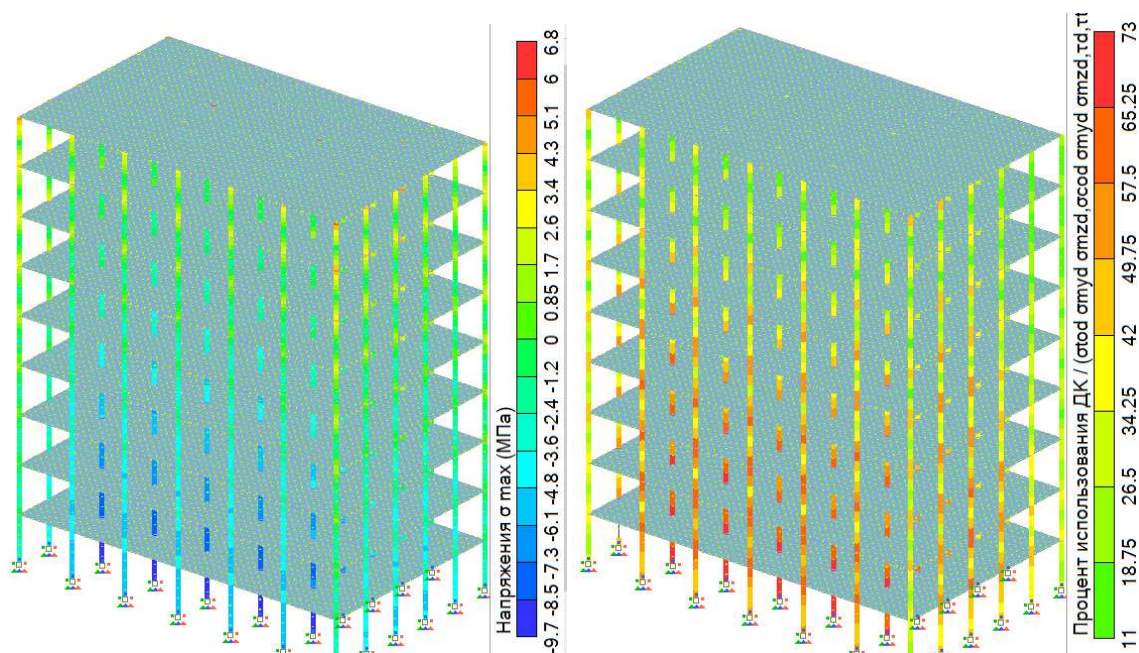


Рисунок 3.76 – Цветовая схема отображения эквивалентных напряжений σ в стержнях и процент использования сечения колонн

Далее на рисунках 3.77-3.88 представлены цветовые схемы отображения усилий в CLT панелей плиты покрытия, перекрытия 1-го этажа и перекрытия 5 этажа максимальные значения усилий сведены в таблицу 3.17

Таблица 3.17 – Максимальные значения усилий в плитах перекрытия

Параметры	Плита 1-го этажа	Плита 5-го этажа	Плита покрытия	Сопротивление изгибу, МПа
N_x МПа	0,43	0,45	-0,29	
N_y КПа	-0,37	-0,56	-0,73	
M_x (кН*М)/м	-9,6	-15,4	-24	
M_y (кН*М)/м	-11	-16,2	-25	
σ_E МПа	2,50	3,6	5,9	
σ_{SM} Па	-1,10	-1,3	-1,9	

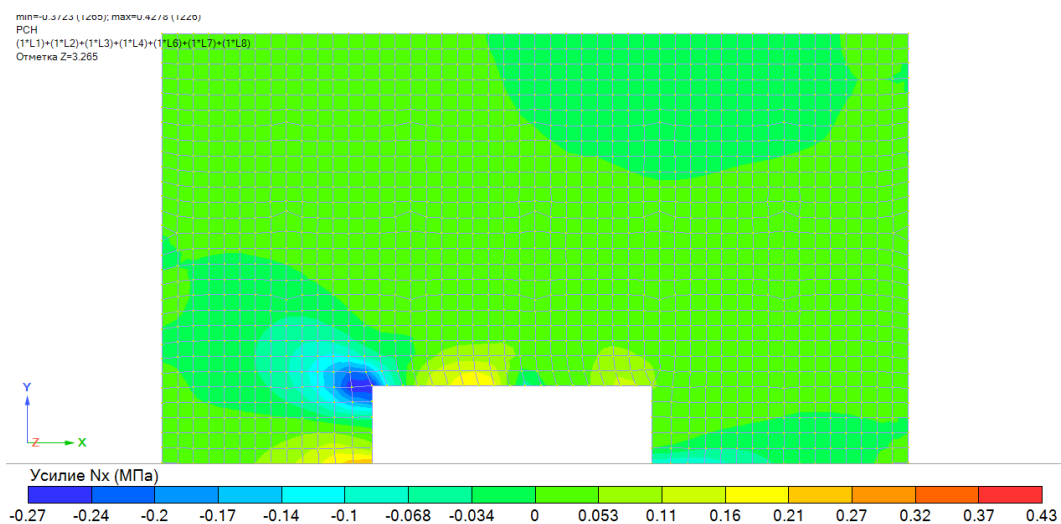


Рисунок 3.77 – Изополя напряжений N_x в плите перекрытия 1-го этажа

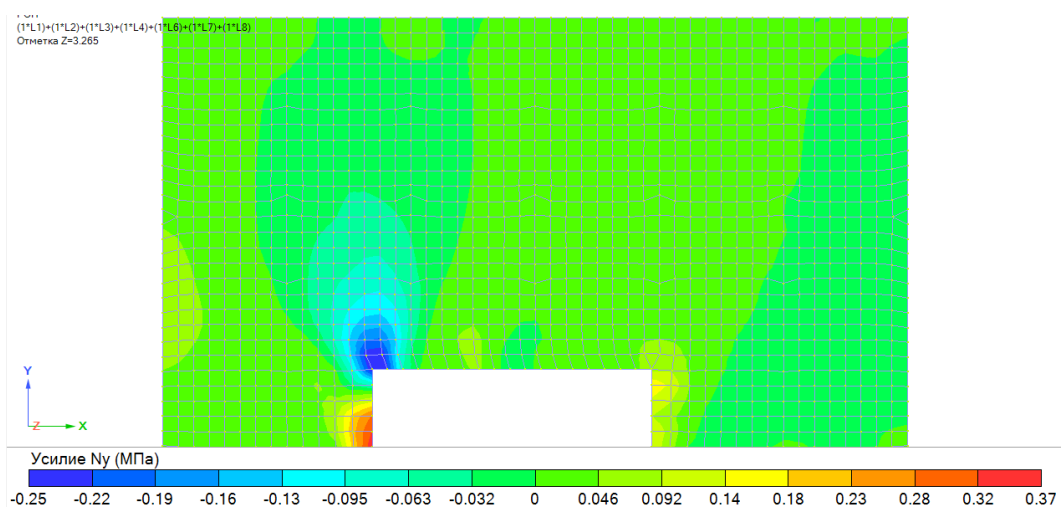


Рисунок 3.78 – Изополя напряжений N_y в плите перекрытия 1-го этажа

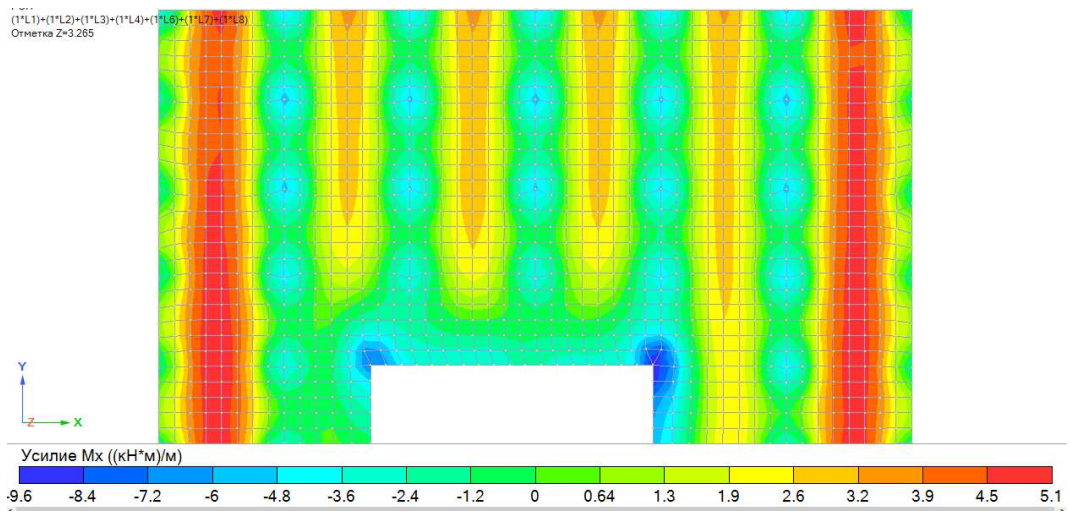


Рисунок 3.79 – Изополя напряжений M_x в перекрытии 1-го этажа

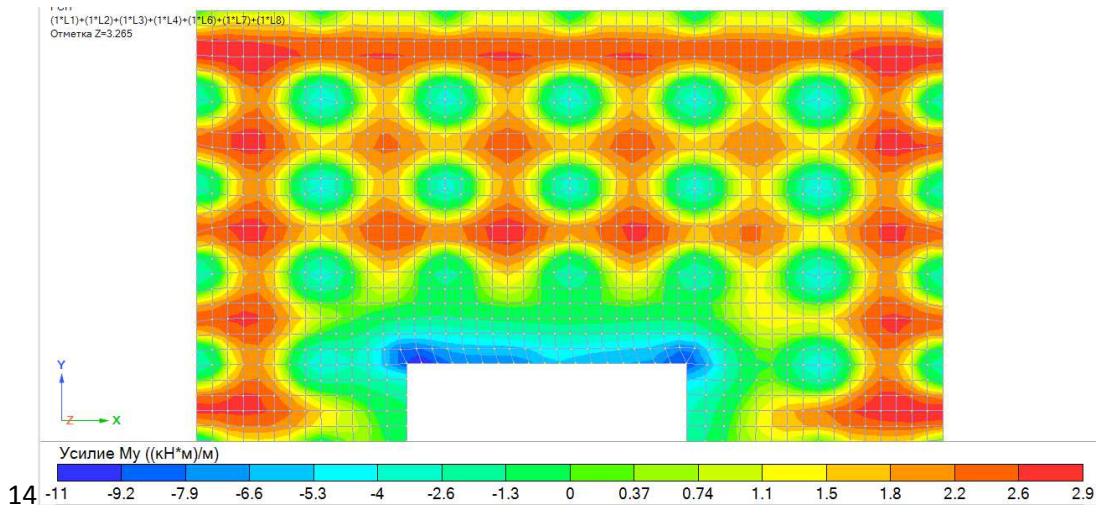


Рисунок 3.80 – Изополя напряжений M_y в перекрытии 1-го этажа

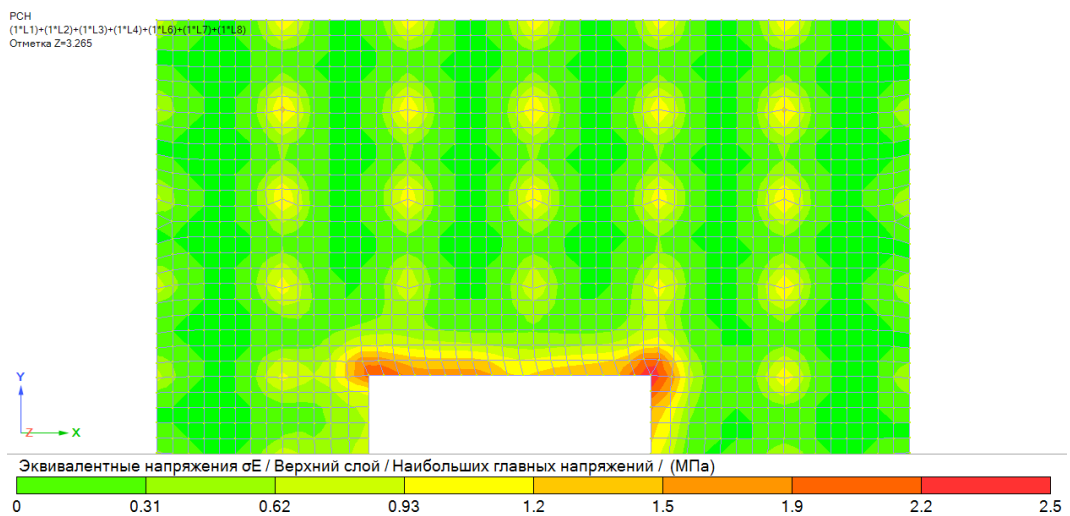


Рисунок 3.81 – Изополя эквивалентных напряжений σ_E в перекрытии 1-го этажа

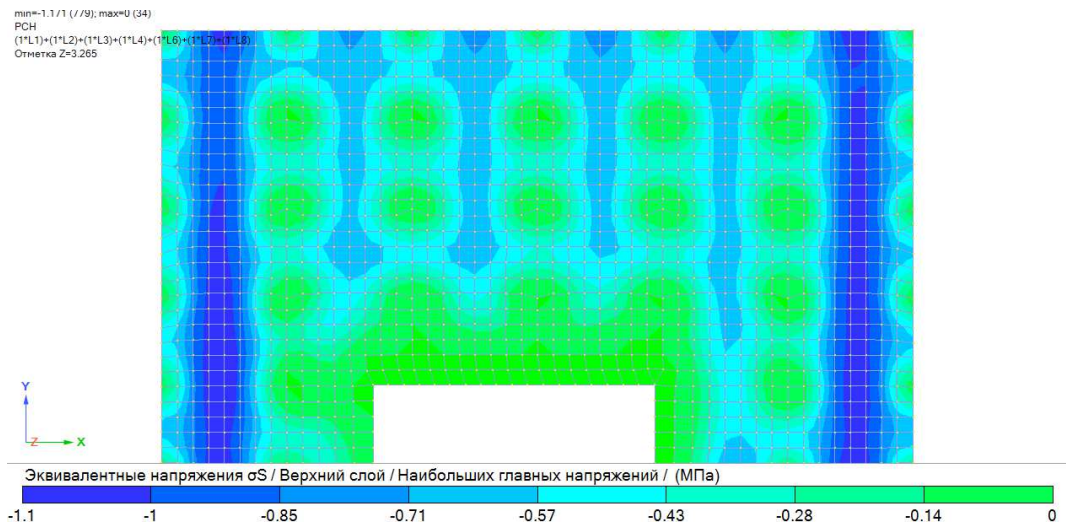


Рисунок 3.82 – Изополя эквивалентных напряжений σ_S в перекрытия 1-го этажа

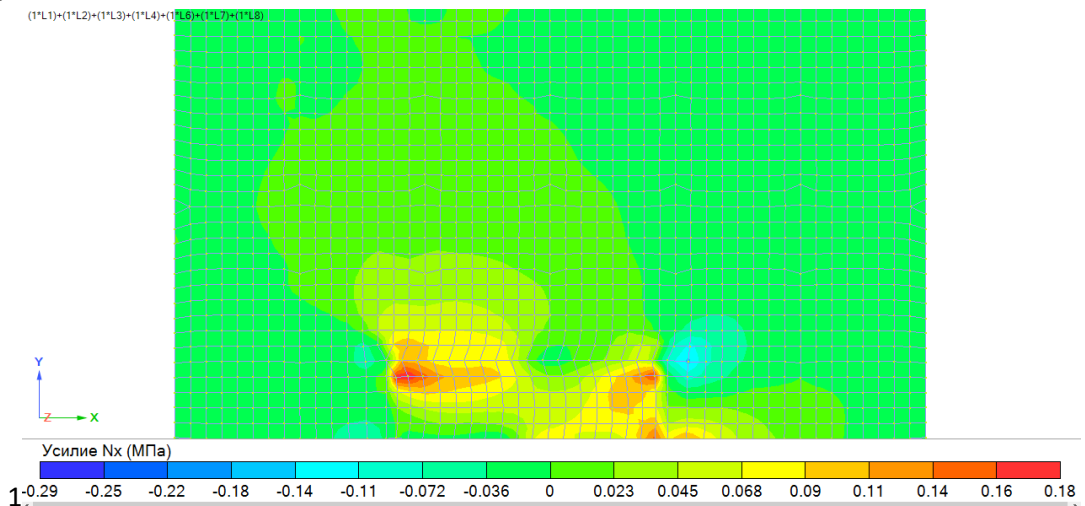


Рисунок 3.83 – Изополя напряжений N_x в плите перекрытия

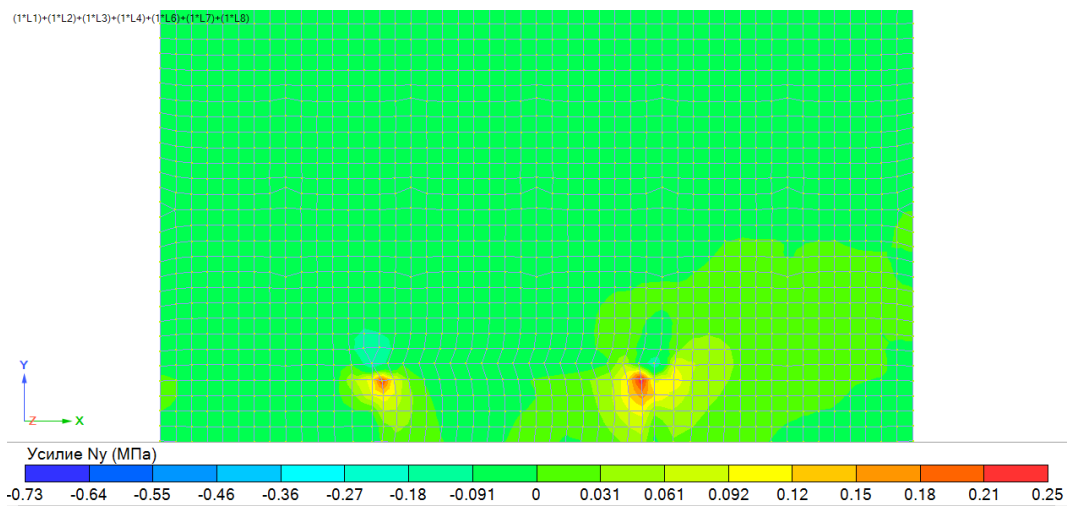
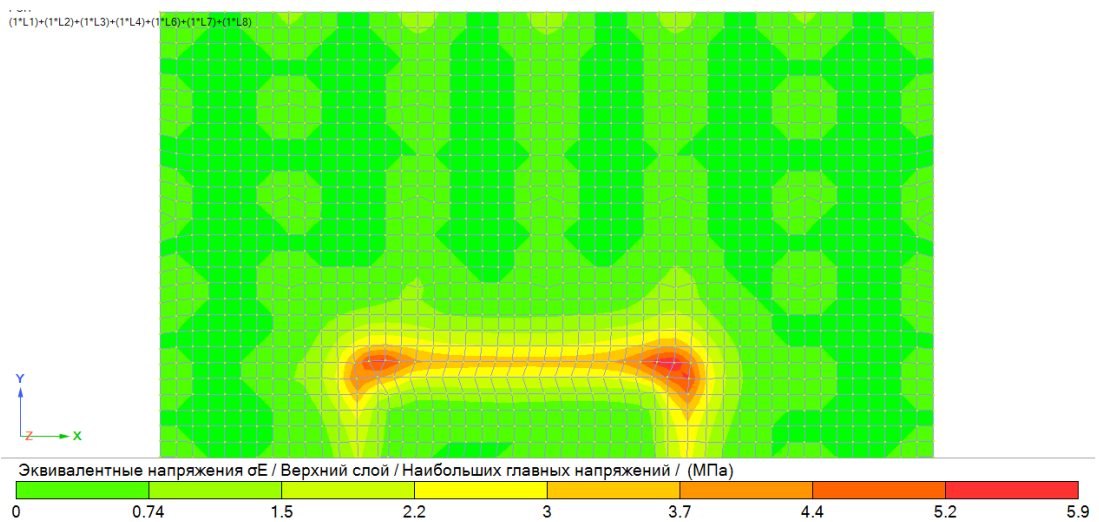
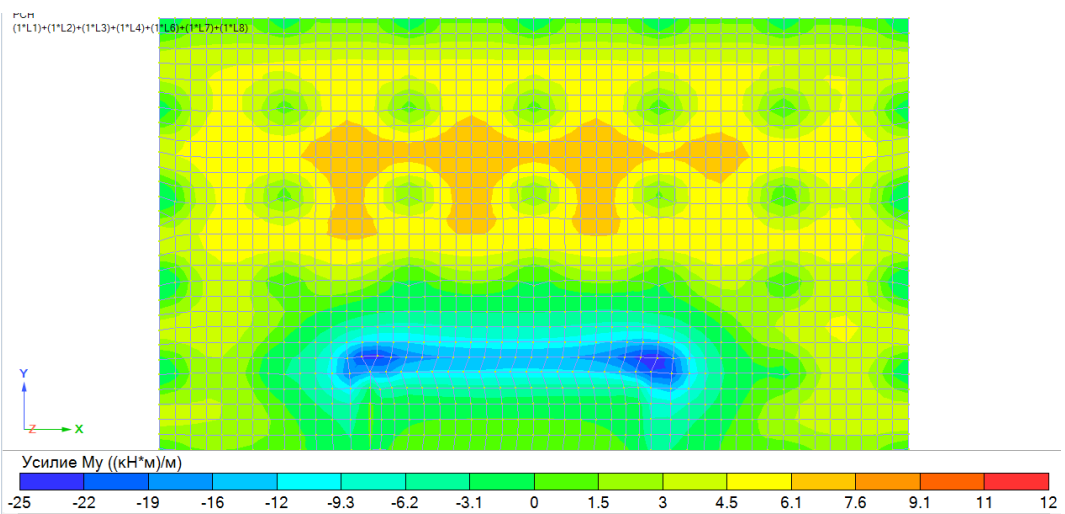
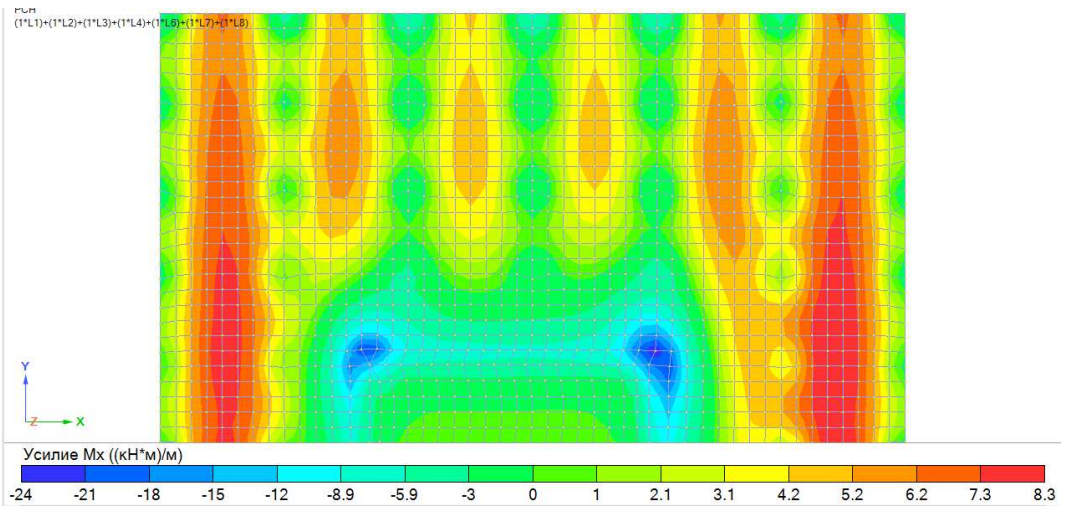


Рисунок 3.84 – Изополя напряжений N_y в плите перекрытия



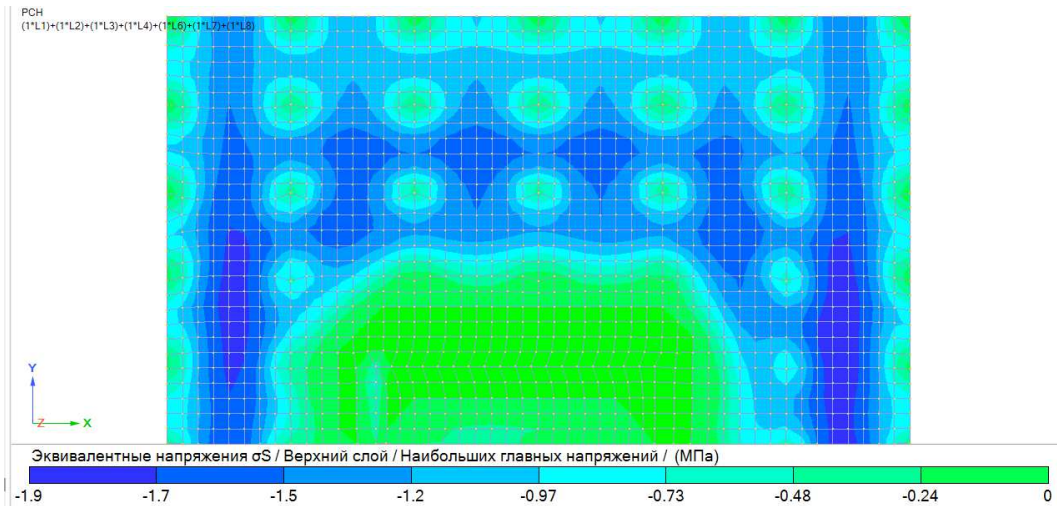
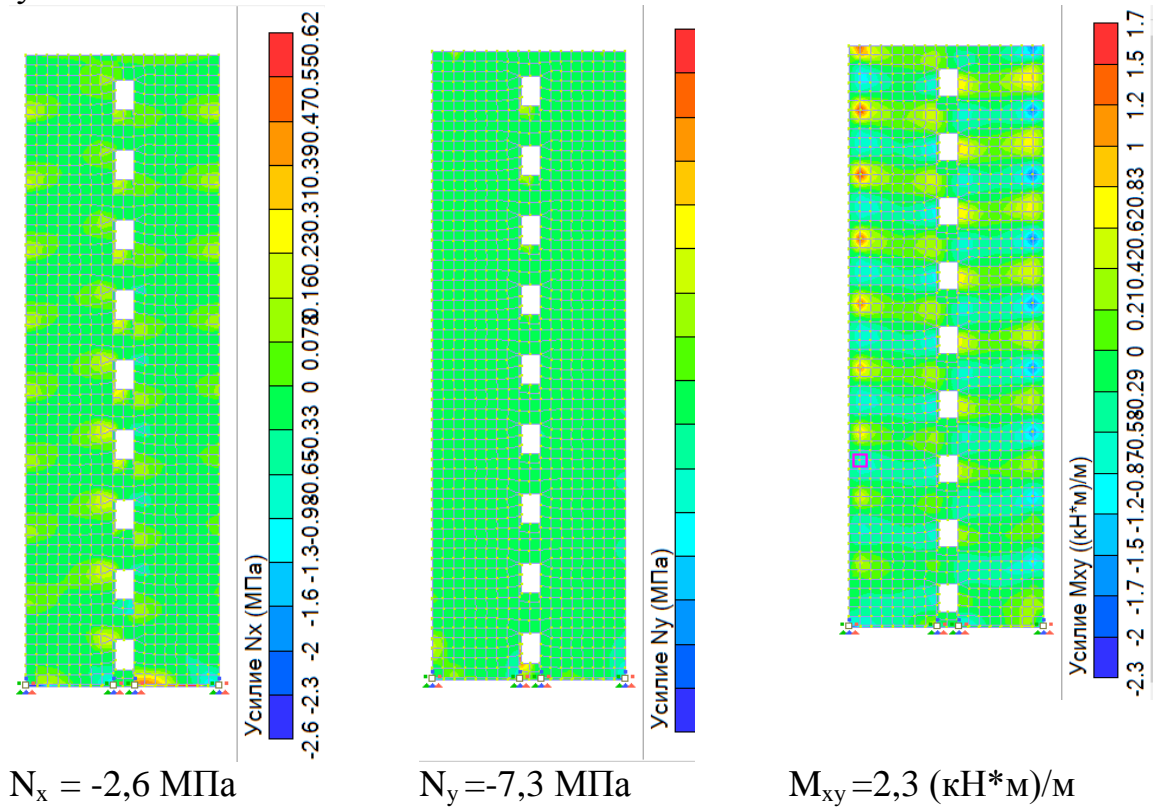


Рисунок 3.88 – Изополя эквивалентных напряжений σ_S в плите покрытия

Цветовые схемы отображения усилий в диафрагмах жесткости показаны на рисунках 3.89.



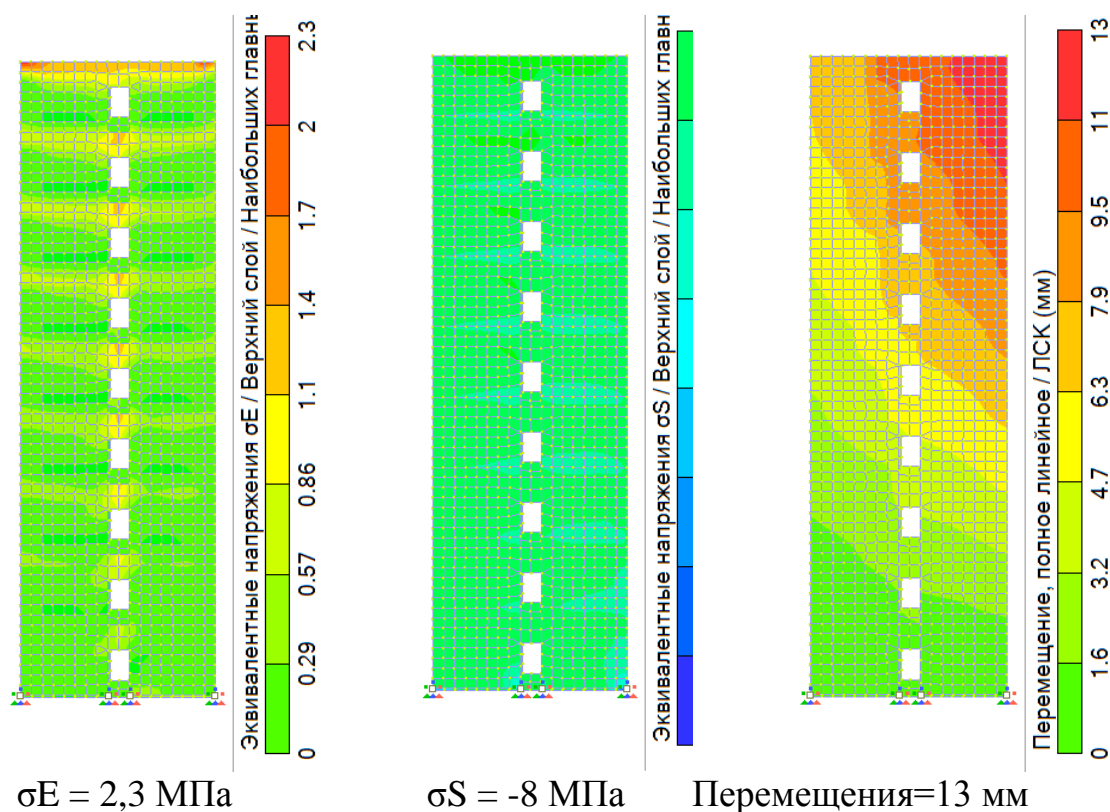


Рисунок 3.89 – Изополя напряжений и моментов в диафрагме жесткости при статическом расчете при комбинации загрузений С3

Из рисунка 3.89 видно, что наиболее напряжена нижняя часть диафрагмы жесткости, продольные усилия в которой составляют: $N_x = -2,6 \text{ МПа}$, $N_y = -7,3 \text{ МПа}$. Наибольшие моменты возникают в верхней части диафрагмы жесткости и составляют $M_{xy} = -2,3 \text{ (кН*м)/м}$. Эквивалентные напряжения σ_E и σ_S составляют 2,3 МПа и -8 МПа соответственно, при нормативном значении сопротивления изгибу 9,38 МПа и нормативном значении прочности на сжатие вдоль волокон 15 МПа. Результаты сравнения полученных напряжений и усилий от действия основной комбинации нагрузок С3 представлены на рисунке 3.40

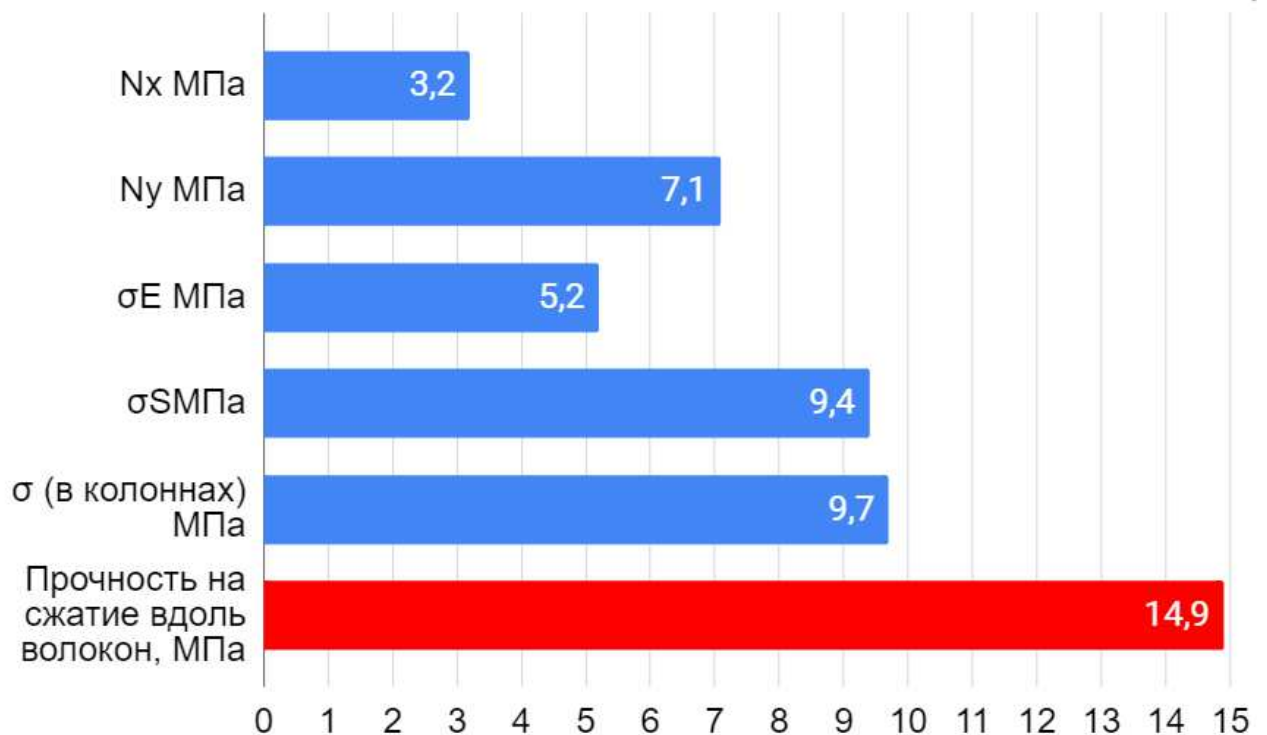


Рисунок 3.90 – Сравнения полученных напряжений с предельно допустимыми значениями

3.7. Расчет на действие акселерограмм

Для этого расчетная схема была нагружена теми же нагрузками, что и при расчете на сейсмические воздействия по нормам СП, и вместо самой сейсмической нагрузки была приложена акселерограмма землетрясения в Эль-Сентро 1940 г.

Данный расчет поможет нам понять какие бы напряжения могут возникнуть у здания при реальном землетрясении и какие напряжения могли бы возникнуть у этого здания с существующими конструктивными элементами в условиях строительства района г. Эль-Сентро.

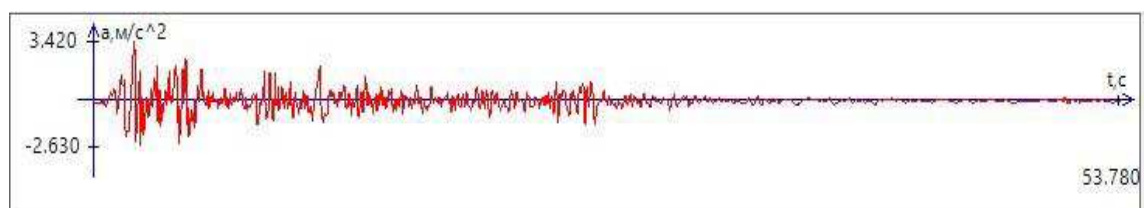


Рисунок 3.91– Радиальная составляющая акселерограммы землетрясения Эль-Сентро



Рисунок 3.92 – Вертикальная составляющая акселерограммы землетрясения Эль-Сентро

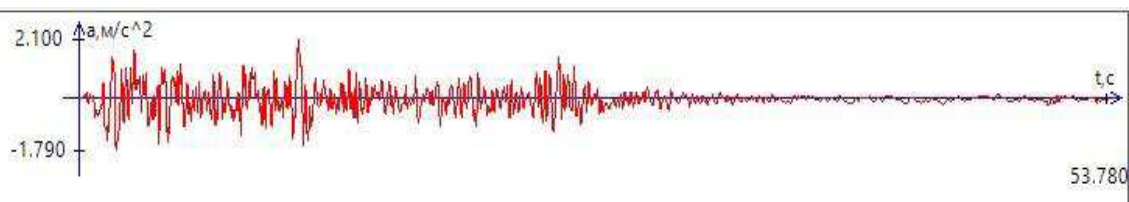
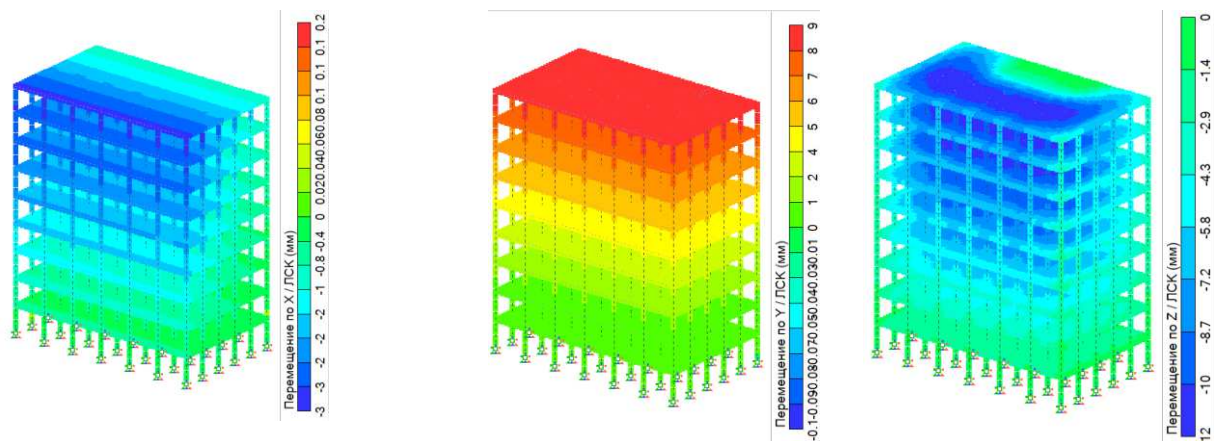


Рисунок 3.93 – Тангенсальная составляющая акселерограммы землетрясения Эль-Сентро



Перемещения по оси X- 3 мм.

Перемещения по оси Y – 9 мм.

Перемещения по оси Z- 12 мм

Рисунок 3.94 –Линейные перемещения многоэтажного здания при расчете на действие акселерограммы Эль-центро

Как видно из рисунка 3.94, наибольшие перемещения здания, как и в статическом расчете, возникают по оси Z и составляют -12 мм.

Полученные перемещения не превышают нормативное значение для данного здания, составляющего 59,4 мм.

Далее на рисунках 3.95-3.97 представлены цветовые схемы отображения усилий и напряжений в элементах здания (CLT панелях). Максимальные значения усилий сведены в таблицу 3.18

Таблица 3.18 – Максимальные значения усилий при расчете на сейсмическую нагрузку

Параметры	Значения	Элемент схемы	Прочность на сжатие вдоль волокон, МПа
N_x МПа	-9,3	Стеновые панели 1-го этажа	14,9
N_y МПа	-11,0	Стеновые панели 1-го этажа	
M_x (кН*м)/м	-14,0	Панели перекрытия	
M_y (кН*м)/м	-13,0	Панели перекрытия	
σ_E МПа	13	Панели перекрытия	
σ_{SM} МПа	-12	Стеновые панели 1-го этажа	
σ МПа	-12	Колонны первого этажа	
% использова ния сечения колонн	87		Запас прочности 13 %

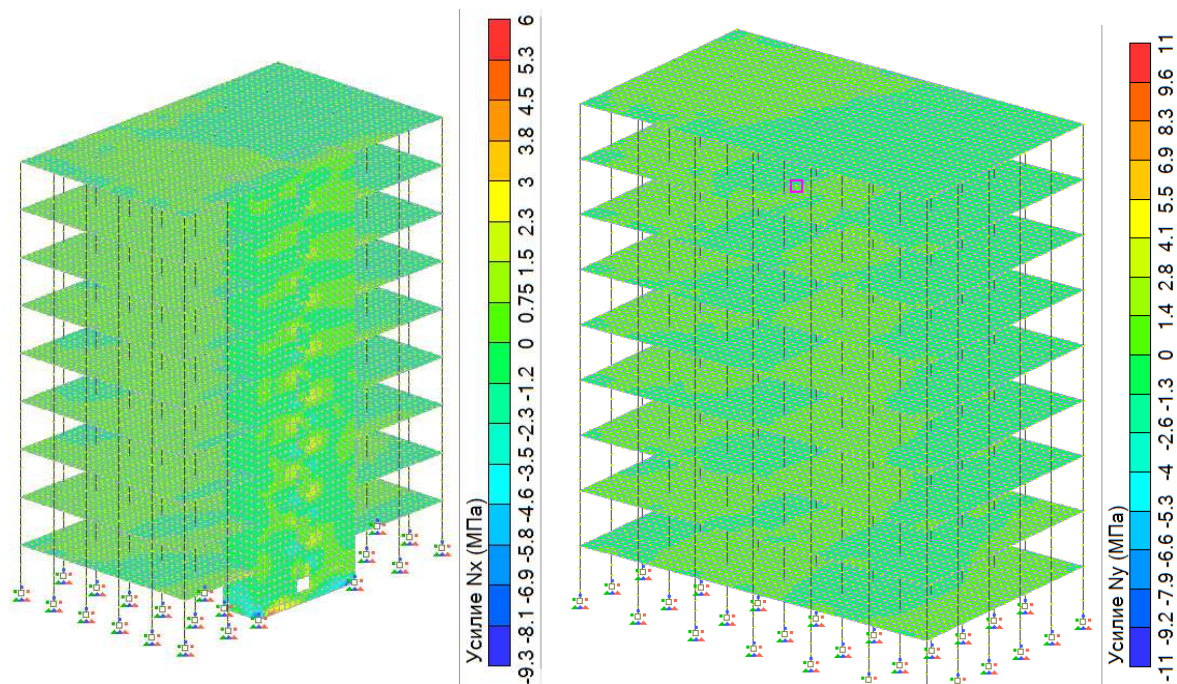


Рисунок 3.95 – Цветовая схема отображения усилий N_{xy} при сейсмическом расчете при комбинации нагрузок СЗ

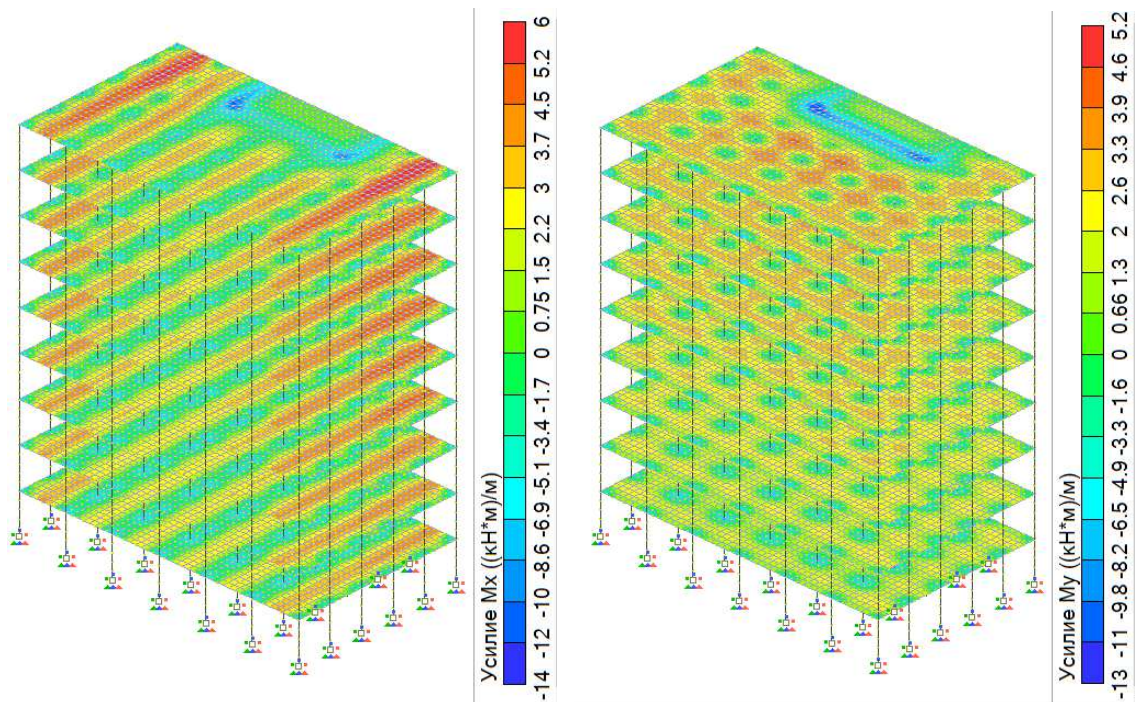


Рисунок 3.96 – Цветовая схема отображения усилий M_x M_y при сейсмическом расчете при комбинации нагрузок СЗ

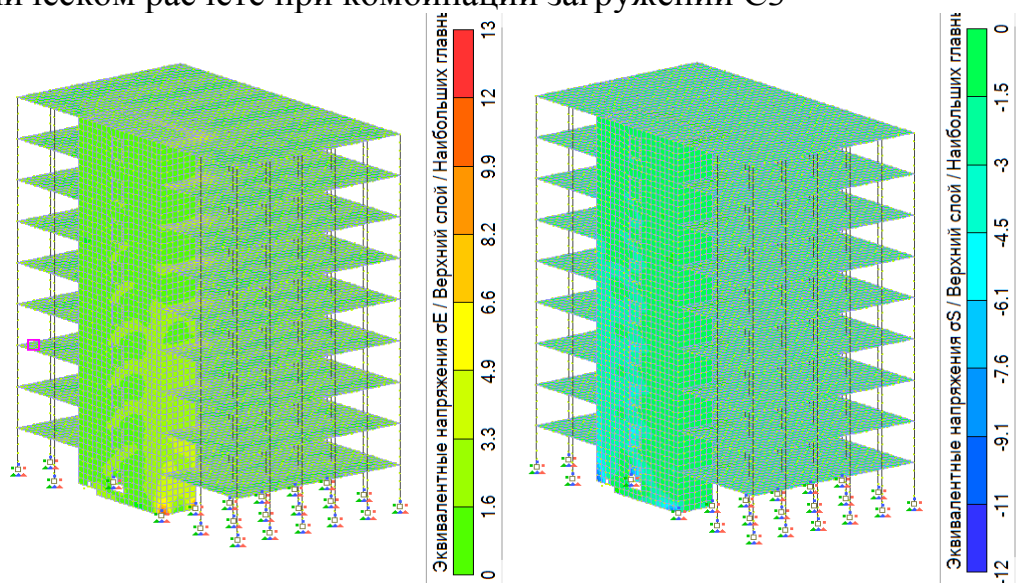
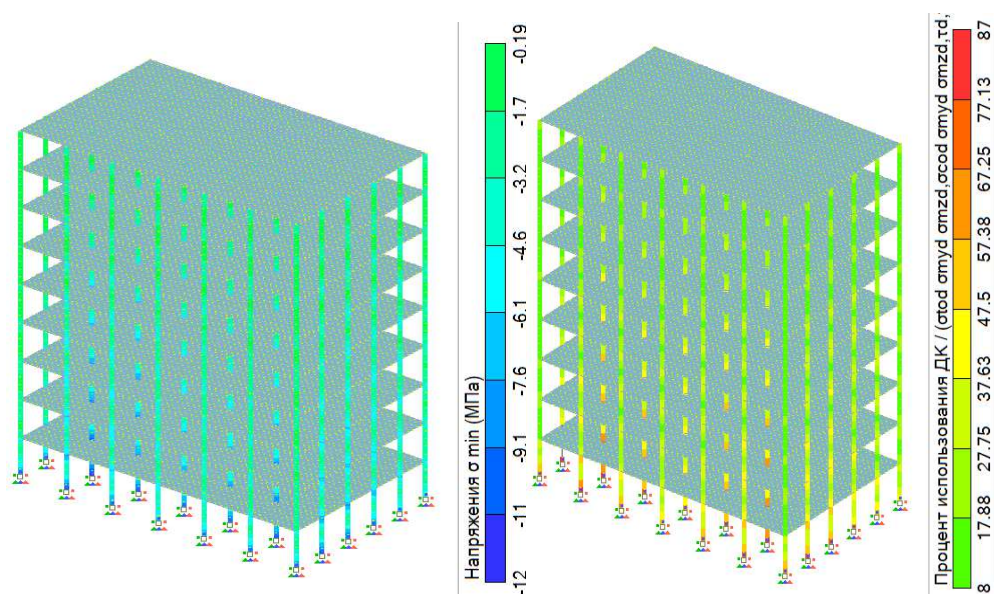


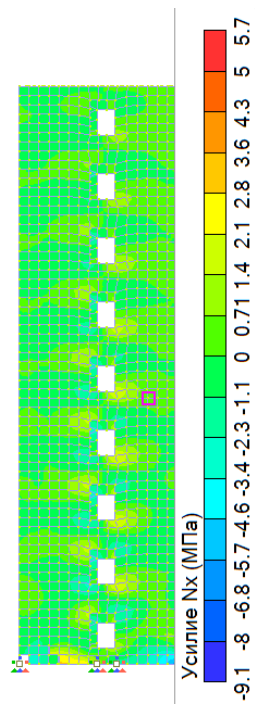
Рисунок 3.97 – Цветовая схема отображения эквивалентных напряжений σ_S и σ_E при сейсмическом расчете при комбинации нагрузок СЗ



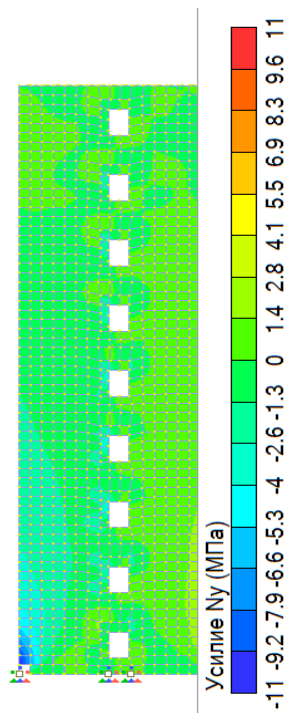
Максимальные значения усилий в CLT панелей плиты покрытия, перекрытия 1-го этажа и перекрытия 5 этажа сведены в таблицу 3.19

Таблица 3.19 – Максимальные значения усилий в плитах перекрытия

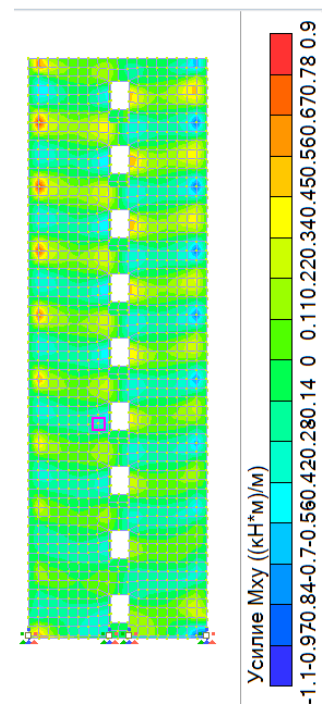
Параметры	Плита 1-го этажа	Плита 5-го этажа	Плита покрытия	Сопротивление изгибу, Мпа
N_x МПа	2,6	1,9	1,1	9,4
N_y КПа	-1,1	-0,5	-0,63	
M_x (кН*м)/м	-18,0	-23,0	-26,0	
M_y (кН*м)/м	-16,0	-22,0	-26,0	
σ_E МПа	5,0	5,6	6,0	
σ_{SM} МПа	-3,4	-3,1	-2,5	



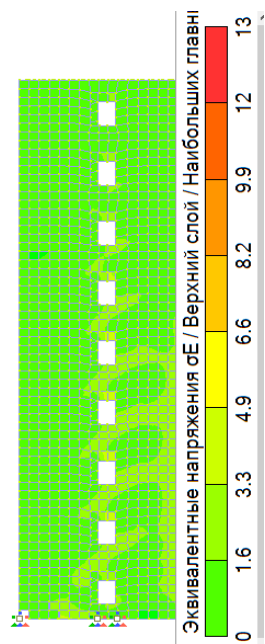
$N_x = -9,1$ МПа



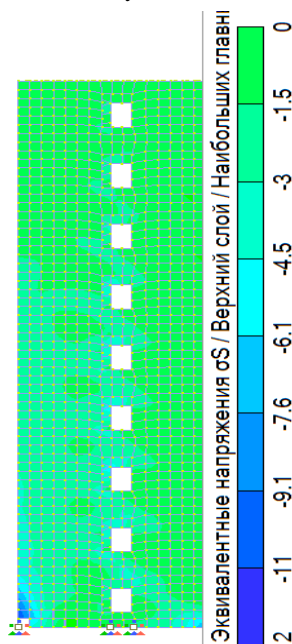
$N_y = -11$ МПа



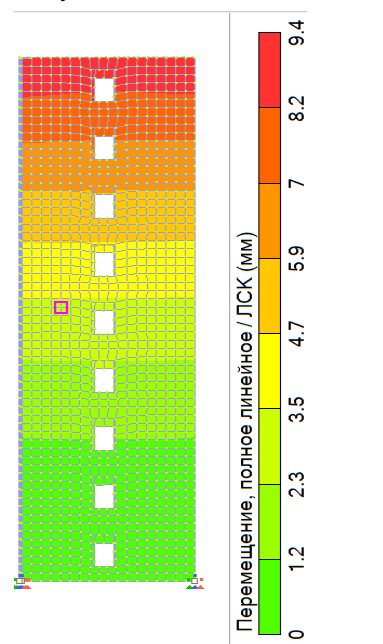
$M_{xy} = 1,1$ (кН*м)/м



$\sigma_E = 13$ МПа



$\sigma_S = -12$ МПа



Перемещения = -9,4 мм

Рисунок 3.98 – Изополя напряжений и моментов в диафрагме жесткости при статическом расчете при комбинации нагрузок С3

Из рисунка 3.54 видно, что наиболее напряжена нижняя часть диафрагмы жесткости, продольные усилия в которой составляют: $N_x = -2,6$ МПа, $N_y = -5,7$ МПа. Наибольшие моменты возникают в средней части диафрагмы жесткости и составляют $M_{xy} = -1,2$ (кН*м)/м. Эквивалентные напряжения σ_E и σ_S

составляют 5,7 МПа и -12 МПа соответственно, при нормативном значении сопротивления изгибу 9,38 МПа и нормативном значении прочности на сжатие вдоль волокон 15 МПа. Результаты сравнения полученных напряжений и усилий от действия основной комбинации нагрузок СЗ представлены на рисунке 3.55

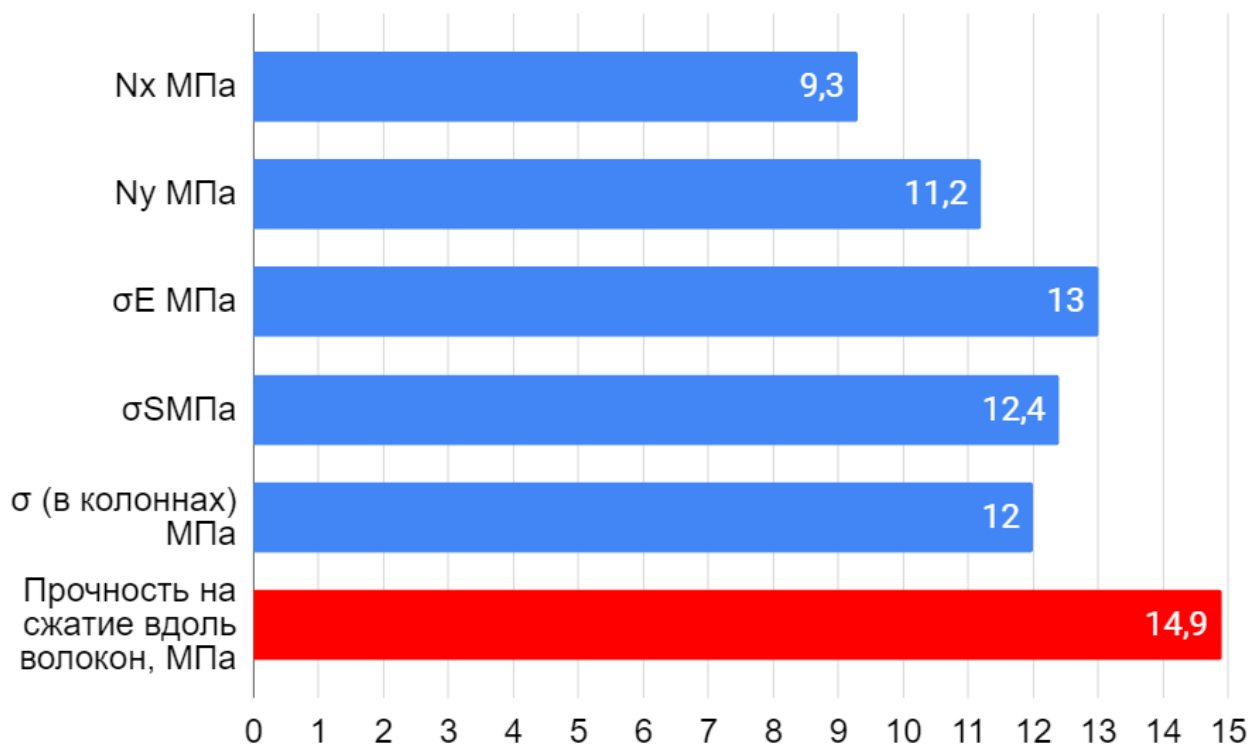


Рисунок 3.99 – Сравнения полученных напряжений с предельно допустимыми значениями

Различия между результатами расчетов по нормам СП 14.13330.2018 от расчета на действие акселерограммы землетрясения Эль-Центро:

Между расчетом линейно-спектральным методом по нормам СП 14.13330.2018 строительство в сейсмических районах, при интенсивности 8 баллов и расчетом на действие акселерограммы землетрясения Эль-Сентро в максимальных значениях перемещений здания, усилий, эквивалентных напряжений разница составляет порядка 1,8 раза.

Далее представлена сводная таблица по максимальным значениям напряжений и усилий в CLT панелях при статическом расчете, расчете на

действие сейсмической нагрузки линейно-спектральным методом при землетрясении в 8 баллов и расчете на действие акселерограммы землетрясения Эль-Центро.

Таблица 3.20 – Напряжения и усилия в конструктивных элементах здания при расчете на сейсмическую нагрузку, статическом расчете, расчетах на акселерограмму землетрясений

Элемент		Напряжение, момент, усилие	Статический расчет	Расчет по СП 14.13330.2018	Акселерограмма Эль-Центро
Максимальные напряжения в CLT панелях по зданию	N_x , МПа	1,3	3,2	9,3	
	N_y , МПа	-3	-7,1	-11,2	
	M_x , (кН*м)/м	-18,5	-20,0	-32,0	
	M_y , (кН*м)/м	-20,5	-21,0	-30,0	
	σ_E	2,1	5,0	13	
	σ_S	3,8	9,4	12,4	
	σ_K	6,5	9,7	12	
Плита перекрытия 1 этажа	N_x , МПа	0,18	0,43	2,6	
	N_y , МПа	-0,14	-0,37	-1,1	
	M_x , (кН*м)/м	-5,8	-9,6	-18	
	M_y , (кН*м)/м	-4,7	-11,0	-16	
	σ_E	1,4	2,5	5,0	
	σ_S	-0,82	-1,1	-3,4	
Плита перекрытия 5 этажа	N_x , МПа	0,3	0,45	1,9	
	N_y , МПа	-0,7	-0,56	-0,5	
	M_x , (кН*м)/м	-12,0	-15,4	-23,0	
	M_y , (кН*м)/м	-11,0	-16,2	-22,0	
	σ_E	2,1	3,6	5,6	
	σ_S	-1,1	-1,3	-3,1	
Плита покрытия	N_x , МПа	-0,13	0,29	1,1	
	N_y , МПа	-0,52	-0,73	-0,63	
	M_x , (кН*м)/м	-20,0	-24,0	-26,0	
	M_y , (кН*м)/м	-21,0	-25,0	-26,0	
	σ_E	2,7	5,9	6,0	
	σ_S	-1,2	-1,9	-2,5	

Сравнение результатов сейсмического расчета приведено в виде диаграммы.

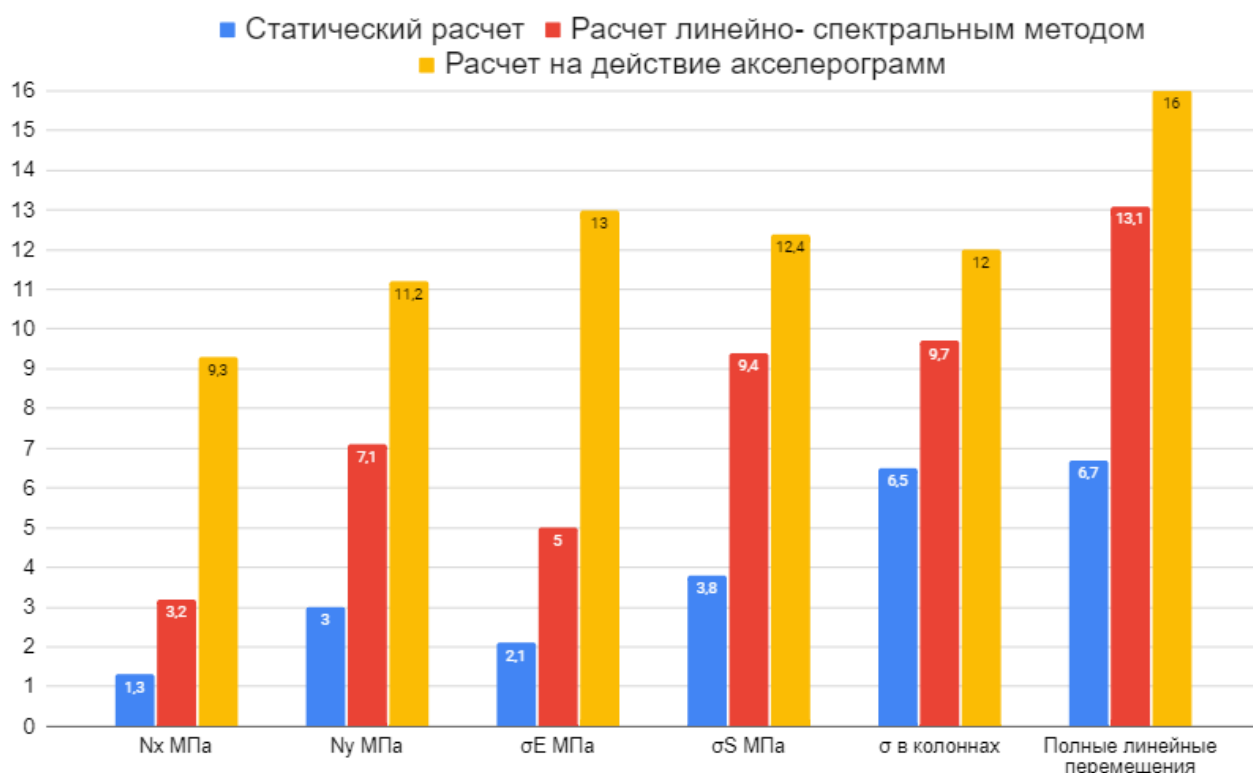


Рисунок 3.100 – Сравнение результатов расчетов

Выводы: По результатам проведенных расчетов многоэтажного каркасного здания из CLT панелей, сделаны следующие выводы:

1) Несущая способность и жесткость принятой конструктивной схемы обеспечена при действии сейсмической нагрузки, заданной линейно-спектральным методом и действием акселерограммы землетрясения в г. Эль-Сентро. Запас прочности несущих стеновых CLT панелей составил около 8%.

2) В ходе расчета были выявлены самые напряженные элементы здания: несущие стеновые панели диафрагмы жесткости (1 этажа), в зоне закрепления с фундаментом здания. Сравнивая усилия в панелях перекрытия можно сделать вывод: самые высокие напряжения выявлены в панелях перекрытия 1-го этажа.

3) Анализируя полные линейные перемещения в здании, можно выявить зоны максимальных перемещений: максимальные перемещения в плитах перекрытия и стеновых панелях были достигнуты в верхней части здания.

Основные выводы по третьей главе

1. Для исследования напряженно-деформированного состояния 9-ти этажного здания из CLT панелей, на основе имеющихся чертежей, в расчетном программном комплексе Лира 10.12 с использованием BIM технологий и программного комплекса Revit разработано 2 пространственных конечно-элементных модели здания, модель со стеновой конструктивной схемой, состоящая из 35650 узлов и 38448 конечных элементов и модель с каркасной конструктивной схемой, состоящая из 15113 узлов и 14838 конечных элементов, с учетом ортотропной модели материала позволяющей приблизить созданную расчетную модель к реальному зданию.

2. Выполнен расчет многоэтажного здания на собственные колебания блочным методом Ланцоша. Проведенный анализ периода (его величина составила 0,58 с) и вида первой формы собственных колебаний здания (она является изгибной с элементами кручения) показывает, что динамические характеристики здания близки к результатам, соответствующим рациональным конструктивным схемам многоэтажных и высотных зданий.

3. Выполнены расчеты многоэтажных зданий на сейсмические воздействия спектральном методом (по нормам СП 14.13330.2018) и расчет на горизонтальное воздействие акселерограммы: землетрясения Эль-Центро (соответствующей 7,5-бальному землетрясению). Ниже представлены диаграммы сравнения полученных данных расчетов здания стеновой конструктивной схемы и каркасной конструктивной схемы.

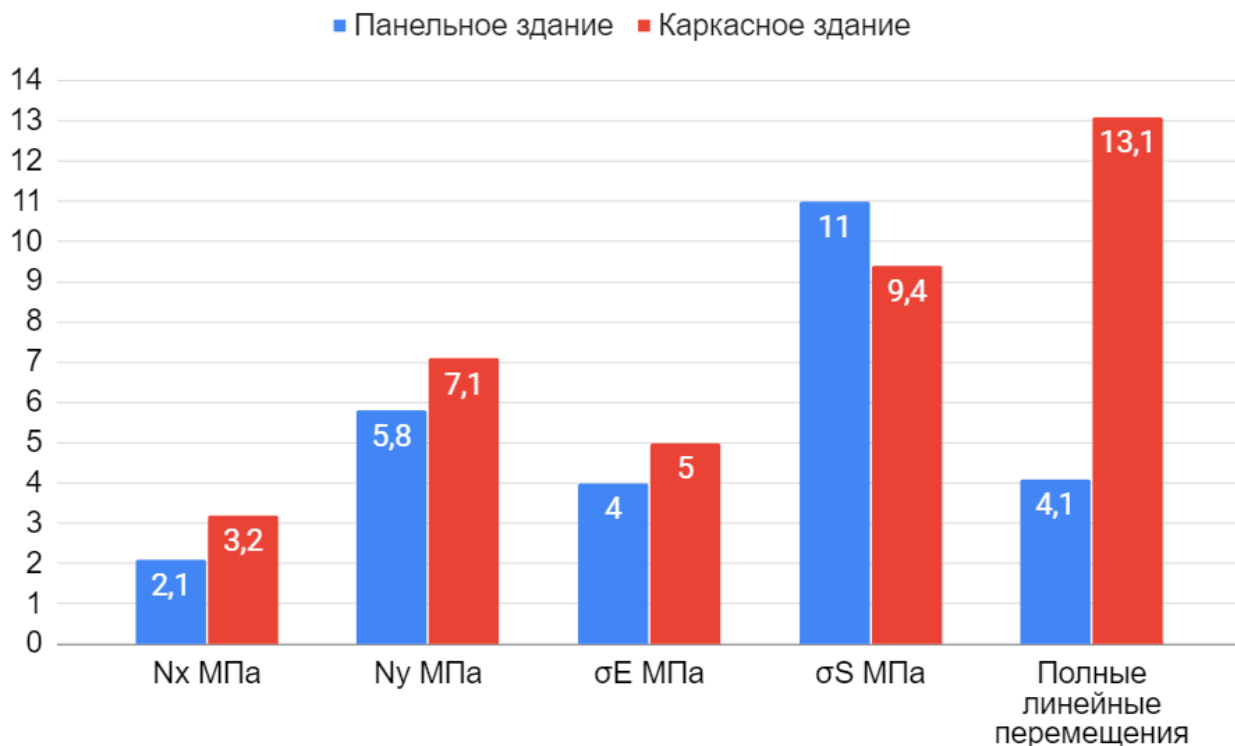


Рисунок 3.101 - Сравнение расчетов Линейно-спектральным методом каркасного и панельного зданий

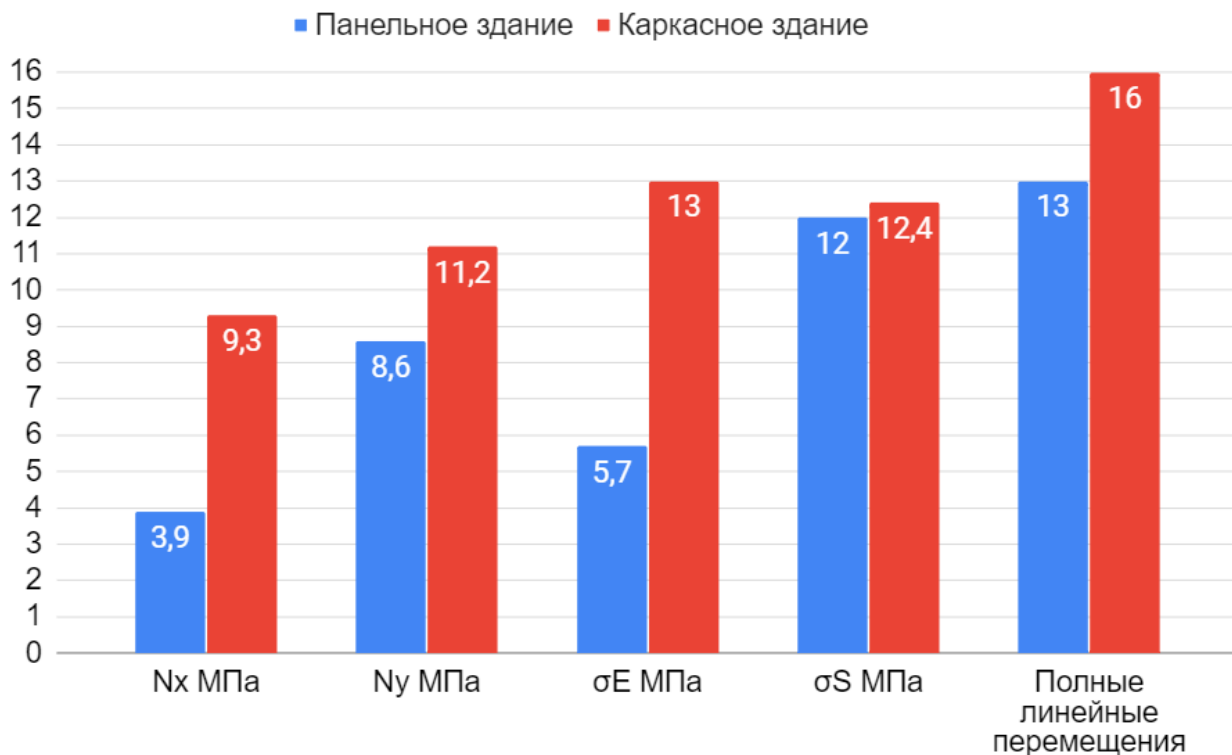


Рисунок 3.102 - Сравнение расчетов на действие акселерограммы каркасного и панельного зданий.

Сравнивая НДС каркасного и панельного зданий, можно сделать вывод, что многоэтажное здание из CLT панелей является наиболее сейсмостойким по сравнению с каркасным зданием из клееного бруса.

4. Как показали проведенные исследования, при расчете по спектральному методу изменение ряда коэффициентов, например, возможность допущения или недопущения повреждения здания, существенно влияет на напряженно-деформированное состояние (величины перемещений и усилий) многоэтажного здания. Данный факт обусловлен тем, что:

- панельные здания имеют значительную сдвиговую жёсткость;
- смещения, возникающие вдоль швов панелей во время землетрясения, приводят к возникновению сил трения, которые оказывают демпфирующие свойства при сейсмических колебаниях;
- панельные здания имеют достаточно высокий резерв «сопротивляемости» сейсмическим колебаниям: даже если разрушится один из элементов, это не приведет к полному обрушению здания;
- характерным повреждением панельных зданий является образование трещин в швах, эти повреждения не приводят к мгновенной потере несущей способности здания во время землетрясений.

Также эффективность работы панельного здания можно существенно повысить при устройстве в фундаментной части специальных средств сейсмозащиты в виде сейсмоизоляции и сейсмогашения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате выполненного обзора исследований напряженно-деформируемого состояния многоэтажных каркасов зданий из CLT панелей, был выявлен рост популярности строительства многоэтажных зданий и сооружений из древесины перекрестно-клееной. Также был проанализирован зарубежный опыт проектирования многоэтажных зданий из клееной древесины, опыт расчета CLT панелей с учетом ортотропной модели материала. Был проведен анализ нормативной базы Российской Федерации, который показал недостаточную проработку вопроса расчета многоэтажных зданий и сооружений из древесины перекрестно-клееной на действие сейсмической нагрузки.

2. Был выполнен сравнительный анализ расчётов CLT панелей с учетом перекрестно-клееной конструкции панели, ортотропной модели материала, изотропной модели материала на различных размерах сетки конечных элементов. Расчет производился в ПК Ansys и ПК Лира 10.12. По результатам расчета стало видно, что учет ортотропной модели материала CLT панели эффективнее по несущей способности в среднем на 15%.

3. Были решены задачи минимизации массы слоистых элементов конструкций с учетом ортотропных свойств материала, при ограничениях на напряженно-деформированное состояние, с помощью инструмента топологической оптимизации в ПК Ansys. Предложен вариант ребристой плиты перекрытия из CLT с заполнением пустот из натурального древесного утеплителя, расход материала при данном варианте уменьшен на 45% по сравнению со стандартной CLT панелью, без потери несущей способности.

4. Был проведен расчет многоэтажного здания из CLT панелей с учетом ортотропной модели материала конструктивной стеновой схемы, расчет был произведен на статическую нагрузку, а также на сейсмическое воздействие двумя методами линейно-спектральным анализом и расчетом на действие акселерограммы г. Эль-Сентро. Расчет показал, что прочность и

жесткость здания обеспечены при действии сейсмической нагрузки в 8 баллов, с запасом прочности в 15%.

5. Был проведен расчет многоэтажного здания из CLT панелей с учетом ортотропной модели материала конструктивной каркасной схемы, расчет был произведен на статическую нагрузку, а также на сейсмическое воздействие двумя методами: линейно-спектральным анализом и расчетом на действие акселерограммы г. Эль-Сентро. Расчет показал, что прочность и жесткость здания обеспечены при действии сейсмической нагрузки в 8 баллов, с запасом прочности в 10%.

6. При сравнении НДС здания с каркасной и стеновой схемой было выявлено, что наиболее эффективным является здание со стеновой схемой. Совокупность напряжений и деформаций у здания со стеновой схемой в 1,6 раза меньше, чем у каркасного здания. Эффективность работы при сейсмических воздействиях различного частотного состава можно существенно повысить при устройстве в фундаментной части специальных средств сейсмозащиты в виде сейсмоизоляции и сейсмогашения.

Список использованных источников

1. Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года [Электронный ресурс]: утверждена распоряжением Правительства Рос. Федерации от 20 сент. 2018 г. № 1989-р. — URL: <http://docs.cntd.ru/document/551187885> (дата обращения 19.12.2020).
2. Рябина О., Лесопромышленный комплекс ждет перемен: лес, рубки и маркировка [Электронный ресурс] / О. Рябина. — URL: <https://proderevo.net/analytics/main-analytics/lesopromyshlennyj-kompleks-zhdet-pere-men-les-rubki-i-markirovka.html> (дата обращения 21.12.2021).
3. Балаев С.Ю., Анализ зарубежного опыта индивидуального малоэтажного домостроения (ИМД) и возможности ИМД в России / [Электронный ресурс]. URL: Удаленный доступ <http://marketologi.ru/members/balaev.html>, создан 03.2009
4. Шапиро А., Деревянный дом: традиции и новаторство. Изд. «Красивые дома пресс», 2013. 232 с.
5. Овсянников С.И., Groшиков В. Метод ускоренной импрегнации древесины // Сб. науч. трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции «Актуальные направления научных исследований XXI века: Теория и практика», ВГЛТА, Воронеж: 2014, № 3, часть 2. С. 309 – 310.
6. Овсянников С.И., Богданов И.И. Федоренко А.В. Экологические аспекты деревянного домостроения / Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. // Белгород, 24–25 ноября, 2015 г. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. Ч. II. С. 236-242.
7. Брюс Д.О. Дерево, как экологически чистая замена железобетону // Ростовский научный журнал. 2017. № 7. С. 111-119.
8. Сибирская финансовая сеть, [Электронный ресурс], -Режим доступа: <http://krasplan.ru/blog/marketingovyie-issledovaniya/perspektivy-i-razvitiya-derevyannogo-domostroeniya-v-rossii.html>, свободный.(10.12.2021)

9. Floornature, [Электронный ресурс], - Режим доступа:
<https://www.floornature.com/r2k-architectes-groupe-scolaire-pasteur-limeil-brevannes-12480/>, свободный (10.12.2020)
10. Деревянное домостроение [Электронный ресурс], -Режим доступа:
<https://www.bfm.ru/news/479161> свободный (10.12.2021)
11. Norvex [Электронный ресурс], - Режим доступа:
<http://norvex.pro/company/blog/brock-commons-18-etazhnoe-obshchezhitie-university-of-british-columbia-in-vancouver-postroennoe-iz-i/>, свободный (10.12.2021)
12. Moelven, [Электронный ресурс] <https://www.moelven.com/mjostarnet/>, свободный (10.12.2021)
13. СТБУН [Электронный ресурс], -Режим доступа:
<https://www.ctbuh.org/> свободный (10.12.2021)
14. Анизотропия древесины и древесных материалов. Ашкенази Е.К. М., «Лесная промышленность». 1978. 224 С.
15. C. Sandhaas, Mechanical Behaviour of Timber Joints with Slotted-In Steel Plates, Karlsruhe, 2012.
16. J. Van de Kuilen и A. Leijten, "Schuifsterkte bepaling van zeven houtsoorten voor de toepassing in verkeersbruggen," Sectie Staal- & Houtconstructies, Delft, 2001.
17. M. Grosse, "Zur numerischen Simulation des physikalisch nichtlinearen Kurzzeittragverhaltens von Nadelholz am Beispiel von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. Докторская диссертация," Баухаус-Университет, Веймар, 2005.
18. J. Денцлер и П. Глос, "Определение значений прочности на сдвиг в соответствии с EN 408". Materials and Structures, no. 40, pp. 79-86, 2007.
19. Никишов В.Д. Исследование методов оценки прочности древесины без разрушения образцов. Сборник работ/МЛТИ, Вып. 14. М., 1965 с. 75-81.
20. М. Марьянович, Н. Маркович, Э. Дамнянович и Р. Цветкович, "Трёхмерный анализ напряжений и проектирование панелей из перекрестно-

ламинированной древесины с использованием метода конечных элементов на основе полнослойной теории," Тонкостенные конструкции, № 157, 2020

21. Canadian CLT Handbook ,2019 EDITION. *Edited by:* Erol Karacabeyli, Sylvain Gagnon © 2019 FPInnovations. All rights reserved.

22.М. Шахневаз, М. Шахрия Алам, Т. Таннерт и М. Поповски, "Экспериментальный и конечно-элементный анализ поперечно-ламинированных (CLT) панелей", в журнале *Advances in Civil Infrastructure and Construction Materials*, Бангладеш, 2015.

23. Е. Серрано и Б. Энквист, "Прочность на сжатие перпендикулярно зерну в поперечно-ламинированной древесине (CLT)", на Всемирной конференции по лесотехнике, 2010.

24. Т. Богенспергер, Р. Йёбстль и М. Аугустин, "Введение сосредоточенной нагрузки в элементы CLT, перпендикулярные плоскости экспериментальные и численные исследования", на Всемирной конференции по лесопромышленному проектированию, 2016.

25. E. Saavedra Flores, K. Saavedra, J. Hinojosa, Y. Chandra and R. Das, "Multi-scale modeling of rolling shear failure in cross-laminated timber structures by homogenisation and cohesive zone models," *International Journal of Solids and Structures*, no. 81, pp. 219-232, 2016.

26. C. Sandhaas, J.-W. G. van de Kuilen и Н. J. Blass, "Трёхмерная конститутивная модель древесины с использованием концепций механики повреждений континуума", Европейский конгресс по вычислительным методам в прикладных науках и инженерии, стр. 1451-1466, 2012.

27. ABAQUS, "17.2.1 Линейное упругое поведение" [Онлайн]. Доступно: <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/us b/default.htm?startat=pt05ch17s02abm02.html>. [2021].

28. Методика расчета панелей из перекрестно клеёной древесины., А. Готкадзе, Е.Е. Васин и Е.Г. Шабилова, Санкт-петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

29. Master's degree in Civil Engineering, Natural Risk Protection, Structures:
Graduation thesis: “ДИК BUILDING DESIGN AND ANALYSIS WITH RFEM”
University Tutor: Prof. Gianmarco De Felice, Corporate Tutor: Prof. Vlatka Rajčić,
Student: Elisa Moretti.

30. Промстройлес [Электронный ресурс], -Режим доступа:
<https://www.pslcomp.ru/> свободный.(10.12.2021)

ПРИЛОЖЕНИЕ А Физико-механические характеристики CLT панелей

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ CLT СТЕН И ПЕРЕГОРОДОК

Стены и перегородки (до 3000 мм)										Технические характеристики (расчетная ширина 1000 мм)										
										Площадь поперечного сечения продольных ламелей, см ²	Площадь поперечного сечения Брутто, см ²	Радиус инерции, см	Собственный вес плиты, кН/м ²	Кэф. условной работы	Кэф. высоты сечения	Прочность на сжатие вдоль волокон, МПа	Прочность на сжатие поперек волокон, МПа	Несущая способность, кН		
№	Слои	Толщина, мм	Конфигурация ламели, мм							A (net)	A (q)	i (y)	G	K (mod)	Kh	f (c,0,d)	f (c,90,d)	2,60 м	2,80 м	3,00 м
1	3s	60	20	20	20	-	-	-	-	400	600	1,732	0,3	0,8	0,8	13	1,8	47	41	36
2	3s	80	20	40	20	-	-	-	-	580	700	1,843	0,36	0,8	0,8	13	1,8	176	154	136
3	3s	82	33	16	33	-	-	-	-	660	800	2,194	0,38	0,8	0,8	13	1,8	198	170	148
4	3s	99	33	33	33	-	-	-	-	660	990	2,858	0,495	0,8	0,8	13	1,8	213	184	160
5	3s	106	43	20	43	-	-	-	-	860	1060	3,06	0,53	0,8	0,8	13	1,8	307	265	231
6	3s	129	43	43	43	-	-	-	-	860	1290	3,724	0,645	0,8	0,8	14	1,8	505	435	379
7	5s	80	16	16	16	16	16	-	-	480	800	2,309	0,4	0,8	0,8	13	1,8	103	89	78
8	5s	97	16	16	16	16	33	-	-	650	970	2,8	0,485	0,8	0,8	13	1,8	201	173	151
9	5s	100	20	20	20	20	20	-	-	600	1000	2,887	0,5	0,8	0,8	13	1,8	202	174	151
10	5s	114	33	16	16	16	33	-	-	820	1140	3,291	0,57	0,8	0,8	14	1,8	371	320	279
11	5s	120-123	20	20	43	20	20	-	-	830	1230	3,551	0,615	0,8	0,8	14	1,8	442	281	332
12	5s	131	33	16	33	16	33	-	-	990	1310	3,782	0,655	0,8	0,8	15	1,8	614	540	471
13	5s	140-146	43	20	20	20	43	-	-	990	1480	4,27	0,74	0,8	0,8	15	1,8	696	642	586
14	5s	165	33	33	33	33	33	-	-	990	1650	4,763	0,825	0,8	0,8	15	1,8	782	743	701
15	5s	163-169	43	20	43	20	43	-	-	1290	1690	4,879	0,845	0,8	0,8	15	1,8	993	946	896
16	5s	189-195	43	33	43	33	43	-	-	1290	1950	5,629	0,975	0,8	0,8	15	1,8	1090	1054	1016
17	5s	206-215	43	43	43	43	43	-	-	1290	2150	6,207	1,075	0,8	0,8	15	1,8	1150	1120	1088
18	7s	226-232	43	20	43	20	43	20	43	1720	2320	6,697	1,16	0,8	0,8	15	1,8	1513	1480	1444
19	7s	271	43	33	43	33	43	33	43	1720	2710	7,823	1,355	0,8	0,8	15	1,8	1609	1584	1558
20	7s	295-301	43	43	43	43	43	43	43	1720	3010	8,689	1,505	0,8	0,8	15	1,8	1671	1650	1628

ПЛИТЫ ПЕРЕКРЫТИЯ CLT - ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Плиты перекрытия (ширина до 3000 мм)										Технические характеристики (расчетная ширина 1000 мм)						
№	Слои	Толщина, мм	Конфигурация ламели, мм							Площадь поперечного сечения продольных ламелей, см ²	Площадь поперечного сечения Брутто, см ²	Радиус инерции, см	Момент инерции, см ⁴	Момент сопротивления, см ³	Собственный вес плиты, кН/м ²	Сопротивление изгибу, Мпа
										A (net)	A (q)	i (y)	I (y)	W (u)	G	f (m,d)
1	3s	60	20	20	20	-	-	-	-	400	600	1,732	1800	600	0,3	9,65
2	3s	80	20	40	20	-	-	-	-	580	700	1,843	4680	1156,4	0,36	9,65
3	3s	82	33	16	33	-	-	-	-	660	990	2,194	6247	1394,3	0,46	9,65
4	3s	99	33	33	33	-	-	-	-	660	800	2,858	8086	1633,5	0,495	9,65
5	3s	106	43	20	43	-	-	-	-	860	1060	3,06	9925	1872,67	0,53	11,54
6	3s	129	43	43	43	-	-	-	-	860	1290	3,724	17889	2773,5	0,645	9,65
7	5s	80	16	16	16	16	16	-	-	480	800	2,309	4267	1066,67	0,4	8,78
8	5s	97	16	16	16	16	33	-	-	650	970	2,8	7606	1568,17	0,485	9,69
9	5s	100	20	20	20	20	20	-	-	600	1000	2,887	8333	1666,67	0,5	8,78
10	5s	114	33	16	16	16	33	-	-	820	1140	3,291	12346	2166	0,57	10,34
11	5s	120-123	20	20	43	20	20	-	-	830	1230	3,551	15507	2521,5	0,615	9,76
12	5s	131	33	16	33	16	33	-	-	990	1310	3,782	18734	2860	0,655	11,57
13	5s	140-146	43	20	20	20	43	-	-	990	1480	4,27	28084	3698,5	0,74	10,47
14	5s	165	33	33	33	33	33	-	-	990	1650	4,763	37434	4537,5	0,825	9,38
15	5s	163-169	43	20	43	20	43	-	-	1290	1690	4,879	40223	4760,17	0,845	11,67
16	5s	189-195	43	33	43	33	43	-	-	1290	1950	5,629	61791	6337,5	0,975	10,24
17	5s	206-215	43	43	43	43	43	-	-	1290	2150	6,207	82820	7704,17	1,075	9,38
18	7s	226-232	43	20	43	20	43	20	43	1720	2320	6,697	104060	8970,67	1,16	11,44
19	7s	271	43	33	43	33	43	33	43	1720	2710	7,823	165854	12240,2	1,355	9,98
20	7s	295-301	43	43	43	43	43	43	43	1720	3010	8,689	227258	15166,7	1,505	9,11

ПРИЛОЖЕНИЕ Б - Сертификаты соответствия СЛТ панелей

СИСТЕМА ДОБРОВОЛЬНОЙ СЕРТИФИКАЦИИ В ОБЛАСТИ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
регистрационный № РОСС RU.И1238.04ЖРТО
СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ
№ АПБ.RU.OC001.Н.00074

ЗАЯВИТЕЛЬ Общество с ограниченной ответственностью «Григ Наст»,
Адрес: 196641, РОССИЯ, город Санкт-Петербург, улица Губриловой, дом 12, помещение 2Н,
ОГРН: 1027802509624. Телефон: +78125963901, e-mail: house@pbccomp.spb.ru.

ИЗГОТОВИТЕЛЬ Общество с ограниченной ответственностью «Григ Наст»,
Адрес: 196641, РОССИЯ, город Санкт-Петербург, поселок Металлострой,
дорога на Металлострой, дом 4. ОГРН: 1027802509624,
Телефон: +78125963901, e-mail: house@pbccomp.spb.ru.

ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ ООО «Пожиромтест», ОГРН: 1117746505480, 107078, г. Москва, ул. Новая Басманная,
дом 23Б, стр. 20. Телефон/факс: 8(495)975-72-47. Свидетельство о подтверждении
компетентности № АПБ.RU.ЖРТО.OC.001 от 04.08.2014 г.

ПОДТВЕРЖДАЕТ, ЧТО ПРОДУКЦИЯ Перекрестно-клееные деревянные плиты стеновые и
перекрытия для жилых и не жилых строений, согласно
приложению №1 на 1 листе (блик № 001199), выпускаемые по
ТУ 5367-001-54219568-2014. Серийный выпуск.
код ОК 005 (ОКП) 53 6711
код ТН ВЭД код ОК 005 (ОКП) 53 6711

СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ ГОСТ 30247.0-94, ГОСТ 30247.1-94, ГОСТ 30403-2012, СНиП 21-01-97, ТУ 5367-001-
54219568-2014.

ПРОВЕДЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ (ИСПЫТАНИЯ) И ИЗМЕРЕНИЯ Отчеты сертификационных испытаний № АПБ-012/02-2015 от 18.02.2015 г., № АПБ-013/02-
2015 от 18.02.2015 г., ИЛ ООО «Пожиромтест», рег. № АПБ.RU.ЖРТО.ИЛ.001 от 04.08.2014 г.

ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ ДОКУМЕНТЫ Сертификат соответствия системы менеджмента качества изготовителя требованиям ГОСТ
ISO 9001-2011 (ISO 9001:2008), № ССК.RU.A00442 от 22.09.2014 г., выдан ОС: ООО
«СтройКонсалт», рег. № РОСС RU.3951.04ЖИД60.

СРОК ДЕЙСТВИЯ СЕРТИФИКАТА СООТВЕТСТВИЯ с 16.03.2015 по 15.03.2018

Руководитель,
(администратор, руководитель
организации по сертификации)
А.А. Григорьев

Эксперт (эксперты)
(инженер, инженер, физик)
Д.Л. Голубева

001200

СИСТЕМА ДОБРОВОЛЬНОЙ СЕРТИФИКАЦИИ В ОБЛАСТИ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
регистрационный № РОСС RU.И1238.04ЖРТО
ПРИЛОЖЕНИЕ
К СЕРТИФИКАТУ СООТВЕТСТВИЯ
№ АПБ.RU.OC001.Н.00074

Приложение №1
Перечень продукции, на которую распространяется действие сертификата соответствия

код ОК 005 (ОКП) код ТН ВЭД России	Наименование, типы, марки, модели однородной продукции, составные части изделия или комплекса	Обозначение документации, по которой выпускается продукция
53 6711	Перекрестно-клееные деревянные плиты стеновые для жилых и не жилых строений: - толщиной 158 мм (5x158) при нагрузке 10 т/пог.м имеют предел огнестойкости не менее REI 90 и класс пожарной опасности K1(30); - толщиной 217 мм (7x217) при нагрузке 16,5 т/пог.м имеют предел огнестойкости не менее REI 90 и класс пожарной опасности K1(30);	ТУ 5367-001-54219568-2014
53 6711	Перекрестно-клееные деревянные плиты перекрытия для жилых и не жилых строений: - толщиной 158 мм (5x158) при равномерно распределенной нагрузке 600 кгс/м ² имеют предел огнестойкости не менее REI 60 и класс пожарной опасности K1(30); - толщиной 217 мм (7x217) при равномерно распределенной нагрузке 600 кгс/м ² имеют предел огнестойкости не менее REI 90 и класс пожарной опасности K1(30).	ТУ 5367-001-54219568-2014

Руководитель,
(администратор, руководитель
организации по сертификации)
А.А. Григорьев

Эксперт (эксперты)
(инженер, инженер, физик)
Д.Л. Голубева

001199

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерно-строительный институт
институт

Кафедра строительных конструкций и управляемых систем
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой


подпись
« 22 » 08 2022 г.
С.В. Деордиев
инициалы, фамилия

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Исследование НДС каркасов многоэтажных зданий из CLT панелей при
действии особых нагрузок»
тема

08.04.01 «Строительство»
код и наименование направления

08.04.01.03 «Теория и проектирование зданий и сооружений»
код и наименование магистерской программы

Руководитель



доцент, к.т.н.

Н.И.Марчук

подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

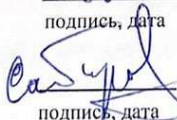
Выпускник



В.В.Одегов

инициалы, фамилия

Рецензент



доцент, к.т.н.

Р.А.Саби́ров

подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Красноярск 2022